



Semnan University

Applied Chemistry Today

Journal homepage: <https://chemistry.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2981-2437



Research Article

The inhibitory effect of different surfactants on the corrosion of A335 alloy steel in sodium hydroxide solution

Abbas Ejlali[✉], Ali Arab^{*✉}

Department of Chemistry, Semnan University, Semnan, Iran

PAPER INFO

Article history:

Received: 20/Jul/2024

Revised: 08/Oct/2024

Accepted: 31/May/2025

Keywords:

A335 steel,
corrosion inhibitors,
sodium hydroxide,
inhibition efficiency,
electrochemical impedance
spectroscopy,
Tafel polarization.

ABSTRACT

In this study, the corrosion inhibition performance of five different surfactants, including three cationic surfactants: dodecyl trimethyl ammonium bromide (DOTAB), cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB), cetyl trimethyl ammonium chloride (CTAC) a nonionic surfactant: Triton X-100, and an anionic surfactants: sodium dodecyl sulfate (SDS), was investigated on A335 alloy steel in a 4M sodium hydroxide solution. To evaluate the corrosion behavior, electrochemical methods including Tafel polarization and electrochemical impedance spectroscopy were employed. The results showed that all surfactants reduced the corrosion rate of the steel sample, but the highest inhibition was related to DOTAB with an efficiency of 84.1% and SDS with an efficiency of 85.3%. FE-SEM images also confirmed the reduction of surface damage in the presence of these inhibitors. The results of this study indicate that the use of surfactants can be an effective and economical method to increase the corrosion resistance of A335 steel in alkaline environments.

DOI: <https://doi.org/10.22075/chem.2025.38209.2375>

© 2025 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: Associate Professor of Physical Chemistry, E-mail address: a.arab@semnan.ac.ir

How to cite this article: Ejlali, A. & Arab, A. (2025). The inhibitory effect of different surfactants on the corrosion of A335 alloy steel in sodium hydroxide solutio. Applied Chemistry Today, 20 (75) 151-162. (in Persian)

اثر بازدارندگی سورفکتانت های مختلف روی خوردگی فولاد آلیاژی A335 در محلول

سدیم هیدروکسید

عباس اجلالی، علی عرب*

دانشکده شیمی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰	در این پژوهش، عملکرد بازدارندگی خوردگی پنج نوع سورفکتانت مختلف شامل سه سورفکتانت کاتیونی دو دسیل تری متیل آمونیوم بروماید (DOTAB)، ستیل تری متیل آمونیوم بروماید (CTAB) ستیل تری متیل آمونیوم کلراید (CTAC)، یک سورفکتانت غیر یونی: تریتون ایکس ۱۰۰ (Triton X-100) و یک سورفکتانت آنیونی: سدیم دو دسیل سولفات (SDS) روی فولاد آلیاژی A335 در محیط سدیم هیدروکسید ۴ مولار بررسی شد. برای ارزیابی رفتار خوردگی، از روش های الکتروشیمیایی پلاریزاسیون تافل و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده گردید. نتایج حاصل نشان داد که تمامی سورفکتانت ها موجب کاهش سرعت خوردگی نمونه فولاد شده اند، ولی بیشترین راندمان بازدارندگی مربوط به DOTAB با راندمان ۸۴/۱ درصد و SDS با راندمان ۸۵/۳ می باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز کاهش آسیب سطحی در حضور این بازدارنده ها را تأیید نمودند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که استفاده از سورفکتانت ها می تواند روشی مؤثر و اقتصادی برای افزایش مقاومت خوردگی فولاد A335 در محیط های قلیایی باشد.
کلمات کلیدی: فولاد A335، بازدارنده های خوردگی، سدیم هیدروکسید، راندمان بازدارندگی، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، پلاریزاسیون تافل.	
	DOI: https://doi.org/10.22075/chem.2025.38209.2375
	This is an open access article under the CC-BY-SA 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

۱- مقدمه

در بسیاری از کشورها خوردگی عامل اصلی مسائل اقتصادی و نگرانی های ایمنی است. هنگامی که یک فلز خورده می شود، ویژگی های مکانیکی آن مانند سختی و دوام به طور قابل توجهی بدتر می شود. از این رو، روش های پیشگیری مناسب برای کاهش خوردگی باید اجرا شود تا از خطر حوادث فاجعه بار جلوگیری شود [۱-۲]. خوردگی به عنوان تخریب مواد فلزی توسط یک فرآیند الکتروشیمیایی یا فرسایش مداوم فلزات در اثر یک محیط خورنده توصیف می شود [۳]. خوردگی مواد منجر به خطراتی برای پایداری خط تولید، کاهش راندمان و باعث تعطیلی و ضرر و زیان کارخانه و همچنین آلودگی توسط محصولات تولیدی می شود [۴]. هزینه های خوردگی را می توان به دو قسمت مستقیم و غیرمستقیم بیان کرد. نمونه هایی از هزینه مستقیم مانند تعمیر و تعویض قطعات خورده شده است. هزینه غیر مستقیم مربوط به تخریب عمده است (مانند فرو نشستن زمین در اثر نشت روغن و مواد از لوله های نازک شده در اثر خوردگی) [۱]. انواع خوردگی ها را می توان به خوردگی عمومی (یکنواخت)، خوردگی حفره ای، خوردگی شیاری، خوردگی بین دانه ای، خوردگی تنشی (شکست ناشی از عوامل محیطی)،

خوردگی گالوانیک، و خوردگی فرسایشی طبقه بندی کرد که این امر به مورفولوژی و نوع آسیب فلز بستگی دارد [۲]. روش های خاصی برای محافظت فلز از خوردگی وجود دارد مانند: ایجاد پوشش^۱، آلیاژ سازی^۲، حفاظت کاتدی^۳، حفاظت آندی^۴، و اخیراً استفاده از لیزر نیز برای این منظور و پاکسازی سطحی نیز به عنوان روشی برای بهبود خواص زبری و سختی و مقاومت در برابر خوردگی بکار می رود [۵]. یکی از روش های بسیار مؤثر برای کاهش اثر خوردگی استفاده از بازدارنده های خوردگی^۵ است که امروزه انواع بازدارنده های آلی و معدنی موجود و در حال بررسی هستند. تفاوت بین بازدارنده آلی و معدنی به عملکرد مکانیسم های حفاظتی آنها مربوط می شود عملکرد بازدارنده های آلی از طریق مکانیسم جذب سطحی بوده و بازدارنده های معدنی از نقاط کاتدی و آندی حفاظت می کند. به عبارت دیگر بازدارنده های خوردگی آلی که لایه یا فیلمی محافظ روی سطح فلز تشکیل داده یا با انجام نوعی واکنش با فلز از خوردگی بیشتر ممانعت می کنند. اما بازدارنده های معدنی از طریق کم کردن قدرت خوردگی محیط از خوردگی جلوگیری می کنند [۶]. سورفکتانت ها^۶ که کاربردهای متنوعی دارند [۷-۸]، تحت عنوان بازدارنده نیز به تازگی مورد توجه ویژه ای قرار گرفته اند [۹]. سورفکتانت ها ترکیباتی هستند که در طیف وسیعی از حوزه ها، از محیط های صنعتی گرفته تا آزمایشگاه های تحقیقاتی، یافت می شوند و بخشی از زندگی روزمره ما هستند. به دلیل ساختار منحصر به فردشان، می توانند خواص سطحی را به شدت تغییر دهند. این اثر برای فرآیندهای صنعتی مانند شناورسازی، صنایع آرایشی و غذایی، دارورسانی، امولسیون سازی، پرداخت شیمیایی-مکانیکی و همچنین برای مهار خوردگی مهم است [۱۰]. کاملاً مشخص است که خوردگی هرگز متوقف نمی شود، اما می توان دامنه و شدت آن را کاهش داد. افزودن سورفکتانت ها به محیط های خورنده مانند محلول های اسیدی و بازی یکی از روش های دستیابی به این هدف است. مطالعات متعدد نشان داده است که اکثر مهارکننده های آلی روی سطح فلز جذب می شوند و مولکول های آب را از سطح جدا کرده و یک لایه فشرده به عنوان مانع تشکیل می دهند [۱۱]. سورفکتانت ها مزایایی از جمله بازده بازدارندگی بالا، سمیت پایین و تولید آسان دارند. به طور کلی در محلول آبی، واکنش بازدارنده مولکول های سورفکتانت نیز ممکن است به دلیل جذب سطحی فیزیکی (الکترواستاتیک) یا جذب سطحی شیمیایی روی سطح فلزی، بسته به بار سطحی جامد و تغییر انرژی آزاد انتقال یک زنجیره هیدروکربنی از آب به سطح جامد باشد [۱۲-۱۳].

¹ coating² alloying³ cathodic protection⁴ anodic protection⁵ Corrosion inhibitors⁶ Surfactants

سورفکتانت ها شامل سه نوع سورفکتانت های غیر یونی^۱، سورفکتانت های یونی (آنیونی و کاتیونی)^۲، و سورفکتانت های آمفوتریک^۳ [۱۴] می باشند که هر کدام کاربردهای خاص خود را دارند. در مطالعه بازدارندگی خوردگی با استفاده از سورفکتانت ها، غلظت بحرانی مایسل (CMC)^۴ می تواند یک پارامتر مهم باشد. گزارش شده است هنگامی که غلظت سورفکتانت ها روی سطح جامد به اندازه کافی بالا باشد، ساختارهای سازمان یافته مایسل ها بصورت تک لایه یا چند لایه تشکیل می شوند که با مسدود کردن سطح فلزی و پوشش آن واکنش خوردگی را کاهش می دهند [۱۵]. در زیر نقطه CMC، مولکول های فعال سطحی منفرد یا مونومر تمایل دارند بر روی سطح در معرض خوردگی جذب شوند. بنابراین تجمع بین سطحی، کشش سطحی را کاهش می دهد که منجر به مهار خوردگی می شود. در بالای نقطه CMC، سطح با بیش از یک تکه لایه پوشیده می شود. بنابراین هر ماده فعال سطحی اضافی بالاتر از CMC منجر به تشکیل مایسل ها یا چندین لایه جذب شده روی سطوح می شود [۱۶]. استفاده از سورفکتانت ها به عنوان بازدارنده خوردگی امروزه بسیار مورد توجه می باشد. در سال ۲۰۱۸ ترسیب الکتروشیمیایی نیکل در حضور سورفکتانت های Triton X100, SDS, CTAB انجام شد و مطالعات خوردگی نشان داد حضور سورفکتانت ها مقاومت به خوردگی این پوشش های نیکل را افزایش می دهد و سورفکتانت SDS عملکرد بهتری را نسبت به بقیه سورفکتانت ها دارد [۱۷]. همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۱ اثر بازدارندگی سورفکتانت های Triton X100 و CTAB بر خوردگی نیکل در محلول قلیایی بررسی شده است. در این پژوهش از دو سورفکتانت ذکر شده بعنوان بازدارنده های خوردگی نیکل در سه دمای ۲۵، ۴۰ و ۶۰ درجه سلسیوس استفاده شده است که اثر بازدارندگی دو سورفکتانت بصورت مجزا و ترکیب با هم مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت در غلظت بهینه CTAB با 150ppm و Triton X100 با 200ppm بصورت هم افزایی بیشترین بازدارندگی خوردگی مشاهده شده است [۱۸].

فولاد A335 که شامل کروم و مولیبدن است، به دلیل این ترکیب شیمیایی، مقاومت زیادی در مقابل دما، فشار و خوردگی دارد [۱۹]. همچنین تحقیقات جدید نشان داده اند که افزودن مقدار اندکی مولیبدن به پوشش های بر پایه آهن منجر به ساختار کاملاً آمورف می شود که به صورت قابل توجهی مقاومت خوردگی را افزایش می دهد [۲۰]. به خاطر ویژگی هایی نظیر قابلیت جوشکاری مناسب، افزایش استحکام و بالا رفتن دامنه کاربرد در صنایع مختلف، امروزه انواع گرید لوله فولادی A335 نظیر P11، P22 و P5 کاربرد بسیاری در صنایع تولیدی، پتروشیمی و نیروگاه ها دارد.

در مقاله حاضر، اثر سورفکتانت های مختلف آنیونی، کاتیونی و غیر یونی روی خوردگی فولاد A335 با آنالیزهای پلاریزاسیون تافل، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی و میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شده است. با محاسبه راندمان بازدارندگی

¹ Nonionic

² Anionic, Cationic

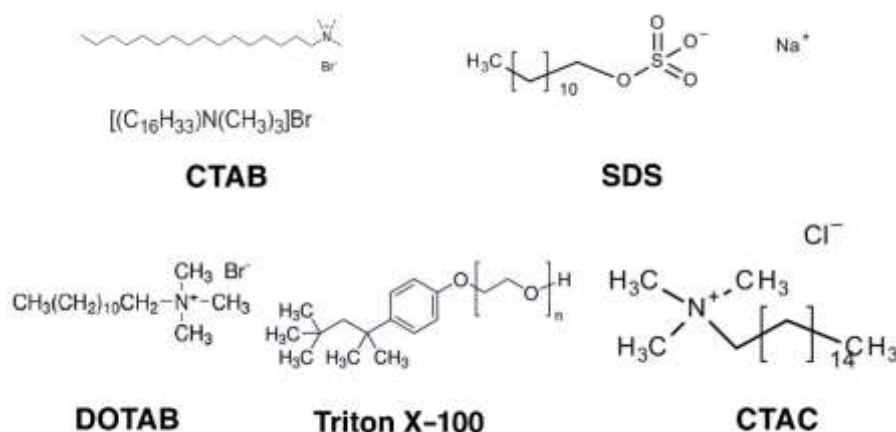
³ Zwitterionic

⁴ Critical micelle concentration

سورفکتانت هایی که عملکرد بهتری در جلوگیری از خوردگی این نمونه فولاد در محیط سدیم هیدرواکسید دارند مشخص شده اند.

۲- بخش تجربی

فولاد مورد استفاده در این پژوهش، نمونه فولاد تیپ A335 از شرکت Henan از کشور چین می باشد که ترکیب آن در جدول ۱ نشان داده شده است. سطحی معادل ۱ سانتی متر مربع از این نمونه فولاد جهت مطالعات الکتروشیمیایی استفاده گردید. سورفکتانت های مورد بررسی در این تحقیق، شامل سه سورفکتانت کاتیونی: دو دسیل تری متیل آمونیوم بروماید (DOTAB)، ستیل تری متیل آمونیوم بروماید (CTAB)، ستیل تری متیل آمونیوم کلراید (CTAC)، یک سورفکتانت غیر یونی: تریتون ایکس ۱۰۰ (Triton X-100) و یک سورفکتانت آنیونی: سدیم دو دسیل سولفات (SDS) می باشند. در شکل ۱ شماتیک ساختار سورفکتانت ها نمایش داده شده اند.



شکل ۱. ساختار سورفکتانت های استفاده شده در تحقیق حاضر.

برای بررسی بازدارندگی سورفکتانت ها از روش های پلاریزاسیون تافل و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شده است. محلول الکترولیت (خورنده) مورد استفاده سدیم هیدروکسید 4M می باشد. جهت انجام آزمونهای پلاریزاسیون تافل و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی از یک سل سه الکترودی استفاده گردید. در این سل از الکترود نقره/نقره کلرید به عنوان الکترود مرجع، الکترود پلاتین به عنوان الکترود کمکی و نمونه فولاد به عنوان الکترود کار استفاده شد. این سل به دستگاه پتانسیواستات/گالوانواستات ایویوم مدل ورتکس ساخت کشور هلند متصل گردید. تمام تست ها در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انجام شده اند. در ابتدای آزمون های پلاریزاسیون تافل جهت به دست آوردن شرایط پتانسیل مدار باز یا پتانسیل خوردگی، الکترود کار به مدت ۳۰ دقیقه جهت رسیدن به حالت تعادل درون محلول سدیم هیدروکسید 4M غوطه ور شد. منحنی های پلاریزاسیون تافل با تغییر پتانسیل در محدوده ی تافل، ± 300 میلی ولت نسبت به پتانسیل مدار باز و با سرعت روبش پتانسیل

۵ میلی ولت بر ثانیه ثبت شدند. منحنی‌های پلاریزاسیون تجزیه و تحلیل و ناحیه‌ی تافلی آنها شناسایی و تا پتانسیل خوردگی برون‌یابی گردید و اطلاعات خوردگی به دست آمد. آنالیزهای امپدانس در پتانسیل خوردگی انجام شدند. همچنین در این آنالیز، دامنه پتانسیل AC برابر با ۵ میلی ولت و محدوده فرکانس ۱۰۰ کیلو هرتز تا ۵۰ میلی هرتز مورد استفاده قرار گرفت. برازش داده‌های امپدانس، توسط نرم افزار Z-View انجام شد. مورفولوژی سطح نمونه فولاد با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FESEM) مدل MIRA3 محصول شرکت TESCAN کشور جمهوری چک بررسی گردید.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی عناصر نمونه فولاد A335 بر حسب درصد وزنی.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0.1	0.32	0.52	0.01	0.007	8.9	0.95	0.08	0.017
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	N	Fe	
0.02	0.15	0.07	Trace	0.23	0.01	0.07	Base	

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- آنالیزهای الکتروشیمیایی

ابتدا خوردگی فولاد در محلول سدیم هیدروکسید 4M بدون حضور بازدارنده (محلول شاهد) با استفاده از آزمون های پلاریزاسیون تافل و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بررسی گردید. سپس غلظت مشخصی (30 ppm) از هر یک از سورفکتانت های CTAB, DOTAB, SDS, CTAC, Triton X100 به صورت مجزا به محلول اضافه گردید و سپس با استفاده از آزمون های پلاریزاسیون تافل و طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی رفتار بازدارندگی هر یک از این سورفکتانت ها بررسی گردید. در شکل ۲ نمودارهای تافل و نایکوئیست و در جداول ۲ و ۳ پارامترهای خوردگی مربوطه گزارش شده اند.

در محلول آبی و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس، CMC سورفکتانت SDS برابر با 8.2 میلی مولار (2360 ppm)، CMC سورفکتانت CTAB برابر با 0.92 میلی مولار (335 ppm)، CMC سورفکتانت DOTAB 15.3 میلی مولار (4700 ppm)، CMC سورفکتانت Triton X100 0.24 میلی مولار (150 ppm) و CMC سورفکتانت CTAC برابر با 1.3 میلی مولار (416 ppm) می باشد [۲۱-۲۲]. لازم به توضیح است که برای سورفکتانت های یونی در محیطهای اسیدی یا قلیایی این مقادیر CMC کاهش می‌یابند. همچنین دستیابی به راندمان بازدارندگی بالاتر با استفاده از غلظت کم سورفکتانت موضوعی بسیار مهم می باشد به همین دلیل در پژوهش حاضر، غلظت 30 ppm از سورفکتانت ها مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر پوشش سطح (θ) با دو روش پلاریزاسیون تافل و امپدانس الکتروشیمیایی قابل محاسبه است که روابط مربوط به ترتیب در معادلات ۱ و ۲ آورده شده است [۲۳].

$$\theta = \frac{i_{corr}^0 - i_{corr}}{i_{corr}^0} \quad (1)$$

i_{corr}^0 در رابطه ۱ نشان دهنده شدت جریان خوردگی در غیاب بازدارنده و i_{corr} نشان دهنده شدت جریان خوردگی در حضور بازدارنده می باشد.

$$\theta = \frac{R_{corr} - R_{corr}^0}{R_{corr}} \quad (2)$$

در رابطه (۲) R_{corr}^0 مقاومت در برابر خوردگی (مقاومت انتقال بار) در غیاب بازدارنده و R_{corr} مقاومت در برابر خوردگی در حضور بازدارنده را نشان می دهد. همچنین با داشتن θ طبق رابطه ۳ می توان راندمان بازدارندگی را محاسبه کرد [۲۳-۲۴].

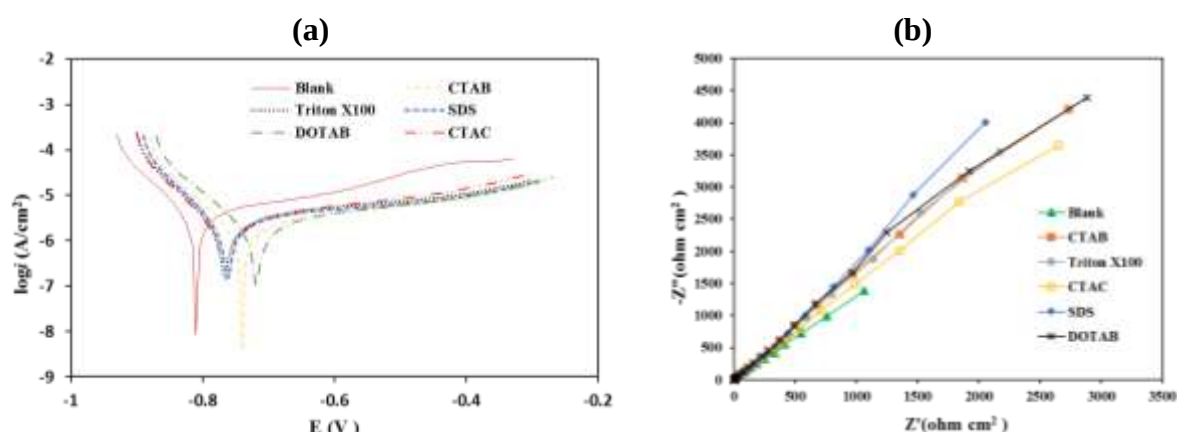
$$IE\% = \theta \times 100 \quad (3)$$

نتایج جدول ۲ نشان دهنده جابجایی پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر مثبت می باشد (پتانسیل خوردگی از -828 mV تا -735 mV جابجا شده است). جابجایی پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر مثبت نشان می دهد این بازدارنده ها از نوع آندی می باشند و با کاهش سرعت واکنش آندی ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$) باعث کاهش سرعت خوردگی می شوند. مقادیر شدت جریان خوردگی نیز در این جدول گزارش شده اند که مشاهده می شود در حضور سورفکتانت ها شدت جریان خوردگی کاهش یافته است. و بیشترین راندمان در این قسمت به ترتیب مربوط به سورفکتانت های کاتیونی DOTAB و CTAB و سورفکتانت آنیونی SDS می باشد. مقادیر زیاد شیب های تافل آندی نشان دهنده تشکیل فیلمهای سطحی (ناشی از جذب سطحی سورفکتانت و محصولات خوردگی) روی سطح نمونه فولاد می باشد.

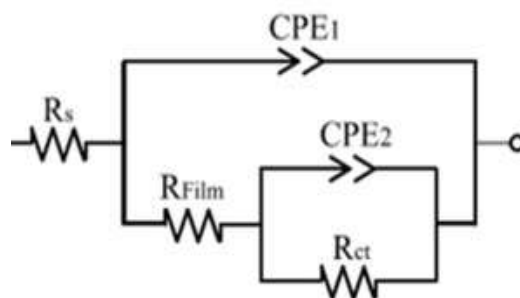
دیگرام های نایکوئیست موجود در شکل ۲ شامل دو نیم دایره فرورفته در یکدیگر می باشند که توسط مدار معادل نمایش داده شده در شکل ۳ برازش شده اند. در این مدار R_s نشان دهنده مقاومت محلول خورنده و R_{ct} مربوط به مقاومت خوردگی یا مقاومت انتقال بار بوده که بزرگی آن نشان دهنده مقاومت بیشتر در برابر خوردگی می باشد. این مقاومت با عنصر فاز ثابت مربوط به لایه دوگانه الکتریکی (CPE2) بصورت موازی بسته شده است. R_{Film} مقاومت فیلم سطحی (لایه محافظ) تشکیل شده روی سطح نمونه فولاد می باشد و عنصر فاز ثابتی (CPE1) که با این مقاومت بصورت موازی بسته شده است مربوط به لایه محافظ می باشد. لایه محافظ می تواند مربوط به لایه پسیو روی سطح و یا لایه بازدارنده ناشی از جذب سطحی سورفکتانت روی سطح نمونه فولاد باشد. مقادیر این پارامترها در جدول ۳ گزارش شده اند که بیشترین مقاومت در برابر خوردگی مربوط به سورفکتانت کاتیونی DOTAB و سورفکتانت آنیونی SDS می باشد. بنابراین نتایج آنالیزهای تافل و امپدانس در این قسمت نشان می دهد که از بین سورفکتانت های مطالعه شده، سورفکتانت کاتیونی DOTAB و سورفکتانت آنیونی SDS راندمان بازدارندگی بزرگتری برای نمونه فولاد A335 در محیط سود ۴M دارند.

در این پژوهش، تمامی سورفکتانت ها در غلظت ۳۰ ppm مورد استفاده قرار گرفتند که این غلظت پایین تر از مقدار CMC است. در این شرایط، سورفکتانت ها به صورت مونومر در محلول حضور داشته و با جذب مستقیم روی سطح فلز، لایه ای محافظ ایجاد

می‌کنند که مانع از تماس یون‌های خورنده با سطح فولاد می‌شود. عملکرد مطلوب سورفکتانت‌های DOTAB و SDS در این غلظت پایین نشان می‌دهد که جذب سطحی مؤثر، عامل اصلی در بازدارندگی خوردگی بوده است. به ویژه سورفکتانت‌های کاتیونی به دلیل برهم‌کنش الکترواستاتیک قوی‌تر با سطح منفی بار فولاد، بازده بهتری نشان داده‌اند. همچنین سورفکتانت SDS با وجود فاصله زیاد از CMC، به واسطه ویژگی‌های ساختاری خود توانسته است بازدارندگی قابل توجهی داشته باشد. بنابراین، تفاوت در راندمان بازدارندگی را می‌توان به نوع سورفکتانت، بار سطحی، ساختار مولکولی و فاصله از نقطه CMC نسبت داد.



شکل ۲. نمودارهای پلاریزاسیون تافل (a) و نایکوئیست (b) فولاد A335 در محلول سود 4M در غیاب و در حضور بازدارنده‌های مختلف در دمای ۲۵ درجه سلسیوس.



شکل ۳. مدار معادل مورد استفاده برای دیاگرام‌های نایکوئیست موجود در شکل ۲.

جدول ۲. پارامترهای خوردگی فولاد A335 در محلول سود 4M بدست آمده با روش تافل برای سورفکتانت‌های مختلف در دمای ۲۵ درجه سلسیوس.

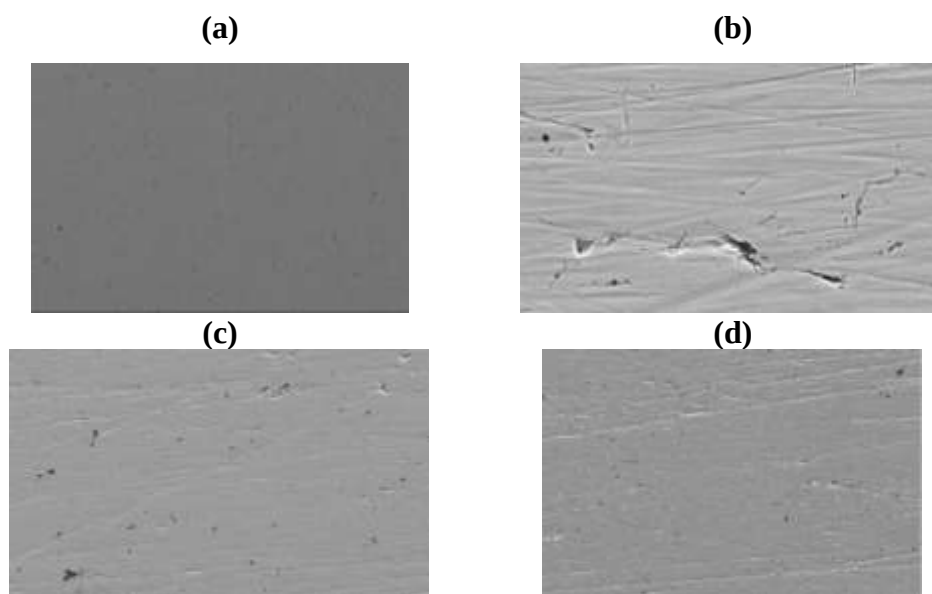
surfactant	E_{corr} (V)	i_{corr} (A/cm ²)	β_a (V/dec)	$-\beta_c$ (V/dec)	θ	(IE%)
Blank	-0.828	3.25×10^{-6}	0.613	0.064	-----	-----
CTAB	-0.762	1.79×10^{-6}	0.480	0.068	0.450	45.0
Triton X100	-0.786	2.35×10^{-6}	0.514	0.069	0.278	27.8
SDS	-0.779	1.83×10^{-6}	0.421	0.075	0.436	43.6
DOTAB	-0.735	1.67×10^{-6}	0.392	0.081	0.485	48.5
CTAC	-0.785	1.97×10^{-6}	0.316	0.065	0.393	39.3

جدول ۳. پارامترهای خوردگی فولاد A335 در محلول سود 4M بدست آمده با روش امپدانس الکتروشیمیایی برای سورفکتانت های مختلف در دمای ۲۵ درجه سلسیوس.

Surfactant	R_s ($\Omega \text{ cm}^2$)	R_{ct} ($\Omega \text{ cm}^2$)	R_{film} ($\Omega \text{ cm}^2$)	CPE_2 ($\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^n$)	n_2	CPE_1 ($\Omega^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^n$)	n_1	Θ	(IE%)
Blank	1.47	1.9×10^5	0.66	0.0011	0.59	0.00007	1.00	-----	-----
CTAB	1.32	9.9×10^5	0.29	0.0007	0.65	0.00001	0.99	0.808	80.8%
Triton X100	1.30	8.5×10^5	0.24	0.0009	0.65	0.00001	0.99	0.776	77.6%
SDS	1.31	1.3×10^6	0.22	0.0008	0.66	0.00001	1.00	0.853	85.3%
DOTAB	1.20	1.2×10^6	0.45	0.0008	0.65	0.00001	0.98	0.841	84.1%
CTAC	1.30	9.0×10^5	0.13	0.0009	0.68	0.00001	1.00	0.788	78.8%

۳-۲- آنالیزهای SEM

تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۴ نمایش داده شده است. در این تصاویر (شکل 3a) سطح فولاد کاملاً تمیز شده قبل از قرار گرفتن در محلول خورنده را نشان می دهد. تصویر فولاد خورده شده در محلول سود ۴M بدون حضور بازدارنده در مدت زمان ۶ ساعت و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل 3b نشان داده شده است، که در این شکل مواضع خوردگی توسط سود ۴M بخوبی قابل مشاهده می باشد. تصویر فولاد در محلول سود با حضور بازدارنده SDS و با غلظت کل ۳۰ ppm در مدت زمان ۶ ساعت و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد نیز در شکل 3c نمایش داده شده است، که نشان دهنده کاهش خوردگی نسبت به حالت بدون بازدارنده می باشد. تصویر فولاد در محلول سود با حضور بازدارنده DOTAB با غلظت ۳۰ ppm در مدت زمان ۶ ساعت و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد در شکل 3d نمایش داده شده است، که در این تصویر اثر بازدارندگی بخوبی قابل مشاهده می باشد که میزان خوردگی و ناهمواری های سطح نسبت به حالت فولاد در محیط خورنده بدون بازدارنده کاهش یافته است.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به نمونه فولاد (a) ، نمونه فولاد در محیط خورنده بدون بازدارنده (b) ، نمونه فولاد در حضور بازدارنده SDS (c) ، و نمونه فولاد در حضور بازدارنده DOTAB (d).

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش به ارزیابی عملکرد پنج سورفکتانت مختلف (سه نوع کاتیونی، یک غیر یونی و یک آنیونی) به عنوان بازدارنده خوردگی برای فولاد A335 در محیط قلیایی سدیم هیدروکسید پرداخته شد. بر اساس داده‌های حاصل از روش‌های طیف‌سنجی امیدانسی الکتروشیمیایی، دو بازدارنده برتر شناسایی شدند: سدیم دودسیل سولفات (SDS) با راندمان بازدارندگی ۸۵٫۳٪ و دودسیل تری‌متیل آمونیوم بروماید (DOTAB) با راندمان ۸۴٫۱٪. اگرچه نتایج حاصل از روش پلاریزاسیون تافل راندمان‌های عددی متفاوتی را نشان داد، اما همین دو ماده به عنوان مؤثرترین بازدارنده‌ها تأیید شدند. علاوه بر این، مشاهدات کیفی به‌دست‌آمده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، به وضوح از تشکیل یک لایه محافظ مؤثر بر روی سطح فولاد در حضور بازدارنده‌های SDS و DOTAB حکایت دارد و یافته‌های کمی الکتروشیمیایی را به صورت تجربی تأیید می‌کند. در نتیجه، می‌توان این دو سورفکتانت را به عنوان گزینه‌های امیدبخشی برای کنترل خوردگی فولاد A335 در محیط‌های قلیایی معرفی نمود.

۵- تقدیر و تشکر

از دانشگاه سمنان به خاطر حمایت مالی از این تحقیق قدردانی می‌شود.

۶- فهرست منابع و مآخذ

- [1] Wan Mohamad Kamaruzzaman W.M.I., Mohd Nasir N.A., et al. (2022). 25 years of progress on plants as corrosion inhibitors through a bibliometric analysis using the Scopus database (1995–2020), *Arab. J. Chem.* 15(4), 103655.
- [2] 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.
- [3] Adewuyi, A., Göpfert, A., Wolff, T. (2014). Succinyl amide gemini surfactant from *Adenopus breviflorus* seed oil: a potential corrosion inhibitor of mild steel in acidic medium, *Ind. Crop. Prod.* 52, 439–449.
- [4] El-Taib Heakal, F., Elkholy, A.E. (2017). Gemini surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel, *J. Mol. Liq.*, 230, 395–407.
- [5] Benahmed, M., Selatnia, I., Djeddi, N., Akkal, S., Laouer, H. (2020). Adsorption and corrosion inhibition properties of butanolic extract of *Elaeoselinum thapsioides* and its synergistic effect with *Reutera lutea* (Desf.) Maires (Apiaceae) on A283 carbon steel in hydrochloric acid solution, *Chemistry Africa*, 3, 251–261.
- [6] Putilova N., Balezin S.A., Barannik V.P. (1996). *Metallic Corrosion Inhibitors* (translated from Russian), *Pergamon Press, London*, 620, 1623.

- [7] Khaksarfard, Y., Bagheri, A., Rafati, A. A. (2023). Synergistic effects of binary surfactant mixtures in the adsorption of diclofenac sodium drug from aqueous solution by modified zeolite, *J. Colloid Interface Sci.* 644, 186–199.
- [8] Farahani, R. K., Bagheri, A. (2022). The interaction of the surface active ionic liquid with nonionic surfactants (Triton X-100 and Triton X-405) in aqueous solution by using tensiometry method, *J. Mol. Liq.*, 345, 118260.
- [9] Ramji, K., Cairns, D.R., Rajeswari, S. (2008). Synergistic inhibition effect of 2-mercaptobenzothiazole and Tween-80 on the corrosion of brass in NaCl solution, *Appl. Surf. Sci.* 254, 4483–4493.
- [10] Zhang, R., Somasundara, P. (2006). Advances in adsorption of surfactants and their mixtures at solid/solution interfaces. *Adv. Colloid Interface Sci.* 213, 123.
- [11] Fuchs-Godec, R. (2009). Effects of surfactants and their mixtures on inhibition of the corrosion process of ferritic stainless steel, *Electrochimica Acta*, 54, 2171–2179.
- [12] Badawi A.M., Hegazy M.A., El-Sawy A.A., Ahmed H.M., Kamel, W.M. (2010). Novel quaternary ammonium hydroxide cationic surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel and as biocides for sulfate reducing bacteria (SRB), *Mater. Chem. Phys.* 124, 458–465.
- [13] Javadian S., Yousefi A., Neshati J. (2013). Synergistic effect of mixed cationic and anionic surfactants on the corrosion inhibitor behavior of mild steel in 3.5% NaCl, *Appl. Surf. Sci.* 285, 674–681.
- [14] Javadian, S., Yousefi, A., Neshati, J. (2013). Synergistic effect of mixed cationic and anionic surfactants on the corrosion inhibitor behavior of mild steel in 3.5% NaCl, *Appl. Surf. Sci.* 285, 674–681.
- [15] Badawi, A.M., Hegazy, M.A., El-Sawy, A.A., Ahmed, H.M., Kamel, W.M. (2010). Novel quaternary ammonium hydroxide cationic surfactants as corrosion inhibitors for carbon steel and as biocides for sulfate reducing bacteria (SRB), *Mater. Chem. Phys.* 124, 458–465.
- [16] Fuchs-Godec, R., Pavlovic, M.G. (2012). Synergistic effect between non-ionic surfactant and halide ions in the forms of inorganic or organic salts for the corrosion inhibition of stainless-steel X4Cr13 in sulphuric acid, *Corros. Sci.* 58, 192–201.
- [17] Zolfaghari, M., Arab, A., Asghari, A.R. (2018). On the morphology and corrosion behavior of Ni nanostructures electrodeposited in the presence of different surfactants, *Applied Chemistry Today*, 13(49), 37–44.
- [18] Rajabi, M., Arab, A., Bagheri, A. (2021). The inhibition effect of CTAB and Triton X-100 surfactants on the corrosion of nickel in alkaline solution, *Applied Chemistry Today*, 16(59), 63–72.
- [19] Bhatia, A. (2017). Process Piping Materials-Module 2, course No: M06-036, Continuing Education and Development, Inc. 22 Stonewall Court Woodcliff Lake, NJ 07677.

- [20] Song, P., Jing, Z., Zhang, Z., Zhang, B., Ge, Y., Xue, L., Liang, X., Cheng, J. (2023). Effect of Minor Mo Addition on Microstructure and Corrosion Resistance of High-Velocity Air Fuel-Sprayed Fe-Based Amorphous Coatings, *Coatings*, 13(12), 2089.
- [21] Rosen, M.J., Kunjappu, J. T. (2012). Surfactants and interfacial phenomena, 4th ed. Wiley.
- [22] Mukerjee, P., Mysels, K.J. (1971) Critical Micelle Concentration of Aqueous Surfactant Systems. Vol. 36, US Government Printing Office, Washington DC.
- [23] Sargolzaei, B., Arab, A. (2021). Synergism of CTAB and NLS surfactants on the corrosion inhibition of mild steel in sodium chloride solution, *Materials Today Communications*, 29, 102809.
- [24] Rashid, S., Arab, A., Faraji, S. (2025). Investigating the corrosion resistance of coated steel with Ni-W-P nanocomposites prepared by electroless method, *Applied Chemistry Today*, 20(74), 161-174.