

Research Paper

A detailed DOE study on temperature, concentration and their interactions on corrosion protection of carbon steel

Sirus Javadpour¹, Mohammad Ebrahim Bahrololoom¹, Morteza Roodaki*¹

1- Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz7134851154, Iran

Received: 2021/11/05

Revised: 2022/02/14

Accepted: 2022/02/21

Use your device to scan and read the article online



DOI:

[10.30495/jnm.2022.29506.1946](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.29506.1946)

Keywords: Corrosion Protection, Corrosion Inhibitor, Central Composite Experimental Design, Electrochemical Testing, XRD Measurements, FTIR.

Abstract

An imidazoline based inhibitor was synthesized using oleic acid and diethylenetriamine (DETA). The characteristic properties of the synthesized inhibitor were investigated by FTIR and HNMR tests. Tafel polarization technique and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) were used to study the electrochemical and corrosion inhibition properties of the inhibitor in CO₂ saturated 3% NaCl solution. Potassium iodide was added to the corrosion media to enhance the inhibition efficiency of the inhibitor. The measured corrosion rates were optimized by Design Expert 10.0.7 software using central composite design and response surface method. Temperature and inhibitor concentration were selected as the most effective parameters. Analyses of variance (ANOVA) were performed on the results of the designed experiments. It was found that temperature and inhibitor concentration effects on corrosion rate and inhibition efficiency are complicated and their interactions. Addition of KI to the inhibitor system had a synergistic effect on the corrosion inhibition. It almost eliminated the dependency of the corrosion rate to temperature and inhibitor concentration which is a great achievement in inhibitor applications in oil and gas industries. DOE data revealed that the best inhibition of corrosion occurred at 25°C with 37.7 ppm of synthesized Imidazoline inhibitor and 2000 ppm KI. It is estimated by the software that at this point the corrosion rate is 6 μm/year and polarization resistance is 30788 Ω. The synthesized inhibitor conforms perfectly to the Langmuir adsorption isotherm.

Citation: Javadpour S, Bahrololoom M.E, Roodaki M. A detailed DOE study on temperature, concentration and their interactions on corrosion protection of carbon steel. Quarterly Journal of New Materials. 2021; 12(45): 77- 94.

*Corresponding author: Morteza Roodaki

Address: Department of Materials Science and Engineering, School of Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Tell: 00989173112594

Email: morteza.roodaki@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Corrosion of steel in CO₂ containing oil and gas systems are one of the most issues that has drawn lots of attention. Different parameters are effective on corrosion rate, the most important of which are temperature and inhibitor concentration. Lots of researches were done on this issue, most of them reported that corrosion rate would be increased by temperature rise and concentration decrease, while few articles also reported that these trends are not this simple and temperature and concentration affect corrosion rate more complicated and have interactions with each other. However, studying the detailed influences of temperature and concentration on inhibition behavior of an inhibitor are not discussed very much.

Here in this research, we synthesized an inhibitor to be injected to a corrosion test cell. We also tried to understand how the corrosion rate and polarization resistance are influenced by temperature and concentration and besides how changing one of these two parameters affect the other one impact.

Materials and Methods

Oleic acid and diethylenetriamine (DETA) were purchased and used as the two main reagents. In a three necked flask DETA was added drop wise to oleic acid at 70°C with a molar ratio of 1:1. The mixture was heated up to 175 °C and retained at this temperature for about 1 hour. Water is produced as the product of the reaction between DETA and oleic acid. Trapped water proves the completion of the reaction and formation of the amide. The mixture was then heated up to 225-240°C. Further amount of water was produced and extracted from the mixture in the next stage of the process. The yellowish product turned to brown imidazoline compound as the result of temperature increase.

describes these FTIR bands and their corresponding bonds all of which are in accordance with the bonds reported for

The physical properties of the synthesized inhibitor were then tested by HNMR and FTIR methods using RXI PekinElmer and Bruker Advance III spectrometer devices respectively.

The synthesized imidazoline compound was injected as inhibitor at different concentrations and temperatures to study corrosion efficiency. Isopropyl alcohol used in dilution of the inhibitor. Tafel polarization and Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) were used to study the electrochemical behavior of the synthesized inhibitor by Autolab 302N Potentiostat/Galvanostat in the deoxygenated CO₂ saturated 3wt% NaCl solution. Corrosion rate and polarization resistance were recorded as the two factors affecting corrosion protection efficiency, while different amounts of the synthesized inhibitor were injected to the NaCl solution at different temperatures. Effect of the addition of 2000ppm KI on the corrosion rate and polarization resistance was also studied.

Tafel polarization test carried out at the scan rate of 1mV/s. Nova 2.1 software used to both conduct electrochemical tests and evaluate test results.

Design Expert 10.0.7 (DOE) software was used to design the experimental procedure of the electrochemical tests. *Response surface* method and *central composite* mode of DOE software were applied for designing. The DOE software helped both experimental designing and statistical interpretation of data.

Results and Discussions

Fourier Transform Infra-Red Spectroscopy

The synthesized product illustrates different FTIR bands as there are different bonds each with different bonding energies in the structure of the compound.

imidazoline compounds in previous researches. The absorption peak appeared at 1607 cm⁻¹ in the spectrum clearly

indicates the presence of C=N bond which is the characteristic absorption peak of an imidazoline ring.

NMR spectroscopy

Error! Reference source not found. shows the ^1H NMR spectrum of the synthesized inhibitor. As can be seen in the spectrum, there are sharp peaks at 5.22ppm, 3.56ppm, 3.15ppm and 2.73ppm, which are related to imidazoline compound according to previous studies.

Electrochemical measurements

Corrosion rate and polarization resistance data extracted from Tafel polarization plots were entered in DOE software. By means of this software different figures such as corrosion rate vs. temperature, corrosion rate vs. inhibitor concentration and a 3-D plot showing simultaneously the effects of both temperature and inhibitor concentration on corrosion rate were plotted.

Table 1 FTIR bands for the synthesized imidazoline compound

| FTIR band (cm^{-1}) | Function Group |
|--------------------------------|--|
| 1280.94 | CH_3 (C-H bending symmetrical) |
| 1458.57 | CH_2 (C-H bending asymmetrical) |
| 1607.89 | C=N |
| 2854.27 | C-H symmetrical stretch |
| 2924.57 | C-H asymmetrical stretch |
| 3292.3 | N-H stretching vibration |

Effect of the synthesized inhibitor on corrosion behavior:

Electrochemical data show that the corrosion rate in the presence of inhibitor is always much less than that of without inhibitor. This indicates that the synthesized inhibitor is effective for the system. Addition of the synthesized inhibitor can increase the corrosion protection efficiency to a great extent (98.8% of efficiency for 25ppm inhibitor at 50°C), the effects of temperature and concentration on the corrosion protection efficiency is somehow complicated.

By means of DOE software we figured out that at different temperatures increasing inhibitor concentration could affect corrosion rate differently. Error! Reference source not found. simply shows the fact that at 50°C corrosion rate is generally more than what it is at 25°C regardless of the inhibitor concentration, as the red curves generally locate above the black ones.

By looking precisely to this graph, it can be found out that at low temperatures (25°C), where the corrosion rate is slow, increasing inhibitor concentration decreases corrosion rate. This is mainly because more inhibitor concentration adds up inhibitor molecules to the film and thicken the barrier film while diminishes the porosities, resulting to a higher corrosion protection and lower corrosion rate. While, at this temperature, by reaching a high concentration the inhibitor film is so thick that is not stable anymore and begins to deteriorate and hence corrosion rate increases as the result. Overall, the plot for corrosion rate vs. inhibitor concentration at 25°C , doesn't show a very high slope and corrosion rate does not change substantially in this plot so the temperature effect is negligible. This means that changing inhibitor concentration doesn't affect corrosion rate very much at low temperatures.

On the other hand, at 50°C the plot begins at higher corrosion rates and continues ascending until the inhibitor concentration

reaches about 75ppm. Actually, this graph shows a competition between the effects of high temperature and increasing corrosion inhibitor on the corrosion rate. At low concentrations the high temperature beats the competition. While by adding further inhibitor to the system, the formed inhibitor film on the steel substrate finally gets thick enough to nullify the effect of temperature and decrease the corrosion rate. It is worth mentioning that at higher temperatures the physical bonding between inhibitor and the steel substrate and between the inhibitor molecule themselves are enhanced so a thicker film can be made easily without the thread of deterioration due to unstability. In other words, at the same concentration of inhibitor, the inhibitor barrier film is thicker at higher temperatures. Electrochemical measurements also support this statement.

Addition of 2000ppm KI to the solution increases further corrosion protection efficiency to 99.2%. In addition, by adding KI to the inhibitor, we could lessen the effects of temperature and concentration changes on the corrosion rate, which makes this inhibitor more suitable to be applied in oil and gas industry, where the temperature of the pipelines and above ground facilities changes a lot and usually increases.

The adsorption mechanism of the synthesized imidazoline molecules to steel surface obeys the Langmuir adsorption isotherm.

Conclusion

Increasing inhibitor concentration and temperature have competitive effects on inhibition properties. The effect of temperature increase is more than the effect of inhibitor concentration increase on inhibition properties of the imidazoline inhibitor, as the slope of corrosion rate increases and polarization resistance decreases due to temperature rise in DOE figures are higher than that of inhibitor concentration increase. In other words, effect of inhibitor concentration increase on corrosion inhibition is neutralized at high temperatures.

Addition of 2000ppm KI to the synthesized inhibitor increases corrosion efficiency. It

also makes environmental changes (temperature and inhibitor concentration) less effective on corrosion rate.

DOE software helps to find the optimum point at which the corrosion rate is minimized and inhibition efficiency is maximized. This point is at 25°C with 37.7ppm of Imidazoline inhibitor and 2000ppm KI. It is estimated by the software that at this point the corrosion rate is 6µm/year and polarization resistance is 30788Ω.

Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

Funding

No funding.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

مقاله پژوهشی

مطالعه اثر دما و غلظت ممانعت کننده امیدازولینی سنتز شده و بر همکنش آن‌ها بر خوردگی فولاد کربنی به روش DOE

سیروس جواد پور،^۱ محمد ابراهیم بحر العلوم،^۱ مرتضی رودکی*^۱
 ۱- بخش مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

مطالعه پارامترهای مختلف از قبیل دما و غلظت ممانعت کننده بر رفتار ممانعت‌کنندگی یک ماده در پژوهش‌های مختلف مورد بحث و بررسی بوده است. حال آنکه بررسی هم‌زمان اثر هر دو پارامتر و همچنین تداخل اثر آن‌ها مبحثی کمتر پرداخته شده است که نیازمند دیدی دقیق‌تر است و بحث پژوهش حاضر می‌باشد. در این پژوهش یک ممانعت کننده امیدازولینی با استفاده از اولئیک اسید و دی اتیلن تری آمین (DETA) تولید شد. مشخصه یابی ترکیب تولید شده به وسیله روش‌های FTIR و HNMR صورت پذیرفت. همچنین به منظور بررسی خواص ممانعت‌کنندگی ترکیب تولید شده، آزمون‌های پلاریزاسیون تافل و طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) در محیط ۳wt% NaCl اشباع از گاز CO₂ انجام شد. پتانسیم دیدید نیز به محیط حاوی ممانعت کننده افزوده شد و تأثیر آن مورد بررسی قرار گرفت. میزان بهینه نرخ خوردگی‌هایی که به وسیله آزمون‌های الکتروشیمیایی اندازه‌گیری شد به کمک نرم‌افزار Design Expert 10.0.7، با طراحی central composite design و روش response surface تخمین زده شد. نرم‌افزار DOE پیش‌بینی می‌کند که بیشترین ممانعت‌کنندگی از خوردگی در دمای ۲۵°C و با غلظت ۱۰۰ ppm از ممانعت کننده سنتز شده و با حضور ۲۰۰۰ ppm KI اتفاق می‌افتد. نرخ خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون پیش‌بینی شده در این شرایط توسط نرم افزار، به ترتیب ۸۸۲۲ $\mu\text{m}/\text{year}$ و ۳۵۳۳۹ Ω می‌باشد. رفتار جذبی ممانعت کننده تولید شده با ایزوترم جذب Langmuir مطابقت دارد و افزودن KI تأثیری بر مکانیزم جذب ندارد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۴

تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۲

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید



DOI:

[10.30495/jnm.2022.29506.1946](https://doi.org/10.30495/jnm.2022.29506.1946)

واژه‌های کلیدی:

مقاومت به خوردگی، ممانعت کننده خوردگی، آزمون‌های الکتروشیمیایی، آزمون امپدانس الکتروشیمیایی، آزمون پلاریزاسیون تافل، HNMR، FTIR، DOE.

* نویسنده مسئول: مرتضی رودکی

نشانی: بخش مهندسی و علم مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

تلفن: ۰۹۱۷۳۱۱۲۵۹۴

پست الکترونیکی: morteza.roodaki@gmail.com



مقدمه

فولادهای کربنی، به دلیل مقرون به صرفه بودن، بیشترین ماده مورد استفاده در صنعت نفت و گاز می‌باشند. بر اساس گزارشات، هزینه خوردگی فولاد کربنی در جهان تقریباً ۲/۵ تریلیون دلار در سال برآورد شده است. این ارقام توجه قابل قبولی برای به کار بردن انواع روش‌های مقابله با خوردگی فولادهای کربنی است (۱).

استفاده از ممانعت کننده‌های خوردگی روشی پیشگیرانه در مقابل حمله خوردگی در فلزات می‌باشد. به این منظور، بازدهی ممانعت کننده خوردگی معمولاً به عنوان مقیاسی از اثربخشی یک ممانعت کننده محاسبه می‌شود. ترکیب شیمیایی ممانعت کننده، یکی از عوامل تأثیرگذار بر بازدهی آن می‌باشد. ممانعت کننده‌های آلی با زنجیره‌های هیدروکربنی بلند که دارای اتم‌های با دانسیته الکترونی بالا هستند (مانند اتم‌های O, N, P و S) ممانعت کننده‌هایی با بازدهی بالا گزارش شده‌اند (۲-۶).

عموماً اکثر منابع گازی حاوی مقادیری CO₂ هستند. همچنین اخیراً برای کاهش ویسکوزیته نفت درون چاه‌ها و افزایش فشار چاه که نتیجتاً منجر به افزایش تولید می‌گردد، از تزریق گاز طبیعی (که حاوی مقادیر قابل توجهی از گاز CO₂ می‌باشد) به درون چاه‌ها استفاده می‌شود؛ بنابراین، خوردگی CO₂ خطوط لوله و تجهیزات صنایع نفت و گاز، توجه زیادی را به خود جلب نموده است. اگر بخواهیم به صورت کلی به مکانیزم خوردگی CO₂ نگاه کنیم، باید توجه کنیم که آب همیشه در نفت حضور دارد؛ بنابراین، CO₂ در آب حل می‌شود و اسید بسیار مهاجم H₂CO₃ که حتی از HCl هم در pH یکسان مخرب‌تر است، در فاز آبی تشکیل می‌شود (۷،۸). محیط‌های نمکی حاوی CO₂ محیط‌های بسیار مهاجمی هستند. چون علاوه بر گاز CO₂، حاوی یون کلر نیز می‌باشند. یون کلر که یونی بسیار مهاجم است به سطح فولاد حمله می‌کند و CO₂ فرایند خوردگی را تسریع می‌نماید که به خوردگی شیرین معروف است. عوامل متعددی بر این نوع خوردگی اثرگذار هستند، از قبیل pH، دما، فشار جزئی CO₂، جریان سیال، ترکیب شیمیایی فولاد کربنی، ترکیب شیمیایی محیط نمکی و نسبت‌های گاز به مایع و آب به نفت سیال. در صورتی که این عوامل شرایط مطلوبی برای خوردگی ایجاد نمایند، محصولات خوردگی یک لایه محافظ از رسوب FeCO₃ بر روی سطح فولاد تشکیل می‌دهند. از آنجایی که رسیدن به چنین شرایط مطلوبی به آسانی میسر نیست، استفاده از یک ممانعت کننده کارآمد به منظور حفاظت از سطح فولاد بسیار حائز اهمیت می‌باشد (۳،۷-۱۱).

ترکیبات ایمیدازولینی به دلیل چسبندگی قابل قبول به سطوح فولادی و توانایی تشکیل فیلم روی سطح انتخاب خوبی به عنوان ممانعت کننده خوردگی هستند. باتوجه به پژوهش‌های انجام شده در خصوص سنتز ترکیبات ایمیدازولینی، تا کنون از دی اتیلن تری آمین به همراه یک اسید چرب مانند اولئیک اسید، پالمیک اسید، استئاریک اسید،

لائوریک اسید، میریستیک اسید، نفتیک اسید و ... استفاده شده است (۱۲-۱۷).

ساختار یک مولکول ایمیدازولینی عمدتاً از سه بخش تشکیل شده است، یک سر آب‌دوست که شامل حلقه‌ای حاوی نیتروژن است، یک دنباله هیدروکربنی آب‌گریز و یک گروه آویزه آب‌دوست. قسمت‌های آب‌دوست به مولکول ایمیدازولین کمک می‌کنند که به سطح فولاد متصل شوند، در حالی که دنباله هیدروکربنی آب‌گریز یک لایه بر روی سطح فلز ایجاد می‌نماید. لایه تشکیل شده می‌تواند از حمله آنیون‌های مهاجم جلوگیری کند و سبب کاهش سرعت واکنش‌های الکتروشیمیایی مؤثر در فرایند خوردگی و در نتیجه منجر به کاهش سرعت خوردگی گردد (۱۳،۳).

تأثیر دما و غلظت ممانعت کننده بر رفتار ممانعت‌کنندگی ممانعت کننده‌های بر پایه ایمیدازولین، پیش‌تر توسط پژوهشگران مورد بررسی قرار گرفته است. اکثر این پژوهش‌ها گزارش کردند که کاهش دما و افزایش غلظت ممانعت کننده منجر به افزایش بازدهی ممانعت کننده می‌شود (۱۸،۲۵).

Zahng و همکارانش بر روی بازدهی ممانعت کننده ایمیدازولینی بر روی خوردگی فولاد کربنی در محیط آبی حاوی گاز CO₂ تحقیق کردند. نتایج حاصل از تحقیق این گروه حاکی از افزایش بازدهی ممانعت کننده با افزایش غلظت آن می‌باشد (۲۶).

Desimone و همکارانش نیز که بر روی اثر دما و غلظت بر روی مکانیزم بازدارندگی ممانعت کننده در محیط حاوی CO₂ پژوهش کردند، متوجه تداخل اثر دما و غلظت ممانعت کننده بر سرعت خوردگی و بازدهی ممانعت کننده شدند. آنها گزارش کردند که در غلظت‌های پایین از ممانعت کننده، با افزایش دما بازدهی کاهش می‌یابد که علت این امر را جذب فیزیکی ممانعت کننده روی سطح می‌دانند. در حالی که در غلظت‌های بالا، بازدهی ممانعت کننده تأثیر چندانی از دما نمی‌گیرد که نشان‌دهنده جذب شیمیایی لایه محافظ می‌باشد (۱۹).

در نظر گرفتن هم‌زمان اثر دما و غلظت ممانعت کننده بر روی رفتار ممانعت‌کنندگی ترکیب ایمیدازولینی تولید شده، فرایندی پیچیده است که نیازمند استفاده از روش‌های آماری و تحلیلی جدید و دقیق دارد. طراحی آزمایش‌هایی که باید در این راستا انجام شود به سهولت کار، دقت در تحلیل داده‌ها و کمک به پیدا کردن مقادیر بهینه می‌انجامد. طراحی آزمایش‌ها (Design of Experiments, DOE) یکی از روش‌های بسیار پرطرفدار در فرایندهای بهینه‌سازی است. در روش‌های معمول، برای یافتن مقدار بهینه مطلوب، آزمایش‌های متعددی باید انجام شود تا بتوان پارامترهای متفاوت و تداخل اثر آنها را بررسی و تحلیل نمود. در حالی که امروزه، روش‌های طراحی آزمایش متعددی در روند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش سطح پاسخ (Response Surface Method, RMS) یکی از روش‌های

آنالیز ساختاری ممانعت کننده تولید شده

جهت مطالعه ساختار ماده سنتز شده، آزمون NMR با دستگاه Bruker مدل Advance III، آنالیز FTIR با دستگاه Perkinelmer مدل Spectrum RXI و GC-Mass با استفاده از دستگاه Agilent 7890B G 7955 A MSD انجام شد.

آزمون‌های الکتروشیمیایی

سیال مورد استفاده به‌عنوان محیط خوردنده، محلول 3wt% NaCl انتخاب گردید. این محلول به کمک دمش گاز N₂ اکسیژن‌زدایی شده و سپس با دمش گاز CO₂ از CO₂ گردید. سپس ممانعت کننده تولید شده در غلظت‌های متفاوت (در بخش طراحی آزمایش ذکر شده است) ابتدا به کمک ایزوپروپیل الکل رقیق‌سازی شد و سپس به سِل تزریق گردید.

جهت مطالعه خواص خوردگی بازدارنده تولید شده آزمون‌های الکتروشیمیایی از قبیل پلاریزاسیون تافل و طیف‌سنجی امپدانس AUT 83612 Autolab به کمک دستگاه potentiostat-galvanostat مدل PGstat-302 در محیط NaCl 3% به همراه غلظت‌های متفاوتی از بازدارنده در حضور و بدون حضور پتاسیم یدید (KI) انجام شد. غلظت پتاسیم یدید مورد استفاده ۲۰۰۰ ppm در نظر گرفته شد. این مقدار با توجه به تجارب گزارش شده در سایر مقالات انتخاب شده است (۳،۲۹).

آزمون‌های الکتروشیمیایی بر روی نمونه‌هایی از جنس فولاد ساده کربنی با مساحت سطح به اندازه تقریبی ۱cm² انجام شد. نمونه‌ها پس از سمباده زنی تا گرید ۱۰۰۰ میکرون با ذرات ۰.۳ μm پولیش شدند.

طراحی آزمایش

به‌منظور بررسی هدمندتر پارامترهای عملیاتی از قبیل غلظت بازدارنده و دمای محیط و اثر همزمان آن‌ها بر رفتار خوردگی بازدارنده تولید شده و همچنین بهینه‌سازی پارامترها، از روش طراحی آزمایش (DOE) به کمک نرم‌افزار Design Expert 10.0.7 بهره گرفته شد. در این طراحی از روش Response surface و مدل‌سازی central composite استفاده شده است.

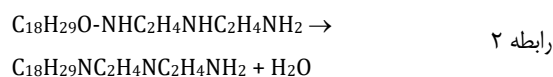
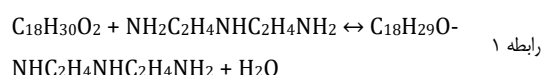
بازه دمایی پیشنهادی به نرم‌افزار ۲۵°C تا ۵۰°C و میزان غلظت پیشنهادی به نرم‌افزار ۲۵ ppm تا ۱۰۰ ppm در نظر گرفته شد. آزمون‌های الکتروشیمیایی بر اساس آزمون‌های طراحی شده توسط Design Expert 10.0.7 انجام شد. نتایج مستخرج شده از آزمون پلاریزاسیون تافل و EIS به‌صورت سرعت خوردگی و مقاومت به پلاریزاسیون مجدداً در نرم‌افزار Design Expert به عنوان Response وارد شدند. جهت حصول اطمینان از دقیق بودن مدل‌سازی صورت پذیرفته، داده‌های پیش‌بینی شده توسط مدل با

آنالیز آماری است که در این پژوهش به کمک نرم‌افزار Design Expert مورد استفاده قرار گرفته است. این روش در موارد متعددی کاربرد دارد و سابقاً توسط پژوهشگران مختلف مورد استفاده قرار گرفته است (۲۷).

در این پژوهش سعی بر آن شده است که پس از سنتز کردن یک ترکیب ایمیدازولینی و استفاده از آن به‌عنوان ممانعت کننده در یک سیستم حاوی گاز CO₂، تداخل اثر دما و غلظت ممانعت کننده بر روی بازدهی ممانعت کننده مورد بحث و بررسی قرار گیرد. اثربخشی همزمان دما و غلظت ممانعت کننده موضوعی بسیار پر اهمیت می‌باشد که مقاله‌های کمتری از این منظر به بررسی اثر پارامترهای محیطی بر بازدهی ممانعت کننده‌ها پرداخته اند. حال آنکه، در این مقاله، در کنار مطالعه اثر تغییرات دو پارامتر دما و غلظت بر بازدهی ممانعت کننده به صورت مجزاء، اثرگذاری یک پارامتر بر پارامتر دیگر و همچنین اثر همزمان هر دو پارامتر بر سرعت خوردگی و مقاومت به پلاریزاسیون مورد بررسی قرار گرفته است و نقطه‌ای بهینه متشکل از دما و غلظت ممانعت کننده که در آن کمترین سرعت خوردگی و بیشترین مقاومت به پلاریزاسیون رخ می‌دهد، مشخص شده است. با توجه به پیچیده بودن طراحی چنین آزمایشی و همچنین به دلیل افزایش دقت بررسی، از نرم افزار Design Expert جهت طراحی آزمایشات و یافتن نقطه بهینه کمک گرفته شد.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، برای سنتز ایمیدازولین، در یک بالون مجهز به dean-stark دی اتیلن تری آمین (DETA) به‌صورت قطره‌قطره با نسبت مولی ۱:۱ در دمای ۷۰°C به اولئیک اسید اضافه شد. سپس مخلوط تا دمای ۱۷۵°C حرارت‌دهی و در این دما (۱۸۵°C-۱۶۵°C) به مدت ۱ ساعت نگاه‌داشته شد. هنگامی که دما به ۱۶۵°C رسید، جهت خروج آب، پمپ خلأ روشن شد که به خروج آب و برخی هیدروکربن‌های اضافی از ترکیب منجر شد. آب جمع‌آوری شده از این فرایند (آب به تله افتاده) نشان می‌دهد که مرحله تشکیل آمید کاملاً انجام شده است (رابطه ۱). در ادامه، به منظور تکمیل فرایند تولید ایمیدازولین، حرارت‌دهی ترکیب تا دمای ۲۴۰°C-۲۲۵°C ادامه یافت و مجدداً مقداری آب به‌وسیله پمپ خلأ از سیستم خارج گردید (رابطه ۲). ترکیب زرد رنگ تولید شده، که در اثر افزایش دما به تدریج به رنگ قهوه ای تیره در آمد، به مدت ۲ ساعت در این دما نگه داری شد (۱۲،۱۷،۲۵،۲۸).



پیش‌بینی درستی انجام می‌دهد و در مواردی خاص نیز اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر واقعی چندان قابل توجه نیست.

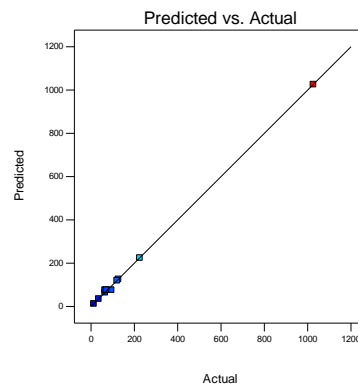
داده‌های واقعی در نمودار Predict vs. Actual که از نرم افزار استخراج می‌شود، مقایسه می‌گردند. این نمودار در شکل ۱ آورده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، داده‌های پیش‌بینی و مدل شده حول محور $X=Y$ قرار گرفته‌اند.

این مطلب تاییدی بر مناسب بودن مدل‌سازی انجام شده می‌باشد. با توجه به آنالیزهای آماری انجام شده این مدل در ۸۰ درصد موارد

جدول ۱- تحلیل واریانس مدل سازی انجام شده توسط نرم افزار Design Expert

| Analysis of variance (ANOVA) | | | |
|------------------------------|--------|----------------|--------|
| Standard Deviation | 15.89 | R-Squared | 0.9992 |
| Mean | 111.29 | Adj R-Squared | 0.9951 |
| C.V.% | 14.28 | Pred R-Squared | N/A |
| Press | N/A | Adeq Precision | 69.944 |
| -2 Log Likelihood | 123.95 | BIC | 171.06 |
| | | AICc | 427.95 |

Design-Expert® Software
Corrosion Rate
Color points by value of
Corrosion Rate:
1026
12.6



شکل ۱- مقایسه داده‌های واقعی و مدل‌سازی شده برای پارامتر سرعت خوردگی
جدول ۲- پیوندهای مشخص شده در نتیجه آزمون FT-IR ترکیب تولید شده

| FTIR band (cm ⁻¹) | Function Group |
|-------------------------------|--|
| 1280.94 | CH ₃ (C-H bending symmetrical) |
| 1458.57 | CH ₂ (C-H bending asymmetrical) |
| 1607.89 | C=N |
| 2854.27 | C-H symmetrical stretch |
| 2924.57 | C-H asymmetrical stretch |
| 3292.3 | N-H stretching vibration |

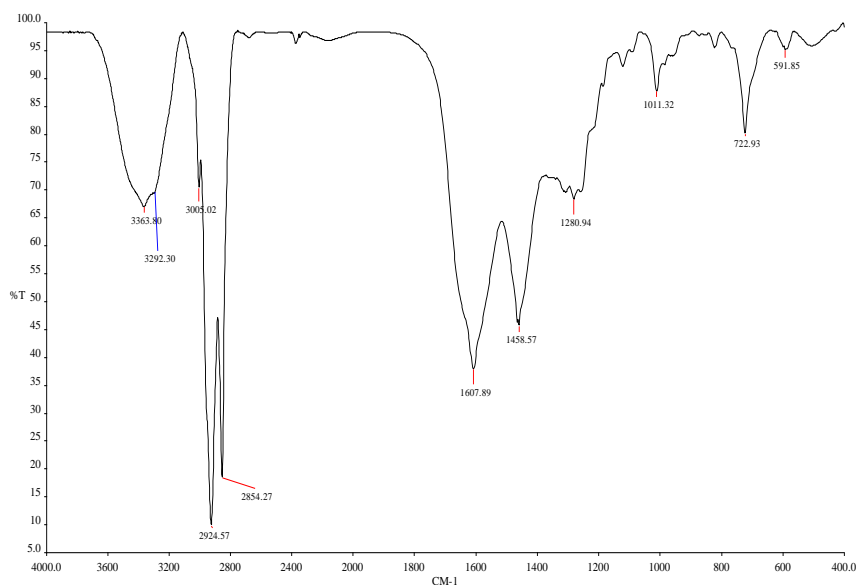
نتایج و بحث

آنالیز FTIR

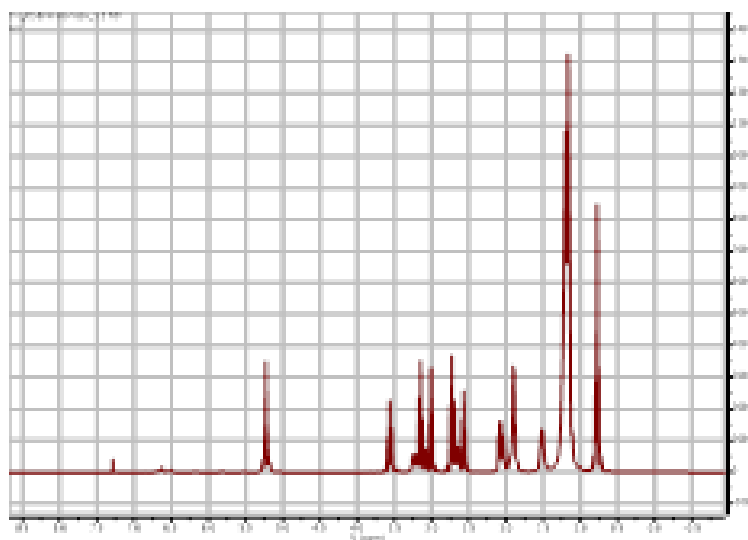
طیف FTIR مربوط به ترکیب تولید شده حاوی پیک‌های متفاوتی است و نشان‌دهنده انرژی پیوندهای مختلف می‌باشد که در شکل ۲ و جدول ۲ آمده است. با مقایسه این پیک‌ها با نتایج گزارش شده در سایر پژوهش‌ها مشخص شد که همه پیک‌های درج شده در این جدول نشان‌دهنده پیوندهای موجود در ساختار ایمیدازولین هستند (۲۸). مشخصه اصلی مولکول ایمیدازولین پیوند C=N است که با پیک 1607 cm^{-1} همخوانی دارد.

آنالیز HNMR

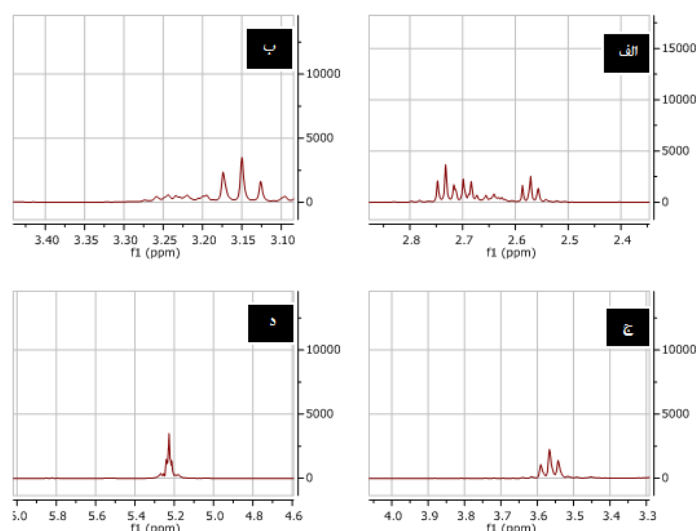
جهت بررسی دقیق‌تر ساختار ماده ممانعت کننده سنتز شده، آزمون HNMR نیز انجام شد که نتایج مربوطه در شکل ۳ آورده شده است. حلال مورد استفاده جهت انجام آزمون NMR کلروفرم است که پیک در $29/7\text{ ppm}$ در شکل ۳ را ایجاد نموده است. پیک‌های قابل مشاهده در این نمودار به صورت مجزا در شکل ۴ آورده شده است. با نگاهی دقیق به پیوندهای موجود در ساختار ایمیدازولین متوجه می‌شویم که پیک‌های نمایش داده شده در شکل ۴ با پیوندهای ساختار ایمیدازولین (که در شکل ۵ به صورت مجزا نمایش داده شده است) مطابقت دارد (۲۸).



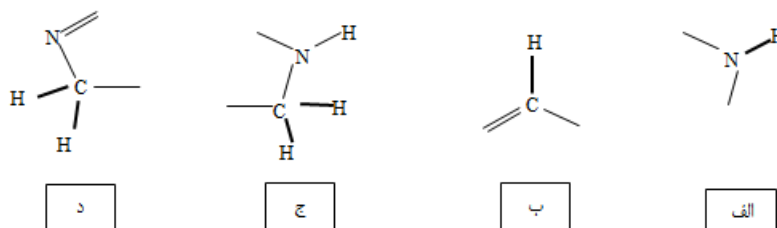
شکل ۲- نتیجه آزمون FT-IR



شکل ۳- نمودار حاصل از آنالیز HNMR



شکل ۴- نمایش پیک‌های بزرگنمایی شده آزمون HNMR (الف) پیک (ب ۲,۷۳ ppm، ج ۳,۱۵ ppm، د ۳,۵۶ ppm، ۵,۲۲ ppm)



شکل ۵-نمایش پیوندهای متفاوت موجود در ساختار ایمیدازولین

به افزوده شدن مولکول‌های بیشتری از ممانعت کننده به لایه حفاظتی تشکیل شده می‌شود که هم ضخامت این لایه را افزایش می‌دهد و هم عیوب و تخلخل‌های این لایه را می‌پوشاند. از طرفی دیگر، در دمای 250C، به دلیل پایین بودن دما، جذب سطحی مولکول‌های ممانعت کننده به سطح فلز خیلی زیاد نیست. لذا افزایش بیش از اندازه ضخامت لایه حفاظتی (به علت افزایش غلظت ممانعت کننده) منجر به ناپایدار شدن این لایه و در نتیجه تخریب آن می‌گردد. بنابراین، سرعت خوردگی از غلظت ۶۲,۵ ppm به بعد افزایش می‌یابد. با این وجود، با یک دید کلی به منحنی مشکی رنگ شکل ۶ مشاهده می‌شود که این منحنی علی‌رغم وجود تغییراتی در شیب آن، نقاط ابتدایی و انتهایی نمودار تفاوت قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر ندارند. به عبارتی دیگر در دمای پایین، تغییرات غلظت ممانعت کننده نقش زیادی در تغییر سرعت خوردگی ایفا نمی‌نماید. در واقع این منحنی رقابت دما و غلظت بر سر افزایش سرعت خوردگی را نشان می‌دهد. افزایش دما تمایل دارد تا سرعت خوردگی را بیشتر کند، درحالی که افزایش غلظت ممانعت کننده (در شرایطی که تشکیل لایه ممانعت کننده ضخیم‌تر فراهم باشد) میل به کاهش سرعت خوردگی دارد. همانطور که مشاهده می‌شود، در دمای ۵۰C، از غلظت ۲۵ ppm تا ۷۵ ppm شیب منحنی سرعت خوردگی دما صعودی است. این امر نشان می‌دهد که در این بازه از نمودار، اثر دما برنده این رقابت است. درحالی که، با افزودن مقادیر بیشتری از ممانعت کننده، لایه محافظتی

نتایج آزمون‌های الکتروشیمیایی

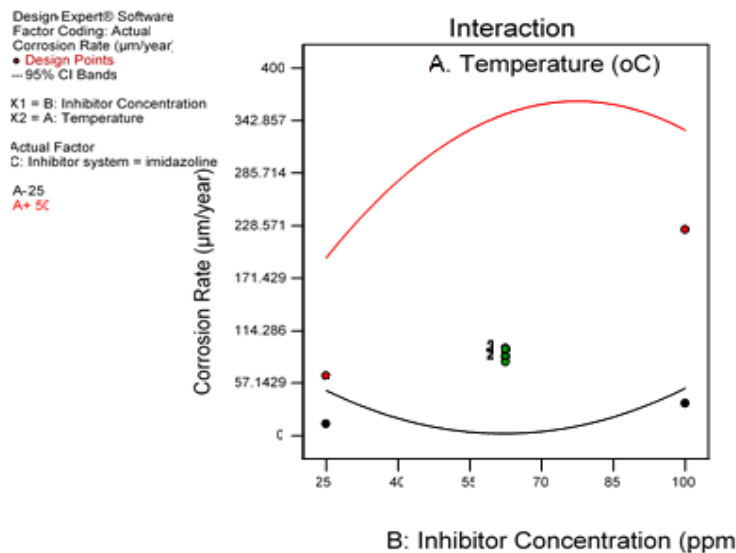
مقادیر مربوط به سرعت خوردگی و مقاومت به پلاریزاسیون از برون یابی منحنی‌های تافل به دست آمده و در محیط نرم‌افزار DOE وارد شدند. به کمک این نرم‌افزار منحنی‌های مختلف از جمله منحنی‌های سرعت خوردگی/ دما، سرعت خوردگی/ غلظت ممانعت کننده و منحنی سه‌بعدی اثر هم‌زمان دما و غلظت ممانعت کننده بر سرعت خوردگی رسم شد. مقایسه نتایج الکتروشیمیایی بیان می‌کند که مقادیر مربوط به سرعت خوردگی در هر غلظتی از ممانعت کننده و در دماهای مختلف همیشه بیشتر از مقادیر بدون ممانعت کننده می‌باشد. این مطلب نشان می‌دهد که ترکیب تولید شده خواص ممانعت‌کنندگی دارد. افزودن تنها ۲۵ ppm از ممانعت کننده تولید شده موفق به افزایش بازدهی ممانعت‌کنندگی از خوردگی به میزان ۹۹٪ شده است. اگرچه بررسی اثربخشی غلظت ممانعت کننده و دما بر بازدهی ممانعت کننده نیازمند بررسی دقیق‌تر تداخل اثر هم‌زمان هر دو پارامتر می‌باشد که در ادامه مورد بحث قرار گرفته است.

استنباط می‌شود که در دمای پایین که سرعت خوردگی کم است، افزایش غلظت ممانعت کننده منجر به کاهش سرعت خوردگی می‌شود. این امر می‌تواند به این علت باشد که افزایش غلظت منجر

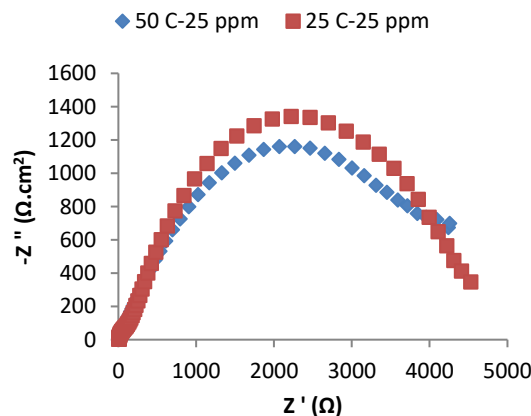
می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، افزایش دما دو تأثیر متفاوت بر منحنی نایکوئست دارد. با افزایش دما ارتفاع منحنی کاهش و قطر منحنی افزایش می‌یابد. بر اساس مدار الکتریکی معادل سازی شده با داده‌های حاصل از آزمون EIS، ارتفاع منحنی نایکوئست نشان‌دهنده ظرفیت خازن معادل سازی شده می‌باشد. خازن در مدار شبیه سازی شده، معادل لایه محافظ می‌باشد. بر اساس رابطه ۳، افزایش ضخامت لایه محافظ، ظرفیت خازن کاهش می‌یابد. قطر منحنی نایکوئست، Rp، نشان‌دهنده مقاومت پلاریزاسیون است. افزایش Rp با قوی‌تر شدن چسبندگی لایه محافظ به سطح و در نتیجه مقاومت بیشتر روی سطح فلز نسبت به پلاریزه شدن یونها ارتباط دارد.

$$C = K \frac{A}{d} \quad \text{رابطه ۳}$$

تشکیل شده بر روی سطح بالاخره موفق می‌شود که به ضخامت مورد نیاز برای حفاظت از سطح فولادی برسد و در واقع اثر افزایش دما را خنثی نماید و منجر به کاهش سرعت خوردگی گردد. در توضیح این روند، ذکر این نکته ضروری است که دمای بالا باعث تقویت چسبندگی فیزیکی مولکول‌های ممانعت کننده به سطح می‌شود؛ بنابراین، برای لایه محافظتی تشکیل شده این امکان فراهم می‌شود که به ضخامت مورد نیاز برسد و همچنین احتمال ناپایداری و فروپاشی آن کاسته می‌شود. به این ترتیب، در دماهای بالا، لایه محافظتی حتی در غلظت‌های بالاتر نیز پایدار است و در غلظت یکسان از ممانعت کننده، لایه محافظتی تشکیل شده، ضخامت بیشتری در دماهای بالاتر دارد. لیکن با این وجود، در دمای بالا، اثر افزایش دما در این رقابت پیروز می‌شود و نهایتاً سرعت خوردگی افزایش می‌یابد. شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب نشان‌دهنده منحنی‌های EIS و پلاریزاسیون تافل برای خوردگی نمونه فولادی آزمایش شده در دماهای ۲۵°C و ۵۰°C و غلظت ۲۵ ppm از ممانعت کننده

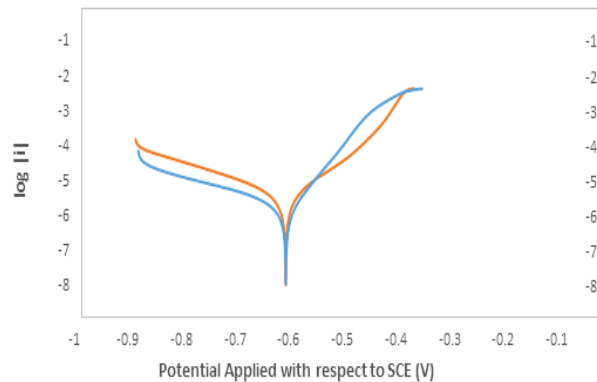


شکل ۶- منحنی سرعت خوردگی بر حسب غلظت ممانعت کننده در ۲۵°C (منحنی مشکی رنگ) و ۵۰°C (منحنی قرمز رنگ) مستخرج از نرم‌افزار Design Experts



شکل ۷- منحنی نایکوئست آنالیز EIS برای نمونه آزمایش شده در غلظت ۲۵ ppm و دمای ۲۵°C و ۵۰°C

مقایسه منحنی تافل در دو دمای متفاوت و غلظت 25ppm

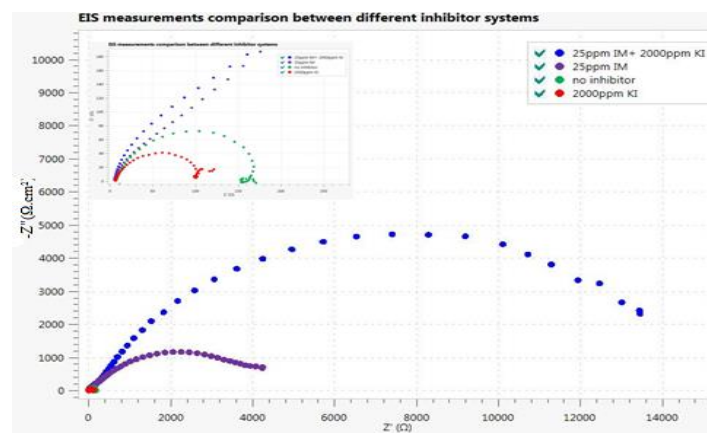


شکل ۸- منحنی‌های تافل برای نمونه آزمایش شده در غلظت 25ppm و دمای 25°C و 50°C

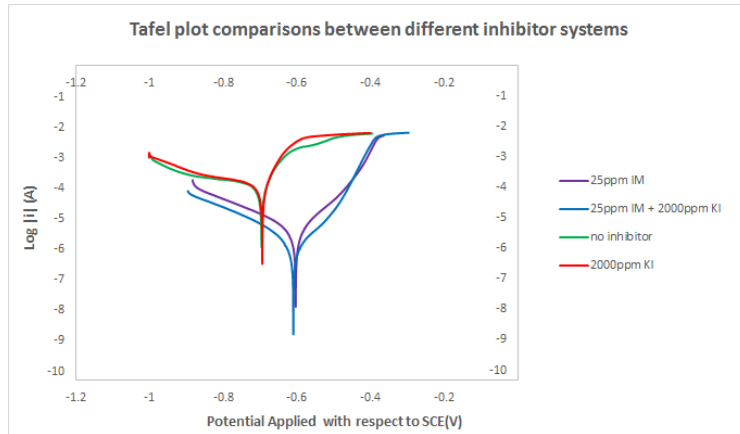
بررسی اثر تزایدی افزودن پتاسیم یدید به ممانعت کننده

در اثر افزودن KI به ترکیب ممانعت کننده، سرعت خوردگی کاهش و مقاومت به خوردگی افزایش یافت. شکل ۹ و شکل ۱۰ به ترتیب مقایسه آنالیز EIS و نمودار تافل مربوط به اثر KI را نشان می‌دهند. به وضوح مشخص است که مقاومت به خوردگی در حضور KI به شدت افزایش یافته است و می‌توان ادعا کرد که ممانعت کننده ایمیدازولینی تولید شده و KI اثر هم‌افزایی دارند و نه تنها اثر یکدیگر را در کاهش سرعت خوردگی خنثی نمی‌نمایند، بلکه یکدیگر را تقویت می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزودن KI به ممانعت کننده ایمیدازولینی سنتز شده، ارتفاع نمودار (Rp) شدیداً افزایش می‌یابد. این در حالی است که، استفاده از KI به تنهایی خاصیت ممانعت‌کنندگی ندارد.

نکته مهم در بررسی‌های خوردگی و بازدارنده‌ها با روش امپدانس این است که در این روش سرعت خوردگی نسبت به سایر روش‌ها همچون پلاریزاسیون تافل، ممکن است اندکی تفاوت داشته باشد زیرا در روش‌های دیگر خطاهای اندازه‌گیری بیشتر است. در واقع نتایج حاصل از امپدانس واقع‌گرایانه‌تر است زیرا در این روش ولتاژ خارجی بسیار کمتری به سطح فلز اعمال می‌شود و سیستم الکتروشیمیایی کمتر از حالت تعادل خارج می‌شود. همچنین در روش پلاریزاسیون به دلیل ماهیت لگاریتمی بودن جریان، خطای تشخیص و برون‌یابی قسمت‌های خطی نمودار تافل بسیار بالاست. اما این تفاوت‌ها روند کلی و تأثیر پارامترها بر مقاومت به خوردگی را چندان تحت‌تأثیر قرار نمی‌دهند. به همین سبب نتایج امپدانس و پلاریزاسیون این تحقیق نیز مکمل یکدیگر هستند و هر یک تأییدکننده نتایج دیگری است اگرچه به لحاظ کمی ممکن است اندکی تفاوت داشته باشند که آن هم به دلیل تفاوت در ماهیت روش و نحوه تشخیص سرعت خوردگی است.



شکل ۹- تأثیر افزودن ممانعت کننده و پتاسیم یدید بر منحنی نایکوئیست حاصل از آزمون امپدانس در دمای 50°C (فرکانس‌های بالا در تصویر بزرگنمایی شده است)



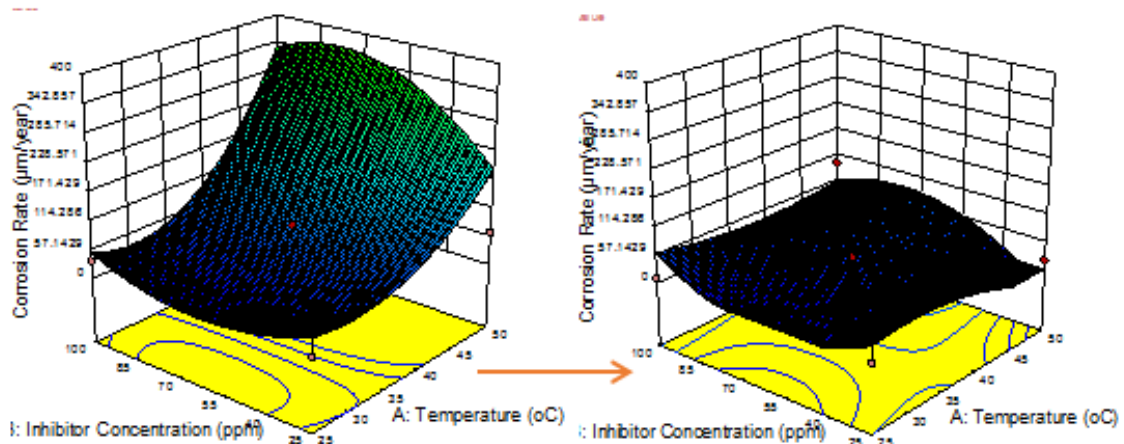
شکل ۱۰- تأثیر افزودن ممانعت کننده و پتاسیم یدید بر منحنی تافل در دمای ۵۰°C

نیست؛ بنابراین تهیه ممانعت کننده‌ای که لااقل در این بازه دمایی تغییرات رفتاری زیادی نداشته باشد و همچنین غلظت آن تغییر شگرفی در سرعت خوردگی ایجاد ننماید امری بسیار مثر محسوب خواهد شد. غلظت ممانعت کننده نیز وابسته به پارامترهایی همچون خطای محاسبات و عملکرد اپراتور و ... است که کاهش این خطاها بسیار حائز اهمیت خواهد بود.

این اتفاق یافته‌ای بسیار ارزشمند محسوب می‌شود زیرا همیشه تلاش از آنجایی که تأثیرات اندک دما و غلظت ممانعت کننده بر روی سرعت خوردگی کمتر از ۵۰ mml در سال است و این تفاوت می‌تواند ناشی از خطاهای محاسباتی باشد تحلیل خاصی بر روی داده‌های حاصل از این قسمت نمی‌توان داشت و تنها نکته قابل توجه و مهم این است که یدید پتاسیم به‌خوبی توانسته تأثیر تمام پارامترهای مؤثر را حذف کند و یک ممانعت کننده جدید و موفق در کاهش سرعت خوردگی ایجاد نماید.

برای درک بیشتر تأثیر KI، نمودارهای ۳ بعدی اثرات غلظت ممانعت کننده و دما بر روی سرعت خوردگی در دو حالت حضور و عدم حضور دومین ممانعت کننده در شکل ۱۱ آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود پس از افزودن ممانعت کننده دوم یا همان یدید پتاسیم سرعت خوردگی در تمام دماها و غلظت‌ها به شدت کاهش پیدا کرده است. این مطلب می‌تواند به دلیل اثر تزائیدی این دو ممانعت کننده بر روی یکدیگر باشد. در واقع تأثیر افزودن ممانعت کننده دوم به قدری زیاد بوده که نقش دیگر پارامترها همچون دما و غلظت ممانعت کننده بسیار اندک شده است. به همین دلیل تقریباً یک سرعت خوردگی ثابت در تمام دماها و غلظت‌های مختلف به دست آمده است.

برای جلوگیری از نوسانات و تغییر در رفتار ممانعت کننده‌ها امری مفید تلقی شده است. در صنعت نفت و گاز و به‌ویژه در مورد خطوط لوله‌ای که در طبیعت کار گذاشته شده‌اند، تغییرات دما در بازه ۲۵۰C تا ۶۰۰C امری بدیهی است و خارج از اختیار انسان است. تنها با عایق‌کاری خطوط لوله می‌توان از این نوسانات دمایی جلوگیری کرد که مسلماً چنین کاری برای تمام خطوط لوله موجود امکان‌پذیر



شکل ۱۱- تأثیر افزودن ممانعت کننده یدید پتاسیم به ایمیدوزالین بر سرعت خوردگی

بررسی ایزوترم جذب ممانعت کننده سنتز شده بر روی سطح

مولکول‌های ممانعت کننده بر روی سطح فلز جذب می‌شوند و با ایجاد یک لایه روی سطح از ورود یون‌های مهاجم جلوگیری می‌کنند. ایزوترم‌های جذب این امکان را فراهم می‌کنند که نحوه جذب و برهم‌کنش مولکول ممانعت کننده و سطح فلز را بررسی نماییم. ایزوترم جذب لانگمویر نیز به توضیح رابطه بین مولکول‌های ممانعت کننده و سطح فلزی می‌پردازد. این مدل بیان می‌کند که مولکول‌های ممانعت کننده به صورت تک‌لایه بر روی نقاط مشخصی از سطح فلزی جذب می‌شوند و از رابطه ۴ تبعیت می‌کند. در این معادله، K ثابت تعادل واکنش جذب و دفع، θ میزان پوشاندگی سطح با مولکول‌های ممانعت کننده و C غلظت ممانعت کننده را بیان می‌نماید (۳۰).

باتوجه به رابطه ۴، جهت مطابقت جذب سطحی یک ممانعت کننده خاص با مدل ارائه شده در ایزوترم جذب لانگمویر، نمودار C/θ بر حسب C ترسیم می‌شود. چنانچه شیب این نمودار برابر با یک باشد، مطابقت جذب سطحی ممانعت کننده با مدل لانگمویر محرز می‌گردد (۳۱-۳۳).

$$\text{رابطه ۴} \quad \frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C$$

باتوجه به اینکه ثابت تعادل K تابعی از دماست، همه داده‌های مورد استفاده برای رسم نمودار C/θ بر حسب C باید در دمای یکسانی

باشد. نمودار شکل ۱۲ برای داده‌های پژوهش حاضر در دمای 25°C که دمای بهینه می‌باشد، ترسیم شده است. همان‌طور که مشخص است شیب نمودار رسم شده تقریباً برابر یک بوده و می‌توان ادعا کرد که جذب سطحی ممانعت کننده سنتز شده در پژوهش حاضر مطابقت خوبی با مدل ارائه شده در ایزوترم جذب لانگمویر دارد.

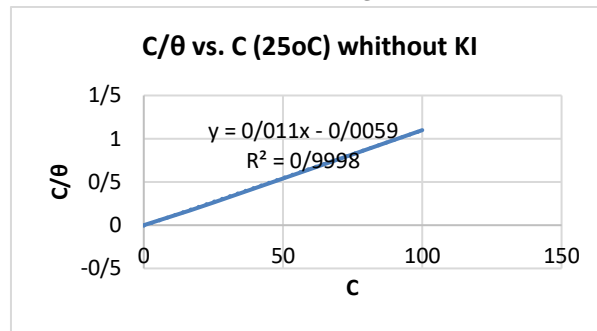
با توجه به موارد فوق، می‌توان ادعا کرد که هر نقطه در سطح فلزی قادر به جذب یک مولکول جذب می‌باشد. در واقع یک مولکول آب جذب شده بر روی سطح، جای خود را به یک مولکول آلی می‌دهد و به این ترتیب مولکول‌های ممانعت کننده بر روی سطح فلز جذب می‌شوند. در چنین مدلی، فرض بر این است که مولکول‌های جذب شده بر روی سطح با یکدیگر برهم‌کنشی ندارند (۳۳).

معادله بین C/θ و C به کمک نمودار شکل ۱۲ به صورت زیر نوشته می‌شود:

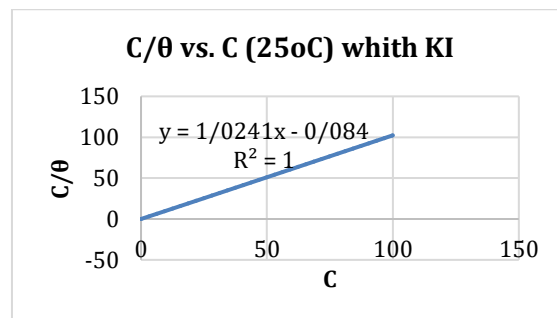
$$\text{رابطه ۵} \quad \frac{C}{\theta} = 1.1163C + 0.2929$$

باتوجه به رابطه ۵ مقدار 0.2929 برابر با معکوس ثابت تعادل می‌باشد و به این ترتیب ثابت تعادل واکنش جذب-دفع مولکول‌های ممانعت کننده بر روی سطح فولاد برابر با $3/41$ خواهد بود.

افزودن ۲۰۰۰ ppm KI به ممانعت کننده، منجر به تغییر بازدهی ممانعت کننده و در نتیجه مقدار θ می‌گردد. به این ترتیب نمودار C/θ بر حسب C برای سیستم حاوی پتاسیم یدید مطابق شکل ۱۳ خواهد بود. همان‌طور که مشخص است مکانیزم جذب همچنان از ایزوترم لانگمویر تبعیت می‌کند و افزودن ۲۰۰۰ ppm KI به ممانعت کننده منجر به تغییر ایزوترم جذب نشده است.



شکل ۱۲- نمودار C/θ بر حسب C برای داده‌های خوردگی در دمای 25°C جهت بررسی ایزوترم جذب ممانعت کننده



شکل ۱۳- نمودار C/θ بر حسب C برای داده‌های خوردگی در حضور KI و در دمای 25°C جهت بررسی ایزوترم جذب ممانعت کننده

اثربخیزی بازدهی از پارامترهای محیطی و عملیاتی (دما و غلظت ممانعت کننده) می‌گردد.

• به کمک نرم‌افزار DOE نقطه بهینه (بیشترین مقاومت به خوردگی و کمترین سرعت خوردگی) پیش‌بینی شد. این شرایط در دمای ۲۵°C و با ۷/۳۷ ppm KI از ممانعت کننده تولید شده به همراه ۲۰۰۰ ppm KI می‌باشد. سرعت خوردگی تخمین زده شده در این شرایط ۶ μm/year و مقاومت خوردگی ۳۰۷۸۸ Ω می‌باشد.

• باتوجه به بهینه‌سازی نتایج حاصل از آزمون تافل به کمک نرم‌افزار DOE مشخص می‌شود که ممانعت کننده ایمیدازولینی تولید شده عملکرد مناسبی در دمای پایین و غلظتی تقریباً برابر با ۳۷ ppm KI دارد. همچنین مشخص شده است که این ماده عملکرد ممانعت‌کنندگی مطلوبی در دمای بالا از خود نشان نمی‌دهد؛ بنابراین، استفاده از آن به‌عنوان ممانعت کننده در دمای بالا توصیه نمی‌گردد. البته در صورت افزودن یدید پتاسیم این حساسیت به دما و غلظت کاهش می‌یابد و به‌طور کلی نتایج بهتری حاصل خواهد شد.

ملاحظات اخلاقی پیروی از اصول اخلاق پژوهش

همکاری مشارکت‌کنندگان در تحقیق حاضر به صورت داوطلبانه و با رضایت آنان بوده است.

حامی مالی

هزینه تحقیق حاضر توسط نویسندگان مقاله تامین شده است.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، مقاله حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع بوده است.

بهینه‌سازی داده‌های آزمون تافل به کمک نرم‌افزار

DOE

با استفاده از نرم‌افزار DOE داده‌های مربوط به مقاومت پلاریزاسیون و سرعت خوردگی بهینه‌سازی شدند. برای این منظور، بیشترین مقدار مربوط به مقاومت و کمترین سرعت خوردگی به‌عنوان اهداف بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفتند. نقطه بهینه شده در 25°C و ۱۰۰ ppm KI قرار دارد و سرعت خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون آن به همراه میزان desirability در جدول زیر (جدول ۳) آورده شده است.

جدول ۳- بهینه‌سازی داده‌های آزمون تافل به کمک

نرم‌افزار DOE

| Temperature | Inhibitor concentration | Inhibitor System | Corrosion rate | Polarization resistance | Desirability |
|-------------|-------------------------|------------------|----------------------|-------------------------|--------------|
| 25°C | 100 ppm | Imidazoline+KI | 8.82 2 μm/year | 35339 | 1.000 |

نتیجه‌گیری

• افزایش غلظت ممانعت کننده و دما بر روی سرعت خوردگی و بازدهی ممانعت کننده اثرگذار هستند و بر سر تغییر این پارامترها با یکدیگر رقابت می‌کنند. با بررسی شیب تغییرات سرعت خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون با تغییر دما و غلظت ممانعت کننده، به‌طور کلی می‌توان ادعا کرد که بالا رفتن دما بر روی سرعت خوردگی بیشتر از افزایش غلظت ممانعت کننده اثرگذار می‌باشد.

• افزودن ۲۰۰۰ ppm KI به ممانعت کننده سنتز شده، منجر به افزایش بازدهی ممانعت کننده می‌گردد. همچنین منجر به کاهش

References

- Koch, G., Cost of corrosion, in Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies, A.M. El-Sherik, Editor. 2017, Woodhead Publishing: Boston. p. 3-30.
- Ding, Y., et al., Effect of Temperature on Adsorption Behavior and Corrosion Inhibition Performance of Imidazoline-Type Inhibitor. CORROSION 2017, 2017. All Days.
- Heydari, M. and M. Javidi, Corrosion inhibition and adsorption behaviour of an amido-imidazoline derivative on API 5L X52 steel in CO₂-saturated solution and synergistic effect of iodide ions. Corrosion Science, 2012. 61: p. 148-155.
- Jawich, M.W.S., G.A. Oweimreen, and S.A. Ali, Heptadecyl-tailed mono- and bis-imidazolines: A study of the newly synthesized compounds on the inhibition of mild steel corrosion in a carbon dioxide-saturated saline medium. Corrosion Science, 2012. 65: p. 104-112.
- Zhang, X., et al., Study of the inhibition mechanism of imidazoline amide on CO₂ corrosion of Armco iron. Corrosion Science, 2001. 43(8): p. 1417-1431.
- م. جاویدی، مطالعه الکتروشیمیایی and حیدری، م. CO₂ بازدارندگی یکی از مشتقات ایمیدازولین بر خوردگی فولاد کربنی ساده و اثر یونهای ید بر عملکرد آن. فصلنامه (علمی - پژوهشی مواد نوین، ۲۰۱۱، ۲): p. 71-84.
- Farelas, F. and A. Ramirez, Carbon Dioxide Corrosion Inhibition of Carbon Steels Through Bis-imidazoline and Imidazoline Compounds Studied by EIS International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE, 2010. 5: p. 797 - 814.
- Ikeda, A., S. Mukai, and M. Ueda, Corrosion Behavior of 9 to 25% Cr Steels in Wet CO₂ Environments. Corrosion, 1985. 41(4): p. 185-192.
- Bentiss, F., M. Traisnel, and M. Lagrenee, Influence of 2,5-bis(4-dimethylaminophenyl)-1,3,4-thiadiazole on corrosion inhibition of mild steel in acidic media. Journal of Applied Electrochemistry, 2001. 31(1): p. 41-48.
- Okafor, P.C., et al., Inhibition of CO₂ corrosion of N80 carbon steel by carboxylic quaternary imidazoline and halide ions additives. Journal of Applied Electrochemistry, 2009. 39(12): p. 2535-2543.
- Zheng, X., et al., Experimental and theoretical studies of two imidazolium-based ionic liquids as inhibitors for mild steel in sulfuric acid solution. Corrosion Science, 2015. 95: p. 168-179.
- Abbasov, V.M., et al., Synthesis of imidazoline derivatives on the basis of triethylenetetramine and naphthenic acids and research of imidazoline derivatives as corrosion inhibitor. 2015. 5: p. 21-23.
- Bajpai, D. and V.K. Tyagi, Fatty Imidazolines: Chemistry, Synthesis, Properties and Their Industrial Applications. Journal of Oleo Science, 2006. 55(7): p. 319-329.
- Cruz, J., Martínez-Aguilera, L. M. R., Salcedo, R., Castro, M., Reactivity properties of derivatives of 2-imidazoline: an ab initio DFT study. International Journal of Quantum Chemistry, 2001. 85(4-5): p. 546-556.
- Ramachandran Sunder, T.B.-L., et al., Self-Assembled Monolayer Mechanism for Corrosion Inhibition of Iron by Imidazolines. Langmuir, 1996. 12(26): p. 6419-6428.
- Wang, D.L., S. Ying, Y. Wang, M. Xiao, H. Chen, Z., Theoretical and experimental studies of structure and inhibition efficiency

- of imidazoline derivatives. *Corrosion Science*, 1999. 41(10): p. 1911-1919.
17. TYAGI, D.B.a.V.K., Fatty Imidazolines: Chemistry, Synthesis, Properties and Their Industrial Applications. *JOURNAL OF OLEO SCIENCE*, 2006. 55(7): p. 319-329.
18. Bhatti, M.S., et al., RSM and ANN modeling for electrocoagulation of copper from simulated wastewater: Multi objective optimization using genetic algorithm approach. *Desalination*, 2011. 274(1): p. 74-80.
19. Desimone, M.P., et al., Amphiphilic amido-amine as an effective corrosion inhibitor for mild steel exposed to CO₂ saturated solution: Polarization, EIS and PM-IRRAS studies. *Electrochimica Acta*, 2011. 56(8): p. 2990-2998.
20. He, X., et al., Inhibition properties and adsorption behavior of imidazole and 2-phenyl-2-imidazoline on AA5052 in 1.0M HCl solution. *Corrosion Science*, 2014. 83: p. 124-136.
21. Jo, M.-S., et al., An analysis of synergistic and antagonistic behavior during BTEX removal in batch system using response surface methodology. *Journal of Hazardous Materials*, 2008. 152(3): p. 1276-1284.
22. Okafor, P.C., X. Liu, and Y.G. Zheng, Corrosion inhibition of mild steel by ethylamino imidazoline derivative in CO₂-saturated solution. *Corrosion Science*, 2009. 51(4): p. 761-768.
23. Pan, C., J. Mao, and W. Jin, Effect of Imidazoline Inhibitor on the Rehabilitation of Reinforced Concrete with Electromigration Method. *Materials*, 2020. 13: p. 398.
24. Ravikumar, K., et al., Optimization of batch process parameters using response surface methodology for dye removal by a novel adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 2005. 105(3): p. 131-138.
25. Tyagi, R., V.K. Tyagi, and S.K. Pandey, Imidazoline and Its Derivatives: An Overview. *Journal of oleo science*, 2007. 56: p. 211-22.
26. Buchanan, R.A. and E.E. Stansbury, Electrochemical Corrosion. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 2005: p. 81-103.
27. Imanieh, I., et al., Experiments design for hardness optimization of the Ni-Cr alloy electrodeposited by pulse plating. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2013. 26(5): p. 558-564.
28. Divya, B. and T.V. K., Synthesis and characterization of imidazolium surfactants derived from tallow fatty acids and diethylenetriamine. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2008. 110(10): p. 935-940.
29. Okafor, P., et al., Inhibition of CO₂ corrosion of N80 carbon steel by carboxylic Quaternary imidazoline and halide ions additives. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2009. 39: p. 2535-2543.
30. Umoren, S., U. Eduok, and E. Oguzie, Corrosion Inhibition of Mild Steel in 1 M H₂SO₄ by Polyvinyl Pyrrolidone and Synergistic Iodide Additives. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 2007. 26: p. 533-546.
31. Ituen, E., O. Akaranta, and A. James, Evaluation of Performance of Corrosion Inhibitors Using Adsorption Isotherm Models: An Overview. *Chemical Science International Journal*, 2017. 18: p. 1-34.
32. Migahed, M.M.A., et al., Synthesis of some novel non ionic surfactants based on tolyltriazone and evaluation their performance as corrosion inhibitors for

carbon steel. Egyptian Journal of Petroleum, 2013. 22: p. 149-160.

33. Shaban, S., et al., Evaluation of some cationic surfactants based on dimethylaminopropylamine as corrosion inhibitors. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014. 21.