



Semnan University



Research Article

Investigation of Azo-Azomethine Compounds for Corrosion Protection of A516 Steel in Hydrochloric Acid Solution

Hamid Khanmohammadi ^{a,*}, Shakila Dehnadi ^b

^a Department of Inorganic Chemistry, Faculty of Chemistry and Petroleum Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

^b Department of Chemistry, Faculty of Science, Arak University, Arak, 384817758, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 31/Jan/2016

Revised: 5/Apr/2016

Accepted: 20/Sep/2016

Keywords:

Corrosion,
Corrosion Inhibitors,
Azo-Azomethine,
Hydrochloric Acid,
Weight loss Measurement,
Electrochemical Impedance Spectroscopy,
Tafel Polarization.

ABSTRACT

Two new azo-azomethine compounds, L^1 , with a planar structure, and L^2 , with a tripodal structure, were synthesized from the condensation reaction of 1-(3-formyl-4-hydroxyphenylazo)-4-chlorobenzene with 2-aminonaphthalene and tris(2-aminoethyl)amine, respectively, and characterized using FT-IR, 1H NMR, and elemental analysis. The inhibitory behaviour of L^1 and L^2 for corrosion protection of A516 steel in 0.1 M hydrochloric acid solution was studied by weight loss measurements, electrochemical impedance spectroscopy, and Tafel polarization at different concentrations and temperatures. FE-SEM and AFM studies of the steel surface before and after exposure to an acidic environment, in the presence or absence of the current inhibitor, show that L^1 forms a suitable coating layer on the steel surface due to its planar structure and, as a suitable inhibitor, effectively protects A516 steel against hydrochloric acid solution compared to L^2 . The inhibition efficiency of steel corrosion reaches 73.7 % with an increase L^1 concentration up to the optimum value of 40 $\mu\text{mol/lit}$. After further increases in inhibitor concentration, the inhibition efficiency decreases. Electrochemical impedance analysis of the HCl/ L^1 /steel interface reveals that at concentrations above the optimum, charge-transfer resistance of the steel surface declines, resulting in an increased corrosion rate. Tafel polarization curves indicate that the inhibition mechanism of L^1 is mixed type, with a slight inclination toward cathodic inhibition.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.41080.2445>

© 2026 Semnan University.

This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

*.Corresponding author: Professor of Analytical Chemistry. E-mail address: h.khanmohammadi@basu.ac.ir

How to cite this article: Khanmohammadi, H. & Dehnadi, Sh. (2026). Investigation of Azo-Azomethine Compounds for Corrosion Protection of A516 Steel in Hydrochloric Acid Solution. *Applied Chemistry Today*, 21(78), 179-196. (in Persian)

بررسی رفتار ترکیبات آزو-آزومتین برای محافظت از فولاد A516 در مقابل

خوردگی در محلول هیدروکلریک اسید

حمید خانمحمدی^{۱*}، شکیلا دهنادی^۲^۱ گروه شیمی معدنی، دانشکده شیمی و علوم نفت، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران^۲ گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، اراک ۳۸۱۴۸۱۷۷۵۸، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵	دو ترکیب آزو-آزومتین جدید L^1 با ساختار مسطح، و L^2 با ساختار سه پایه‌ای، به ترتیب از واکنش تراکمی
بازنگری مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷	۱- (۳- فرمیل-۴-هیدروکسی فنیل آزو)-۴-کلروبنزن با ۲-آمینو نفتالن و تریس(۲-آمینو اتیل) آمین سنتز
پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰	و با استفاده از روش‌های $H NMR$ ، $FT-IR$ و تجزیه عنصری شناسایی شدند. رفتار بازدارندگی L^1 و
کلمات کلیدی:	L^2 برای محافظت از خوردگی فولاد A516 در محلول هیدروکلریک اسید با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری
خوردگی،	کاهش وزن، طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و قطبش تافل در غلظت‌ها و دماهای مختلف مورد مطالعه
بازدارنده‌های خوردگی،	قرار گرفت. مطالعه $FE-SEM$ و AFM سطح فولاد قبل و بعد از قرارگرفتن در محیط اسیدی، در حضور
آزو-آزومتین،	و یا عدم حضور بازدارنده‌ها نشان می‌دهد L^1 به دلیل ساختار مسطح، لایه پوششی مناسبی در سطح فولاد
هیدروکلریک اسید،	تشکیل می‌دهد و به‌عنوان یک بازدارنده مناسب، در مقایسه با L^2 به‌طور موثری از فولاد A516 در برابر
اندازه‌گیری کاهش وزن،	خوردگی در محلول هیدروکلریک اسید $0.1 M$ محافظت می‌کند. بازده بازدارندگی از خوردگی فولاد با
طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی،	افزایش غلظت L^1 تا مقدار بهینه $40 \mu mol/lit$ به 73.7% می‌رسد و بعد از آن با افزایش غلظت بازدارنده،
قطبش تافل.	بازده بازدارندگی کاهش پیدا می‌کند. بررسی رفتار فصل مشترک محلول هیدروکلریک اسید حاوی L^1 و
	فولاد بر اساس آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نشان می‌دهد در غلظت‌های بالاتر از مقدار بهینه، مقاومت
	انتقال بار سطح فولاد کاهش می‌یابد که در نتیجه آن نرخ خوردگی فولاد در محیط خورنده افزایش پیدا
	می‌کند. منحنی‌های پلاریزاسیون تافل نشان می‌دهند مکانیزم عملکرد L^1 برای محافظت از خوردگی فولاد
	در برابر خوردگی در محیط خورنده ذکر شده از نوع مختلط، و تا اندازه‌ای متمایل به بازدارندگی کاتدی،
	است.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2026.41080.2445>This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

۱- مقدمه

خوردگی تجهیزات فلزی در صنایع مختلف و خسارت‌های ناشی از آن جمله چالش‌های مهم و مورد توجه در تمام کشورهای دنیاست و هر ساله مبالغ زیادی از درآمد ملی کشورها برای کاهش و یا جبران عوارض ایجاد شده را به خود اختصاص می‌دهد [۱-۴]. خوردگی به‌عنوان تخریب تجهیزات فلزی از طریق یک فرآیند الکتروشیمیایی یا مکانیکی در یک محیط خورنده توصیف می‌شود که افزون بر خطراتی که برای پایداری خطوط تولید دارد باعث کاهش راندمان تولید، زیان و تعطیلی کارخانه‌ها و آلودگی محصولات تولیدی می‌شود [۵، ۶]. به منظور کاهش اثرهای مربوط به خوردگی در بیشتر کشورها مراکز پژوهشی متعددی برای دستیابی به روش‌های جدید برای کنترل و کاهش خوردگی، ساخت آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی و همچنین تهیه ترکیبات

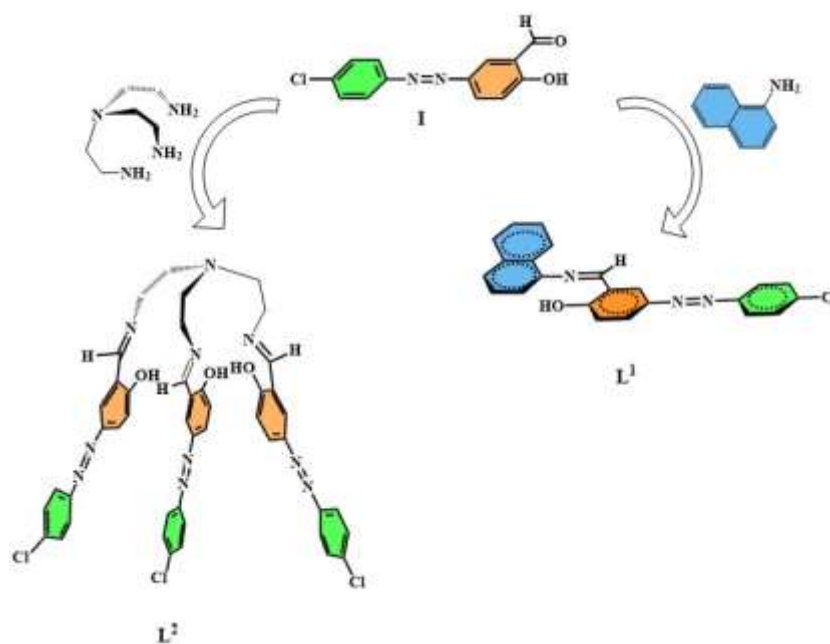
ضد خوردگی مناسب برای محافظت موثر از فلزات مختلف در برابر عوامل خوردنده طبیعی یا مصنوعی، در حال فعالیت هستند [۸].
 [۷]. در میان روش‌های معرفی شده برای کاهش خوردگی تجهیزات فلزی، پوشش‌دهی مناسب سطوح فلزی توسط مواد شیمیایی و یا طبیعی، به عنوان یکی از شناخته شده‌ترین روش‌ها، از سال‌های گذشته تا به امروز به طور گسترده برای محافظت از خوردگی تجهیزات فلزی در صنایع مختلف به کار گرفته شده‌اند [۹، ۱۰].

در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به استفاده از پوشش دهنده‌های اختصاصی ارزان قیمت و قابل دسترس، نظیر پلیمرها و ترکیبات آلی جلب شده تا علاوه بر محافظت موثر از تجهیزات فلزی در برابر خوردگی، اختلالی در واکنش‌های شیمیایی صنایع، نظیر صنایع نفتی، ایجاد نکنند [۱۱-۱۴]. بیشتر فعالیت‌های تحقیقاتی در این حوزه بیشتر بر طراحی هوشمندانه و هدفمند ترکیباتی متمرکز شده که به‌عنوان نمونه‌های منحصر بفرد و اختصاصی، قابلیت محافظت از خوردگی تجهیزات فلزی در محیط خوردنده اسیدی را داشته باشند [۱۵-۱۷]. در این میان، محیط‌های حاوی هیدروکلریک اسید به عنوان یکی از پرکاربردترین اسیدهای معدنی برای حذف لایه‌های اکسیدی در تجهیزات نفتی و اسیدکاری چاه‌های نفتی به‌طور ویژه مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۸-۲۱].

از طرف دیگر، شاخص‌های موثر بر رفتار محافظتی مولکول‌های آلی، نظیر قابلیت اتصال به مواضع فعال سطح فلز (به‌صورت فیزیکی یا شیمیایی)، حضور اتم‌های سنگین، استخلاف‌های الکترون دهنده یا الکترون کشنده در مولکول آلی، وجود سیستم‌های آروماتیک و همچنین قابلیت جابجایی الکترون‌ها در مولکول‌های آلی حاوی پیوندهای π ($C=C$ ، $C\equiv C$ ، $N=N$ ، $C=N$ و $C=N$) - از جمله شاخص‌هایی هستند که آن‌ها را برای استفاده به‌عنوان پوشش‌های بازدارنده اختصاصی برای محافظت از فلزات در محیط‌های اسیدی مناسب کرده است [۱۷-۲۱]. امری‌گول و همکارانش در سال ۲۰۰۸ [۲۳]، رفتار بازدارندگی دسته‌ای از ترکیبات آزومتینی حاوی گروه‌های پیریدینی، فنولی، ۲-هیدروکسی نفتیل حاوی اتم‌های N، S برای محافظت از فولاد نرم در برابر خوردگی در محیط هیدروکلریک اسید ۲ M در دمای ۳۰۳ K را گزارش کرده‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مولکول آلی با زنجیره‌های آروماتیکی که گروه‌های حلقوی حاوی هترو اتم‌های N، S و گروه آزومتینی، با جذب بر روی سطح فولاد نرم باعث محافظت بیشتر فولاد در برابر خوردگی در محیط اسیدی می‌شود. نتایج حاصل از مطالعات شکری در سال ۲۰۱۴ نشان می‌دهد که کارایی ترکیبات آزو-آزومتینی برای محافظت از فولاد نرم در برابر خوردگی با افزایش تعداد حلقه‌های آروماتیک حاوی گروه‌های هیدروکسیل افزایش پیدا می‌کند [۲۴]. ایروها و همکارانش در سال ۲۰۲۱ [۲۵، ۲۶] نیز با مطالعه رفتار بازدارندگی برخی از مولکول‌های آزومتینی برای محافظت فولاد از برابر خوردگی در محیط HCl نشان دادند مولکول‌هایی با سیستم رزونانسی گسترده که حاوی پیوندهای آزومتینی و گروه‌های OH- و NH₂- نیز هستند، با جذب بر روی سطح فولاد به طور موثر از خوردگی مراکز فعال سطح فولاد در برابر هیدروکلریک اسید محافظت می‌کنند. وانگ و همکارانش نشان دادند که بازدارنده‌های آلی با سیستم رزونانسی گسترده و استخلاف‌های Br و I، در موقعیت اورتو و پارا در حلقه فنولی در مقایسه با

بازدارنده‌های بدون استخلاف قابلیت محافظتی بیشتری از فولاد در مقابل خوردگی در محیط هیدروکلریک اسید از خود نشان می‌دهند [۲۷].

در ادامه فعالیت تحقیقاتی قبلی [۲۸] و به منظور مطالعه و بررسی قابلیت ترکیبات آزو-آزومتین با ساختار مسطح برای اتصال به سطح فولاد نرم و محافظت از آن در برابر خوردگی در محیط هیدروکلریک اسید، دو ترکیب آزو-آزومتین جدید L^1 و L^2 (شکل ۱) به ترتیب از واکنش تراکمی ۱- (۳- فرمیل-۴- هیدروکسی فنیل آزو)-۴- کلروبنزن با ۲- آمینو نفتالن و تریس (۲- آمینواتیل) آمین سنتز و قابلیت آن‌ها برای کاهش خوردگی فولاد نرم در محلول هیدروکلریک اسید مورد بررسی قرار گرفت. ترکیبات سنتز شده با استفاده از روش‌های طیف سنجی FT-IR و 1H NMR و تجزیه عنصری شناسایی شدند. افزون بر مطالعه سطح فولاد نرم پس از قرار گرفتن در محیط اسیدی در غیاب و/یا در حضور L^1 و L^2 با استفاده از روش‌های SEM و AFM، قابلیت ترکیبات سنتز شده برای کاهش خوردگی فولاد نرم در محیط هیدروکلریک اسید $M = 0.1$ با استفاده از روش‌های وزن سنجی، طیف سنجی امپدانس و قطبش تافل در غلظت‌ها و دماهای مختلف بررسی شد. ترکیب L^1 به دلیل جذب بر سطح فولاد نرم و پوشاندن بخش زیادی از مواضع فعال سطح فولاد از تاثیر مستقیم HCl بر فولاد جلوگیری کرده در مقایسه با L^2 که ساختاری غیر مسطح دارد، بطور موثری از خوردگی فولاد در محیط اسیدی جلوگیری می‌کند. همچنین، بررسی منحنی‌های پلاریزاسیون نشان می‌دهد مکانیزم عملکرد بازدارندگی L^1 از خوردگی فولاد در محیط هیدروکلریک اسید از نوع مختلط، و تا اندازه‌ای متمایل به بازدارنده کاتدی، است. براساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت ترکیبات آزو-آزومتین با ساختار مسطح و استخلاف‌های OH و Cl این قابلیت را دارند که به‌عنوان یکی از اجزای مکمل در فرمول بندی مواد شیمیایی تجاری محافظ در برابر خوردگی تجهیزات فولادی، نظیر آرموهایب، در زمان اسید شویی با HCl مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱. بازدارنده‌های آزو-آزومتین L^1 و L^2

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و روش‌های تحقیق

برای بررسی خوردگی فولاد در محلول اسیدی، از کوپن‌های فولادی A516 با چگالی $7/314 \text{ g/cm}^3$ و مشخصات ارائه شده در جدول ۱- استفاده شده است.

جدول ۱. ترکیب درصد آلیاژ مورد استفاده در کوپن‌های فولادی A516

Fe	Cr	Ni	V	C	Si	Mo	Mn	Co	Al	Cu	P
%.۹۸/۶۰	%.۰/۰۰۷	%.۰/۰۱۹	%.۰/۰۰۷	%.۰/۱۵	%.۰/۱۹	%.۰/۰۰۴	%.۰/۸۷	%.۰/۰۰۷	%.۰/۰۲۷	%.۰/۰۱۰	%.۰/۰۱۴

کلیه حلال‌ها و اسید هیدروکلریک از شرکت مرک تهیه و بدون خالص‌سازی اضافی مورد استفاده قرار گرفتند.

کلیه آزمون‌های پلاریزاسیون در دمای 298 K و با استفاده از دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات مدل OrigaFlex 500 از شرکت OrigaFlex و در یک پیل الکتروشیمیایی دوجداره سه الکترودی انجام شدند. در پیل معرفی شده الکتروود مرجع، الکتروود نقره/نقره کلرید، الکتروود کمکی، الکتروود پلاتین و الکتروود کار از جنس آلیاژ فولادی مورد استفاده در کوپن‌های فلزی هستند.

۲-۲- سنتز مواد شیمیایی

۲-۲-۱- پیش ماده آزو-آلدهید، ۱- (۳- فرمیل-۴- هیدروکسی فنیل آزو)-۴- کلروبنزن، I

پیش ماده آزو-آلدهید براساس واکنش سه مرحله‌ای زیر تهیه شد [۲۹]:

(الف) به 25 ml محلول آب و هیدروکلریک اسید، با نسبت ۱۸:۸، مقدار $0/02$ مول ۴-کلرو آنیلین اضافه کرده و اجازه دادیم تا مخلوط در دمای 80 در حال چرخش بماند تا محلولی شفاف و یکنواختی حاصل شود. محلول حاصل را تا دمای محیط سرد کرده و سپس آن را در ظرفی حاوی یخ خردشده ریختیم. برای تشکیل نمک دی‌آزونیوم محلولی از $0/02$ مول سدیم نیتريت در 10 ml آب مقطر را در دمای پایین قطره قطره به محلول در حال چرخش اول اضافه کردیم.

(ب) در ظرف دیگری $7/4$ گرم سدیم کربنات را در 10 ml آب مقطر حل کرده و به آن $0/7$ گرم NaOH اضافه کردیم. به محلول در حال چرخش حاصل، در حمام یخ، به تدریج $0/02$ مول سالیسیل آلدهید اضافه شد.

(ج) محلول به دست آمده در قسمت (الف) را در دمای پایین و به تدریج با هم زدن شدید به محلول (ب) اضافه کردیم. بعد از اتمام فرآیند افزایش، اجازه دادیم مخلوط حاصل به مدت ۳ ساعت در دمای محیط در حال چرخش باقی بماند. بعد از این زمان، رسوب حاصل را صاف کرده و سه بار با آب مقطر شستیم. بعد از خشک شدن، رسوب حاصل را در 100 ml اتانول گرم نوبلور کردیم. رسوب زرد رنگ با بازده: 70% . نقطه ذوب: $198-196^\circ \text{C}$ ، نتایج آنالیز عنصری برای $\text{C}_{13}\text{H}_9\text{ClN}_2\text{O}_2$ محاسبه شده $N=10/75$ ، $H=3/48$ ، $C=59/90$ ، بدست آمده $N=10/47$ ، $H=3/56$ ، $C=59/64$ (بخش اطلاعات تکمیلی مقاله (S6)-(S1) را ببینید)

طیف زیر قرمز (KBr):

ν (cm^{-1}) = ۱۶۷۰ (C=O), ۱۵۷۴ (C=C), ۱۴۷۹ (N=N), ۱۲۷۸ (C-O).

طیف $^1\text{H NMR}$ (d_6 -DMSO):

δ (ppm) = ۱۱/۵۶ (br, ۱H), ۱۰/۳۷ (s, ۱H), ۸/۱۹ (s, ۱H), ۸/۰۹ (d, ۱H, $J=۸/۸۳$ Hz), ۷/۲۰ (d, ۱H, $J=۸/۸۳$ Hz), ۷/۸۸ (d, ۲H, $J=۷/۲۳$ Hz), ۷/۷۴ (d, ۲H, $J=۷/۲۳$ Hz).

۲-۲-۲- بازدارنده L^1

محلولی از ۱ میلی مول ۲-آمینو نفتالن در ۱۰ ml اتانول را در دمای 70°C به محلولی از ۱ میلی مول پیش ماده I در ۲۵ ml اتانول اضافه کردیم. بعد از ۱۵ ساعت رفلاکس، مخلوط را صاف و رسوب حاصل را دو بار با اتانول گرم و یک بار با دی اتیل اتر شستیم. رسوب حاصل را در ۱۰۰ ml اتانول نوبلور کردیم. رسوب نارنجی با بازده ۹۲٪. نقطه ذوب: $205-203^\circ\text{C}$. نتایج آنالیز عنصری برای $\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{ClN}_3\text{O}$ محاسبه شده $\text{C}=71/60$, $\text{H}=4/18$, $\text{N}=10/89$, بدست آمده $\text{C}=71/28$, $\text{H}=4/29$, $\text{N}=10/65$. (بخش اطلاعات تکمیلی مقاله (S6)-(S1) را ببینید).

طیف زیر قرمز (KBr):

ν (cm^{-1}) = ۳۰۴۹ (Ar), ۱۶۱۴ (N=C), ۱۵۷۰ (C=C), ۱۴۸۳ (N=N), ۱۳۵۸ (N-C).

طیف $^1\text{H NMR}$ (d_6 -DMSO):

δ (ppm) = ۱۳/۹۷ (s, ۱H), ۹/۲۱ (s, ۱H), ۸/۴۳ (s, ۱H), ۸/۲۰ (d, ۱H, $J=9/00$ Hz), ۸/۰۵ (m, ۲H), ۷/۹۰ (m, ۳H), ۷/۶۴ (m, ۵H), ۷/۵۰ (d, ۱H, $J=6/00$ Hz), ۷/۲۴ (d, ۱H, $J=9/00$ Hz).

۲-۲-۳- بازدارنده L^2

محلولی از ۱ میلی مول تریس (۲-آمینواتیل) آمین در ۱۰ ml اتانول را در دمای 70°C به محلولی از ۳ میلی مول پیش ماده I در ۲۵ ml اتانول اضافه کردیم. بعد از ۱۵ ساعت رفلاکس، مخلوط را صاف و رسوب حاصل را ابتدا با اتانول گرم و سپس با دی اتیل اتر شستیم. رسوب حاصل را در ۱۰۰ ml اتانول نوبلور کردیم. رسوب قهوه‌ای روشن با بازده ۷۷٪. نقطه ذوب: 185°C . نتایج آنالیز عنصری برای $\text{C}_{45}\text{H}_{39}\text{Cl}_3\text{N}_{10}\text{O}_3$ محاسبه شده $\text{C}=61/83$, $\text{H}=4/50$, $\text{N}=16/02$, بدست آمده $\text{C}=62/11$, $\text{H}=4/62$, $\text{N}=16/28$. (بخش اطلاعات تکمیلی مقاله (S6)-(S1) را ببینید).

طیف زیر قرمز (KBr):

ν (cm^{-1}) = ۲۸۲۷-۲۹۴۳, ۱۶۳۴ (N=C), ۱۵۷۹ (C=C), ۱۴۸۱ (N=N).

طیف $^1\text{H NMR}$ (d_6 -DMSO):

δ (ppm) = ۱۴/۳۰ (s, ۱H), ۸/۴۲ (s, ۱H), ۷/۷۰ (d, ۲H, $J=12/00$ Hz), ۷/۵۸ (d, ۲H, $J=12/00$ Hz), ۷/۵۳ (s, ۱H), ۷/۶۴ (d, ۲H, $J=12/00$ Hz), ۶/۷۴ (d, ۱H, $J=12/00$ Hz), ۳/۷۳ (s, ۲H), ۲/۹۳ (s, ۲H).

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- شناسایی ترکیبات شیمیایی

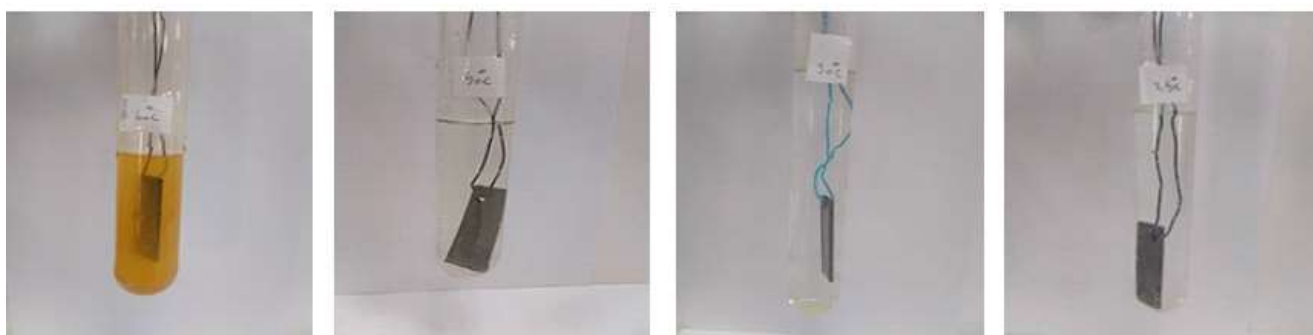
بازدارنده‌های L^1 و L^2 بترتیب از واکنش تراکمی ساده، با نسبت‌های استوکیومتری مناسب، بین پیش ماده، **I**، ۱- (۳- فرمیل-۴- هیدروکسی فنیل آزو)-۴- کلروبنزن، با ۲- آمینو نفتالن و تریس (۲-آمینواتیل) آمین در اتانول تهیه و با استفاده از روش‌های طیف سنجی زیرقرمز و 1H NMR شناسایی شد. نتایج حاصل از طیف‌های زیرقرمز و UV-Vis برای پیش ماده، **I**، و ترکیب‌های L^1 و L^2 در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. نتایج طیف زیر قرمز (KBr/cm^{-1} و UV-Vis)

ترکیب	$\nu(C=O)$	$\nu(C=C)$	$\nu(C-O)$	$\nu(C=N)$	$\nu(N=N)$	λ_{max} (nm) (ϵ ($M^{-1}cm^{-1}$)) / DMSO
I	۱۶۷۰	۱۶۲۰	۱۲۴۳	-	۱۴۷۹	۲۴۶(۴۵۰۰)، ۳۸۲(۱۲۷۰۰)، ۵۵۱(۱۸۵۰)
L^1	-	۱۵۷۰	۱۲۷۹	۱۶۱۴	۱۴۸۳	۲۶۰(۷۳۶۰)، ۳۵۰(۱۱۵۰)، ۴۱۰(۴۰۰)
L^2	-	۱۵۷۹	۱۲۸۰	۱۶۳۴	۱۴۸۲	۲۶۵(۳۸۰۰)، ۳۴۵(۳۳۰۰)، ۳۹۰-۴۴۰(۳۹۰۰)

۳-۲- آزمون‌های کاهش وزن و مطالعه سطح

قبل از انجام آزمون کاهش وزن، کوپن‌های فولادی با سنباده‌هایی با درجه زبری ۸۰۰ و ۱۰۰۰ صیقل داده شده، با آب دو بار تقطیر، استون و اتانول شسته و بعد از خشک شدن به دقت وزن شدند. پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری کوپن‌ها در دماهای $25^\circ C$ ، $30^\circ C$ ، $50^\circ C$ ، $60^\circ C$ در محلول هیدروکلریک اسید ۰/۱ M و در حضور غلظت‌های مختلف از L^1 و L^2 ، شکل ۲، مجدداً کوپن‌ها با آب مقطر و استون شسته شده و پس از خشک شدن به دقت وزن شدند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در تمام آزمون‌ها با افزایش دما میزان خوردگی افزایش پیدا کرده و وزن کوپن‌های فولادی، به دلیل خوردگی در محیط اسیدی، کمتر شده است.



$60^\circ C$

$50^\circ C$

$30^\circ C$

$25^\circ C$

شکل ۲. غوطه‌وری کوپن‌های فلزی به مدت ۲۴ ساعت در محلول هیدروکلریک اسید ۰/۱ M در دماهای مختلف در حضور L^1 با غلظت بهینه با توجه به محدودیت‌های موجود در بررسی‌های الکتروشیمیایی و مطالعه سطح در دماهای بالاتر از دمای محیط، در تمام آزمون‌های کاهش وزن دمای $25^\circ C$ به‌عنوان مبنا برای بررسی قابلیت بازدارندگی L^1 و L^2 از خوردگی فولاد در محیط هیدروکلریک اسید ۰/۱ M در نظر گرفته شده است. نتایج کمی مربوط به تغییر وزن کوپن‌های فولادی بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری در محیط اسیدی در دمای $25^\circ C$ و در حضور بازدارنده‌ها در جدول ۳ آورده شده است. براساس نتایج بدست آمده با افزایش

غلظت بازدارنده‌های L^1 و L^2 تا $40 \mu\text{mol/lit}$ ، میزان کاهش وزن فولاد در اثر خوردگی کمتر می‌شود که نشان‌دهنده کاهش خوردگی فولاد با افزایش غلظت بازدارنده‌ها است. بعد از آن، با افزایش غلظت بازدارنده‌ها وزن کوپن‌های فولادی کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده خوردگی بیشتر فولاد در غلظت‌های بالای بازدارنده به دلیل کاهش یکنواختی پوشش تشکیل شده در سطح فولاد و تاثیر زیاد اسید بر آن است [۳۰]. بر این اساس، غلظت $40 \mu\text{mol/lit}$ از بازدارنده‌ها L^1 و L^2 به عنوان غلظت بهینه در سایر آزمون‌ها برای مطالعه قابلیت بازدارنده‌ها برای محافظت از فولاد در برابر خوردگی در نظر گرفته شده است. مساحت کل برای کوپن‌های فولادی مورد استفاده در آزمایش کاهش وزن تقریباً $57.0/2 \text{ cm}^2$ و سرعت کاهش وزن برای آن‌ها در محیط اسیدی براساس روش ASTM G3172 حساب شده است [۳۱]. در این روش استاندارد نرخ خوردگی فولاد در طول یک سال برای آزمون کاهش وزن باتوجه به رابطه (۱) [۳۲، ۳۳] حساب و در جدول ۳ نشان داده شده است.

$$C_R \text{ (mm/y)} = \frac{8.74 \times 10^4 W}{A.t.d} \quad (1)$$

در این رابطه، W (g) اختلاف وزن کوپن فولادی قبل و بعد از قرار گرفتن در محلول خورنده، A (cm^2) مساحت کوپن فولادی، t (h) زمان غوطه‌وری فولاد در محلول اسیدی، چگالی کوپن فولادی gr/cm^3 و C_R نرخ خوردگی است. قابلیت L^1 و L^2 برای بازدارندگی از خوردگی فولاد در محیط اسیدی بر مبنای درصد بازدارندگی ($\eta\%$) و با استفاده از رابطه‌های (۲) و (۳) بدست می‌آید (جدول ۳):

$$\Theta = C_R - C_{R(i)} / C_R \quad (2)$$

$$\eta\% = \Theta \times 100 \quad (3)$$

در این روابط Θ بازدارندگی مطلق، C_R و $C_{R(i)}$ به ترتیب نرخ خوردگی فولاد در غیاب و در حضور بازدارنده را نشان می‌دهند. جدول ۳. نتایج آزمون کاهش وزن بعد از ۲۴ ساعت غوطه‌وری کوپن‌های فولادی A516 در محلول 0.1 M HCl در دمای 25°C در حضور غلظت‌های مختلف از L^1 و L^2

C ($\mu\text{mol/lit}$)	L^1				L^2			
	ΔW (g)	CR (mm/day)	Θ	$\eta\%$	ΔW (g)	CR (mm/day)	Θ	$\eta\%$
۰	۰/۰۲۲	۰/۵۸۶	۰	۰	۰/۰۲۲	۰/۵۸۶	۰	۰
۱۰	۰/۰۱۸	۰/۴۷۸	۰/۱۸۴	۱۸/۴	۰/۰۲۱	۰/۵۵۷	۰/۰۴۹	۴/۹
۲۰	۰/۰۱۵	۰/۳۹۸	۰/۳۰۱	۳۰/۱	۰/۰۲۰	۰/۵۳۱	۰/۰۹۴	۹/۴
۳۰	۰/۰۱۰	۰/۲۶۵	۰/۵۴۹	۵۴/۹	۰/۰۱۷	۰/۴۵۱	۰/۱۸۴	۱۸/۴
۴۰	۰/۰۰۹	۰/۲۳۹	۰/۵۸۸	۵۸/۸	۰/۰۱۵	۰/۳۹۸	۰/۳۲۱	۳۲/۱
۵۰	۰/۰۱۸	۰/۴۷۸	۰/۱۸۰	۱۸/۰	۰/۰۱۹	۰/۵۰۴	۰/۱۴۰	۱۴/۰
۶۰	۰/۰۲۰	۰/۵۳۱	۰/۰۷۶	۷/۶	۰/۰۲۱	۰/۵۵۷	۰/۰۷۶	۴/۹

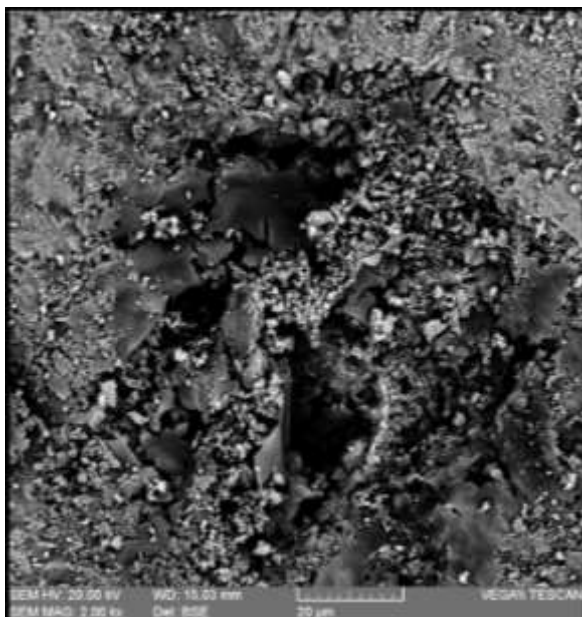
همچنین، تصاویر میکروسکوپ نوری با بزرگنمایی ۱۰۰۰ از کوپن‌های فولادی قبل و بعد از قرار گرفتن به مدت ۲۴ ساعت در دمای 25°C در محلول هیدروکلریک اسید 0.1 M در غیاب و همچنین در حضور بازدارنده‌های L^1 و L^2 ، با غلظت‌های بهینه،

تهیه شد (شکل ۳). با توجه به تصاویر بدست آمده بسادگی می‌توان مشاهده کرد که میزان خوردگی فولاد در محیط اسیدی و در حضور بازدارنده‌های L^1 و L^2 نسبت به خوردگی فولاد در شرایط مشابه و بدون حضور بازدارنده کمتر است. همچنین، بازدارنده L^1 در مقایسه با بازدارنده L^2 بطور یکنواخت‌تری سطح فولاد را در مقابل تاثیر اسید پوشانده است. براساس نتایج بدست‌آمده از آزمون وزن‌سنجی و همچنین تصاویر میکروسکوپ نوری مشخص شد که قابلیت بازدارنده L^1 برای محافظت از فولاد در برابر خوردگی در محیط هیدروکلریک اسید 0.1 M در دمای 25°C و در مقایسه با بازدارنده L^2 ، در همان شرایط، بیشتر است. بنابراین، بازدارنده L^1 به عنوان بازدارنده موثر برای محافظت از فولاد در محیط HCl، در مقایسه با L^2 ، انتخاب و سایر آزمایش‌های مطالعه سطح با میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) و همچنین آزمایش‌های الکتروشیمیایی فقط برای بررسی قابلیت محافظتی بازدارنده L^1 انجام شده است.

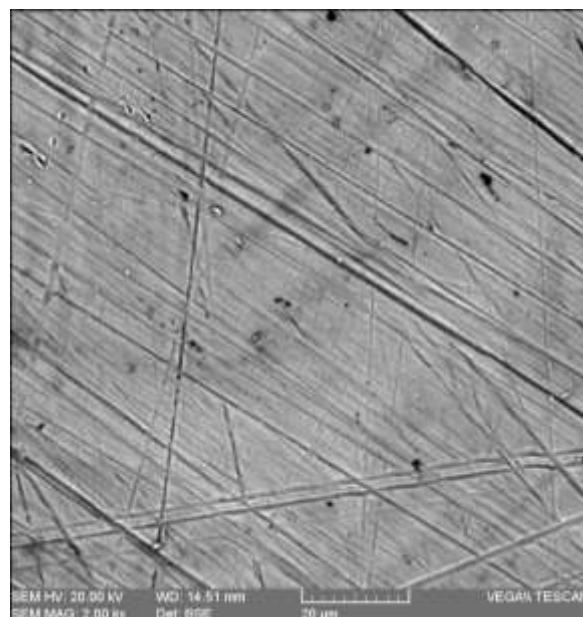


شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ نوری سطح فولاد، با بزرگنمایی ۱۰۰۰: (الف) فولاد صیقل داده شده قبل از قرار گرفتن در محلول اسیدی، (ب) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در غیاب بازدارنده‌ها، (ج) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در حضور بازدارنده L^1 در غلظت بهینه، (د) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در حضور بازدارنده L^2 در غلظت بهینه

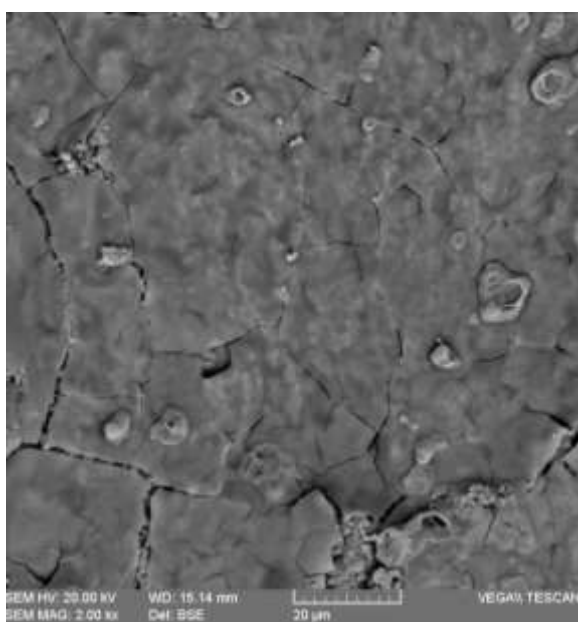
تصاویر میکروسکوپ روبشی الکترونی سطح فولاد، شکل ۴، نشان می‌دهد زمانی که کوپن فولادی در غیاب بازدارنده L^1 در محیط هیدروکلریک اسید 0.1 M قرار می‌گیرد در سطح آن خوردگی حفره‌ای ایجاد می‌شود (شکل ۴، (ب)). در حضور L^1 ، با غلظت بهینه، نرخ خوردگی حفره‌ای، نسبت به زمانی که بازدارنده وجود ندارد به شدت کاهش پیدا می‌کند (شکل ۴، (ج)) که این موضوع نشان می‌دهد که بازدارنده L^1 با تشکیل یک لایه محافظتی نسبتاً یکنواخت در سطح فولاد تاثیر محیط خورنده بر فولاد را کاهش می‌دهد. با افزایش بیشتر غلظت، کارایی بازدارنده برای پوشش یکنواخت سطح فولاد محافظت از آن در برابر خوردگی کمتر می‌شود (شکل ۴، (د)) که نشان می‌دهد در غلظت‌های بالاتر از بازدارنده به دلیل افزایش برهمکنش‌های بین مولکول‌های بازدارنده جذب شده در سطح فولاد و مولکول‌های بازدارنده در فاز محلول، پوشش تشکیل شده در سطح فولاد یکنواختی خود را از دست می‌دهد و امکان تاثیر عوامل خورنده بر فولاد و میزان خوردگی افزایش پیدا می‌کند [۳۴]. (بخش اطلاعات تکمیلی مقاله را ببینید)



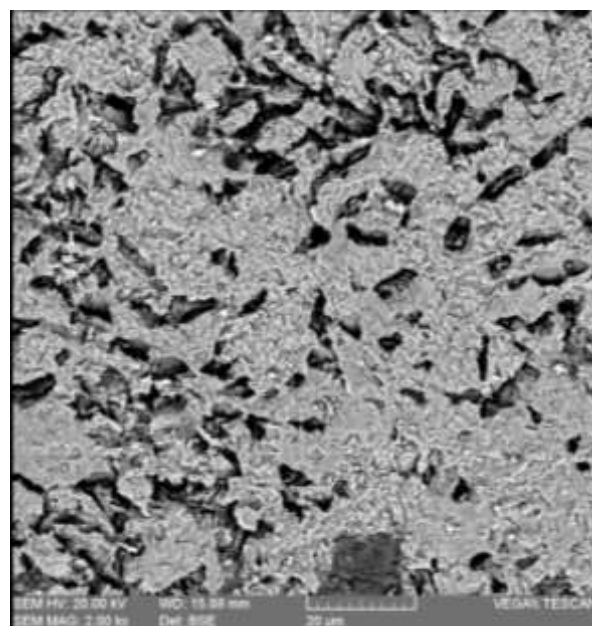
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

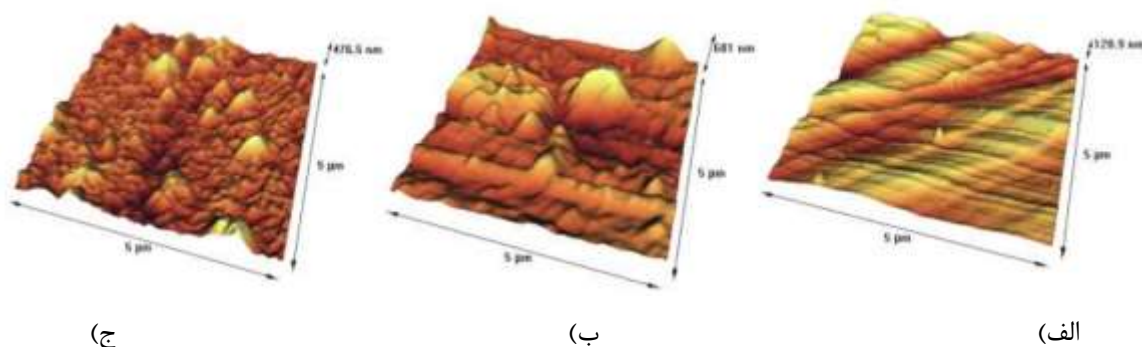
شکل ۴. تصاویر FE-SEM (الف) فولاد صیقل داده شده قبل از قرار گرفتن در محلول ۰/۱ M HCl، (ب) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در غیاب بازدارنده، (ج) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در حضور بازدارنده L^1 با غلظت $40 \mu\text{mol/lit}$ ، (د) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در حضور بازدارنده L^1 با غلظت $60 \mu\text{mol/lit}$

تصاویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی، AFM، (شکل ۵) نیز کاهش خوردگی و کاهش زبری سطح فولاد در حضور L^1 در محیط اسیدی را تایید می‌کند. نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد میانگین زبری ایجاد شده در سطح فولاد، زمانیکه فولاد در حضور بازدارنده، با غلظت بهینه، به مدت ۲۴ ساعت در محلول هیدروکلریک اسید ۰/۱ M قرار دارد، در مقایسه با

زمانی که بازدارنده حضور ندارد کاهش چشمگیری پیدا کرده است که این موضوع تاییدی بر قابلیت L^1 برای محافظت از فولاد در محیط خورنده اسیدی است. (بخش اطلاعات تکمیلی مقاله را ببینید)

جدول ۴. نتایج مربوط به پارامترهای زبری فولاد در دمای 25°C در شرایط مختلف

ترکیب	Ra	Rq
فولاد صیقل داده شده	17/26 ± 3/94	20/54 ± 3/94
فولاد بعد از 24 ساعت در HCl بدون حضور L^1	161/80 ± 44/64	213/60 ± 60/95
فولاد بعد از 24 ساعت در HCl در حضور L^1	46/71 ± 12/06	64/05 ± 17/16



شکل ۵. تصاویر AFM (الف) فولاد صیقل داده شده قبل از قرار گرفتن در محلول اسیدی، (ب) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در غیاب بازدارنده، (ج) بعد از قرار گرفتن در محلول اسیدی در حضور بازدارنده L^1 با غلظت بهینه.

۳-۳- آزمایش‌های الکتروشیمیایی

۳-۳-۱- قطبش تافل

به منظور پایداری شدن سیستم قبل از بررسی رفتار قطبش، الکترودها به مدت ۱ ساعت در الکترولیت مورد استفاده غوطه‌ور شدند. رفتار پلاریزاسیون فولاد در محلول 0.1 M HCl در دمای 25°C در غیاب L^1 و در حضور غلظت‌های مختلف از L^1 در دمای 25°C با اعمال پتانسیلی با سرعت روبش 1 mV/s از محدوده -250 mV تا $+250\text{ mV}$ ، نسبت به پتانسیل مدار باز (OCP) بر سیستم به دست آمد. پارامترهای الکتروشیمیایی خوردگی شامل پتانسیل خوردگی، شیب‌های آندی و کاتدی، چگالی جریان خوردگی و بازده بازدارندگی در غلظت‌های مختلف از بازدارنده L^1 در جدول ۵ ارائه شده است. قابلیت بازدارندگی از خوردگی فولاد براساس رابطه (۴) به دست آمده است [۳۵]:

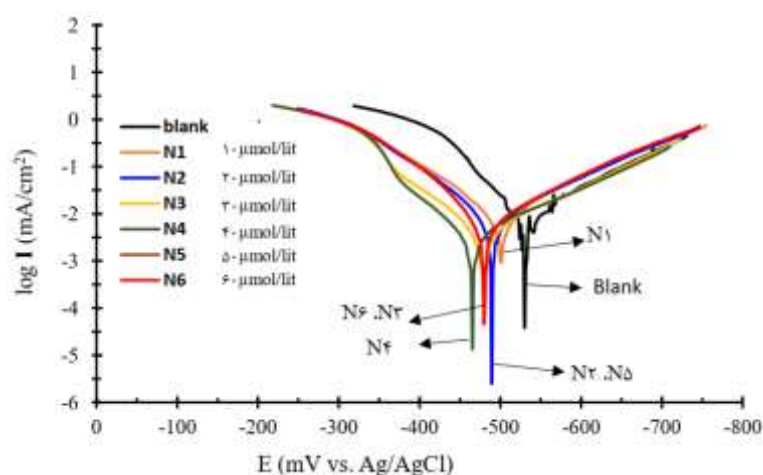
$$\eta_p \% = \frac{i_{corr} - i_{corr}(i)}{i_{corr}} \times 100 \quad (4)$$

که در این رابطه i_{corr} و $i_{corr}(i)$ به ترتیب چگالی جریان خوردگی در غیاب و در حضور بازدارنده را نشان می‌دهند.

جدول ۵. نتایج حاصل از پلاریزاسیون فولاد در دمای ۲۵ °C و غلظت‌های مختلف از بازدارنده L^1

C ($\mu\text{mol/lit}$)	I (mA/cm^2)	E (mV/SCE)	βa (mV/dec)	βc (mV/dec)	θ	η %
۰	۰/۰۰۹۵	۵۴۰	۰/۰۱۳۱	۰/۰۰۹۵	۰	۰
۱۰	۰/۰۰۷۹	۴۹۹	۰/۰۱۰۹	۰/۰۰۸۱	۰/۱۶۸	۱۶/۸
۲۰	۰/۰۰۷۵	۴۹۰	۰/۰۱۱۹	۰/۰۰۸۳	۰/۲۱	۲۱
۳۰	۰/۰۰۳۱	۴۸۹	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۹۲	۰/۶۷۳	۶۷/۳
۴۰	۰/۰۰۲۵	۴۶۵	۰/۰۱۳۷	۰/۰۰۸۲	۰/۷۳۶	۷۳/۷
۵۰	۰/۰۰۷۹	۴۸۵	۰/۰۱۲۳	۰/۰۰۸۴	۰/۱۶۸	۱۶/۸
۶۰	۰/۰۰۸۱	۵۰۲	۰/۰۱۱۱	۰/۰۰۹۵	۰/۱۴۷	۱۴/۷۳

منحنی قطبش فولاد براساس نتایج به دست آمده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. نمودار قطبش تافل کوپن فولادی در محلول ۰/۱ M HCl در حضور L^1 با غلظت‌های N_1 – N_6

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شیب خطوط تافلی کاتدی و آنودی در منحنی‌های قطبش کاملاً به غلظت L^1 وابسته هستند. در واقع، L^1 به عنوان یک بازدارنده مختلط، و تا اندازه‌ای متمایل به بازدارنده کاتدی، برای محافظت از فولاد در محیط خورنده اسیدی عمل می‌کند [۳۶، ۳۷].

با افزایش غلظت L^1 تا $40 \mu\text{mol/lit}$ چگالی جریان خوردگی برای واکنش آنودی به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند و پس از آن با افزایش غلظت بازدارنده مجدداً مقاومت قطبش کاهش و چگالی جریان خوردگی افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، واکنش کاتدی هم تقریباً متناسب با آن به تاخیر می‌افتد. بازده بازدارندگی از خوردگی فولاد براساس رابطه (۴) در غلظت بهینه L^1 تا ۷۳/۷٪ افزایش پیدا می‌کند.

۳-۳-۲- آزمایش‌های امپدانس الکتروشیمیایی

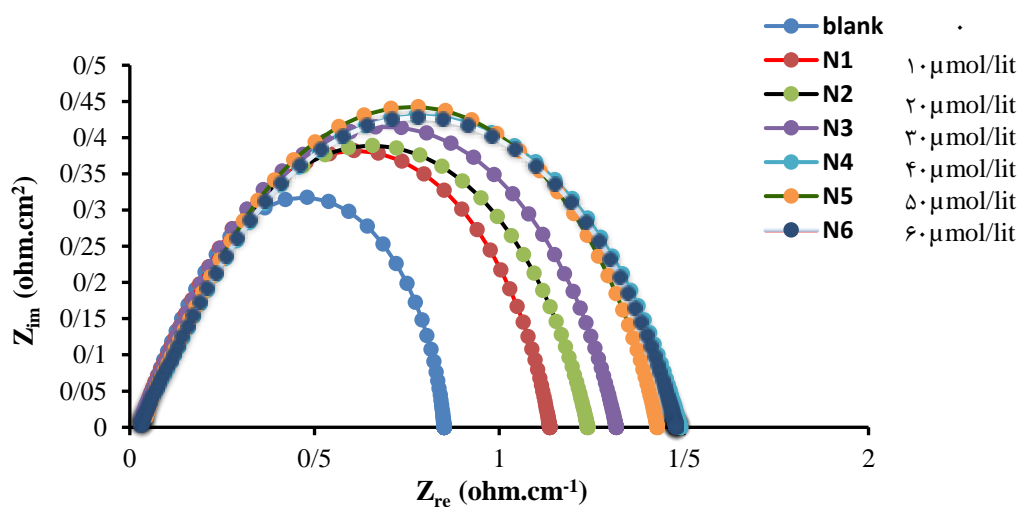
بعد از ۱ ساعت غوطه‌وری الکترودها در محلول الکترولیت، فرآیندهای صورت گرفته در مرز مشترک الکترودها/الکترولیت در دمای ۲۵ °C در حضور و یا در غیاب L^1 ، با غلظت‌های مختلف، با استفاده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت.

اندازه‌گیری‌های امپدانس بصورت نقطه به نقطه و براساس دامنه ولتاژ AC با بزرگی ۱۰ mV در محدوده فرکانسی ۱ mHz تا ۱۰۰ KHz انجام شده است. نتایج بدست آمده بطور خلاصه در جدول ۶ نشان داده شده است.

جدول ۶ مقادیر مقاومت انتقال بار، مقاومت محلول و درصد بازدارندگی از خوردگی حاصل از آزمون الکتروشیمیایی امپدانس در حضور بازدارنده L^۱

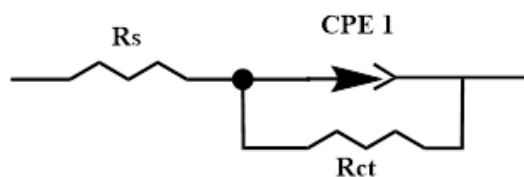
C ($\mu\text{mol/lit}$)	R _{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R _s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	η %
۰	۱۰۴/۲	۳/۰۷	۰
۱۰	۱۲۳/۷	۲/۵۷	۱۵/۷۶
۲۰	۱۳۹	۳/۰۹	۲۵/۰۳
۳۰	۱۴۱/۶	۴/۰۷	۲۶/۴۱
۴۰	۲۶۴/۲	۲/۹۸	۶۰/۵۶
۵۰	۱۳۷/۲	۳/۲۷	۲۴/۰۵
۶۰	۱۳۹/۸	۳/۲۷	۲۵/۴۶

نتایج ارائه شده در جدول ۶ برای غلظت‌های مختلف بازدارنده L^۱ روی الکتروود فولاد با نرم‌فزار Z-view [۳۸] برازش و منحنی‌ها نایکوئیست حاصل از آن در غیاب و در حضور غلظت‌های مختلف بازدارنده L^۱ در شکل ۷ ارائه شده است. با شبیه‌سازی داده‌های حاصل از امپدانس الکتروشیمیایی، مدار الکتریکی معادل برای خوردگی فولاد، شکل ۷، تعیین گردید.



شکل ۷. منحنی‌های امپدانس الکتروشیمیایی فولاد در محلول ۰/۱ M HCl در حضور L^۱ با غلظت‌های N۱-N۶

در مدار ارائه شده R_s نشان دهنده مقاومت محلول خورنده در غلظت‌های مختلف بازدارنده و R_{ct} مقاومت خوردگی یا مقاومت انتقال بار است که بزرگی آن مقاومت بیشتر در برابر خوردگی و افزایش قطر منحنی نایکوئیست را نشان می‌دهد. طبق نمودارهای نایکوئیست فقط یک عنصر ثابت زمانی، CPE، وجود دارد که با R_{ct} بصورت موازی بسته شده است [۳۹]. قابلیت بازدارنده L^۱ برای محافظت از خوردگی فولاد براساس نتایج حاصل از مطالعات امپدانس الکتروشیمیایی از رابطه (۵) بدست آمده است [۳۹]:



شکل ۸. مدار معادل مورد استفاده برای منحنی‌های نایکوئیست

$$\eta_p \% = \frac{R_{ct} - R_{ct(0)}}{R_{ct}} \times 100 \quad (5)$$

منحنی‌های نایکوئیست بدست آمده، بصورت نیم‌دایره‌های خوابیده هستند که توصیفی از زبری و عدم یکنواختی سطح الکتروود و میزان مقاومت انتقال بار در سطح الکتروود است [۴۰]. همچنین، قطر منحنی‌های نایکوئیست با افزایش غلظت بازدارنده L^1 تا $40 \mu\text{mol/lit}$ بزرگتر می‌شود که نشان دهنده کاهش حضور الکتروولیت در سطح فولاد و کاهش ثابت دی‌الکتریک موضعی فولاد به دلیل افزایش جذب یکنواخت L^1 روی سطح و کاهش میزان خوردگی فولاد است [۳۰]. زمانیکه غلظت بازدارنده L^1 از غلظت بهینه بیشتر شود، به دلیل افزایش برهمکنش‌ها بین مولکول‌های بازدارنده جذب شده در سطح فولاد و مولکول‌های بازدارنده در فاز محلول، پوشش تشکیل شده در سطح فولاد یکنواختی خود را از دست می‌دهد و با کاهش میزان کارایی پوشش ایجاد شده در سطح تاثیر عوامل خوردنده بر فولاد بیشتر شده و نرخ خوردگی آن افزایش پیدا می‌کند [۴۱].

نتیجه‌گیری

براساس آزمایش‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که درغیاب بازدارنده‌های موثر، فولاد A516 با قرار گرفتن در محیط 0.1 M HCl یکنواختی سطح خود را از دست داده و دستخوش خوردگی-حفره‌ای می‌شود. تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی، FE-SEM، نشان می‌دهد خوردگی ایجاد در سطح فولاد در محیط HCl در حضور بازدارنده جدید آزو-آزومتین با ساختار مسطح بر پایه ۲-آمینو نفتالن، L^1 ، در مقایسه با بازدارنده L^2 ، با ساختار غیر مسطح و بر پایه تریس(۲-آمینو اتیل)آمین، بطور موثری کاهش پیدا می‌کند. همچنین، تصاویر حاصل از میکروسکوپ نیروی اتمی، AFM، نیز کاهش خوردگی و کاهش زبری سطح فولاد در حضور بازدارنده L^1 و L^2 در محیط اسیدی را به خوبی تایید می‌کند.

از میان بازدارنده‌های سنتز شده، قابلیت بازدارنده L^1 ، با ساختار مسطح، برای پوشاندن یکنواخت سطح و محافظت از خوردگی فولاد A516 در محلول خوردنده HCl نسبت به بازدارنده L^2 ، با ساختار غیر مسطح، بیشتر است. قابلیت بازدارندگی L^1 کاملاً به غلظت بازدارنده وابسته است بطوریکه بازده بازدارندگی آن با افزایش غلظت تا مقدار بهینه، $40 \mu\text{mol/lit}$ ، تا 73.7% افزایش پیدا می‌کند و پس از آن با افزایش غلظت بازدارنده مجدداً میزان خوردگی، به دلیل از بین رفتن یکنواختی پوشش بازدارنده جذب شده در سطح فولاد، بیشتر می‌شود. نتایج حاصل از قطبش تافل فولاد تایید می‌کند که با افزایش غلظت بازدارنده L^1 به بالاتر از مقدار بهینه، چگالی جریان خوردگی نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین، آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نشان می‌دهد

با افزایش غلظت بازدارنده L^1 تا غلظت بهینه ثابت دی‌الکتریک موضعی فولاد بیشتر و میزان خوردگی آن کمتر می‌شود. پس از آن با افزایش غلظت بازدارنده و کاهش مقاومت انتقال بار مجدداً خوردگی فولاد بیشتر می‌شود. بنابراین، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد بازدارنده آزو-آزومتین L^1 ، با داشتن ساختاری مسطح و توانایی پوشاندن مراکز فعال در سطح فولاد، می‌تواند به عنوان پیشنهاد برای یک جزء مکمل در کنار سایر اجزا در بازدارنده‌های تجاری، نظیر آرموهیب، برای محافظت از فولاد A516 در محیط خورنده 0.1 M HCl مورد توجه قرار گیرد.

۴- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله مراتب سپاسگزاری خود از دانشگاه بوعلی سینا و دانشگاه اراک بخاطر حمایت مالی و تامین امکانات لازم برای انجام این فعالیت علمی را اعلام می‌دارند.

۵- مراجع

- [1] Chilingar, G. V., Mourhatch, R., & Al-Qahtani, G. D. (2013). *The fundamentals of corrosion and scaling for petroleum & environmental engineers*. Elsevier.
- [2] Kamaruzzaman, W. M. I. W. M., Nasir, N. A. M., Hamidi, N. A. S. M., Yusof, N., Shaifudin, M. S., Suhaimi, A. M. A. A. M., ... & Ghazali, M. S. M. (2022). 25 years of progress on plants as corrosion inhibitors through a bibliometric analysis using the Scopus database (1995–2020). *Arabian journal of Chemistry*, 15(4), 103655.
- [3] Saji, V. S., & Umoren, S. A. (Eds.). (2020). *Corrosion inhibitors in the oil and gas industry*. John Wiley & Sons.
- [4] Hashemi, S. J., Bak, N., Khan, F., Hawboldt, K., Lefsrud, L., & Wolodko, J. (2018). Bibliometric analysis of microbiologically influenced corrosion (MIC) of oil and gas engineering systems. *Corrosion*, 74(4), 468-486.
- [5] Brycki, B. E., Kowalczyk, I. H., Szulc, A., Kaczerewska, O., & Pakiet, M. (2018). Organic corrosion inhibitors. *Corrosion inhibitors, principles and recent applications*, 3, 33.
- [6] Chen, L., Lu, D., & Zhang, Y. (2022). Organic compounds as corrosion inhibitors for carbon steel in HCl solution: a comprehensive review. *Materials*, 15(6), 2023.
- [7] Awad, M. I. (2006). Eco friendly corrosion inhibitors: Inhibitive action of quinine for corrosion of low carbon steel in 1 m HCl. *Journal of applied electrochemistry*, 36(10), 1163-1168.
- [8] Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116.
- [9] Sastri, V. S. (1998). *Green corrosion inhibitors: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- [10] Banerjee, S., Srivastava, V., & Singh, M. M. (2012). Chemically modified natural polysaccharide as green corrosion inhibitor for mild steel in acidic medium. *Corrosion Science*, 59, 35-41.

- [11] Malik, M. A., Hashim, M. A., Nabi, F., Al-Thabaiti, S. A., & Khan, Z. (2011). Anti-corrosion ability of surfactants: a review. *International journal of electrochemical science*, 6(6), 1927-1948.
- [12] Finšgar, M., & Jackson, J. (2014). Application of corrosion inhibitors for steels in acidic media for the oil and gas industry: A review. *Corrosion science*, 86, 17-41.
- [13] Tiu, B. D. B., & Advincula, R. C. (2015). Polymeric corrosion inhibitors for the oil and gas industry: Design principles and mechanism. *Reactive and Functional Polymers*, 95, 25-45.
- [14] Ejlali, A., & Arab, A. (2025). The inhibitory effect of different surfactants on the corrosion of A335 alloy steel in sodium hydroxide solution. *Applied Chemistry Today*, 20(75) 151-162.
- [15] Goyal, M., Kumar, S., Bahadur, I., Verma, C., & Ebenso, E. E. (2018). Organic corrosion inhibitors for industrial cleaning of ferrous and non-ferrous metals in acidic solutions: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 565-573.
- [16] Kadhim, A., Betti, N., Al-Bahrani, H. A., Al-Ghezi, M. K. S., Gaaz, T., Kadhum, A. H., & Alamiery, A. (2021). A mini review on corrosion, inhibitors and mechanism types of mild steel inhibition in an acidic environment. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 10(3), 861-884.
- [17] Verma, C., & Quraishi, M. A. (2021). Recent progresses in Schiff bases as aqueous phase corrosion inhibitors: Design and applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 446, 214105.
- [18] Ahmed, S. K., Ali, W. B., & Khadom, A. A. (2019). Synthesis and investigations of heterocyclic compounds as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid. *International Journal of Industrial Chemistry*, 10(2), 159-173.
- [19] Schmitt, G. (1984). Application of inhibitors for acid media: report prepared for the European federation of corrosion working party on inhibitors. *British Corrosion Journal*, 19(4), 165-176.
- [20] Hashim, N. Z. N., Kahar, M. A. M., Kassim, K., Embong, Z., & Anouar, E. H. (2020). Experimental and theoretical studies of azomethines derived from benzylamine as corrosion inhibitors of mild steel in 1 M HCl. *Journal of Molecular Structure*, 1222, 128899.
- [21] Faiz, M., Zahari, A., Awang, K., & Hussin, H. (2020). Corrosion inhibition on mild steel in 1 M HCl solution by *Cryptocarya nigra* extracts and three of its constituents (alkaloids). *RSC advances*, 10(11), 6547-6562.
- [22] Ansari, K. R., Quraishi, M. A., & Singh, A. (2014). Schiff's base of pyridyl substituted triazoles as new and effective corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion science*, 79, 5-15.
- [23] Leçe, H. D., Emregül, K. C., & Atakol, O. (2008). Difference in the inhibitive effect of some Schiff base compounds containing oxygen, nitrogen and sulfur donors. *Corrosion science*, 50(5), 1460-1468.
- [24] Shokry, H. (2014). Molecular dynamics simulation and quantum chemical calculations for the adsorption of some Azo-azomethine derivatives on mild steel. *Journal of Molecular Structure*, 1060, 80-87.

- [25] Dueke-Eze, C. U., Madueke, N. A., Iroha, N. B., Maduelosi, N. J., Nnanna, L. A., Anadebe, V. C., & Chokor, A. A. (2022). Adsorption and inhibition study of N-(5-methoxy-2-hydroxybenzylidene) isonicotinohydrazide Schiff base on copper corrosion in 3.5% NaCl. *Egyptian Journal of Petroleum*, 31(2), 31-37.
- [26] Iroha, N. B., Dueke-Eze, C. U., James, A. O., & Fasina, T. M. (2021). Newly synthesized N-(5-nitro-2-hydroxybenzylidene)pyridine-4-amine as a high-potential inhibitor for pipeline steel corrosion in hydrochloric acid medium. *Egyptian Journal of Petroleum*, 30 (2), 55-61.
- [27] Zhang, W., Li, H. J., Wang, M., Wang, L. J., Shang, F., & Wu, Y. C. (2018). Halogen-substituted acridines as highly effective corrosion inhibitors for mild steel in acid medium. *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(44), 25349-25364.
- [28] Gaikani, Z., Khanmohammadi, H., & Hassannejad, H. (2023). Inhibitive Effect of New Azole-Azomethine Derivatives on Mild Steel Corrosion in HCl Solution: Electrochemical, Scanning Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy Studies. *steel research international*, 94(9), 2300116.
- [29] Khanmohammadi, H., & Darvishpour, M. (2009). New azo ligands containing azomethine groups in the pyridazine-based chain: Synthesis and characterization. *Dyes and Pigments*, 81(3), 167-173.
- [30] Mouheddin, T. A., Saviour, A. U., Ime, B. O., & Shaikh, A. A. (2018). Isoxazolidine derivatives as corrosion inhibitors for low carbon steel in HCl solution: experimental, theoretical and effect of KI studies. *Royal Society of Chemistry*, 8, 1764-1776.
- [31] ASTM, Corrosion Tests and Standards, ASTM International, 1995.
- [32] Rostron, P., & Kasshanna, S. (2015). Novel synthesis of vegetable oil derived corrosion inhibitors. *International Journal of Corrosion*, 1, 851698.
- [33] Graiver, D., Dacomba, R., Khawaji, M., Jaros, A., Berglund, K., & Narayan, R. (2012). Steel-Corrosion Inhibitors Derived from Soybean Oil. *Journal of American Oil Chemical Society*, 89, 1895–1903.
- [34] Verma, C., Ebenso, E. E., Vishal, Y., & Quraishi, M. A. (2016). Dendrimers: a new class of corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl: experimental and quantum chemical studies. *Journal of Molecular Liquids*, 224, 1282-1293.
- [35] Ahamad, I., Prasad, R., & Quraishi, M. A. (2010). Thermodynamic, electrochemical and quantum chemical investigation of some Schiff bases as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solutions. *Corrosion Science*, 52(3), 933-942.
- [36] Larabi, L., Harek, Y., Benali, O., & Ghalem, S. (2005). Hydrazide derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl. *Progress in Organic Coatings*, 54(3), 256-262.
- [37] Yousefi, A., Javadian, S., & Neshati, J. (2014). A new approach to study the synergistic inhibition effect of cationic and anionic surfactants on the corrosion of mild steel in HCl solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(13), 5475-5489.

- [38] Z-View, Scribner Associate Inc. <http://www.scribner.com/software/generalelectrochemistry/68-general-electrochemistr/376-zview-for-windows/>.
- [39] Zhang, W., Li, H. J., Wang, Y., Liu, Y., Gu, Q. Z., & Wu, Y. C. (2018). Gravimetric, electrochemical and surface studies on the anticorrosive properties of 1-(2-pyridyl)-2-thiourea and 2-(imidazol-2-yl)-pyridine for mild steel in hydrochloric acid. *New Journal of Chemistry*, 42(15), 12649-12665.
- [40] Farag, A. A., Migahed, M. A., & Al-Sabagh, A. M. (2015). Adsorption and inhibition behavior of a novel Schiff base on carbon steel corrosion in acid media. *Egyptian Journal of Petroleum*, 24(3), 307-315.
- [41] Umoren, S. A., Solomon, M. M., Madhankumar, A., & Obot, I. B. (2020). Exploration of natural polymers for use as green corrosion inhibitors for AZ31 magnesium alloy in saline environment. *Carbohydrate polymers*, 230, 115466.