

بررسی استفاده از بازدارنده ی لیگاند سالن برای کاهش خوردگی فولاد ساده کربنی مورد استفاده در بویلرها

جواد ده دله^۱، ایمان دانایی^{۲*}، غلامرضا راشد^۳، خلیل قبادی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعت نفت، دانشکده نفت شهید تندگویان، آبادان، ایران

^۲ استادیار دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

^۳ دانشیار دانشکده نفت آبادان، دانشگاه صنعت نفت، آبادان، ایران

^۴ مهندس بازرسی فنی پالایشگاه آبادان، آبادان، ایران

دریافت: ۹۳/۴/۲۹ پذیرش: ۹۴/۴/۱۷

چکیده

در این مقاله کاهش خوردگی فولاد ساده کربنی مورد استفاده در بویلرها با استفاده از یک بازدارنده مورد بررسی قرار گرفته است. روش های الکتروشیمیایی و بررسی سطح برای ارزیابی اثربازدارنده لیگاند سالن به نام *N,N'*-bis(2,4,6-trihydroxyacetophenone)-2,2-dimethylpropandiimine (THAPDP) بر روی کاهش خوردگی فولاد ساده کربنی در محیط بازی (pH=10) حاوی سدیم کلرید انجام شد. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که ترکیب ذکر شده یک بازدارنده ی مناسب برای فولاد ساده کربنی است که بازدهی آن با افزایش غلظت بازدارنده بیش تر می شود. همچنین نمودارهای پلاریزاسیون نشان می دهد که می توان از این ترکیب آلی به عنوان یک بازدارنده ی مختلط یاد کرد. مکانیزم جذب روی سطح از مدل جذب لانگمویر تبعیت می کند. پارامتر های اکتیواسیون و جذب از جمله انرژی فعال سازی، تغییرات آنتالپی و آنتروپی، ثابت تعادل جذب و تغییرات انرژی آزاد گیبس از طریق به دست آوردن جریان خوردگی در دماهای گوناگون محاسبه شد.

واژگان کلیدی: خوردگی، فولاد کربنی، تست تافل، بازدارنده، مدل جذب، لانگمویر

مقدمه

فولاد ساده کربنی در شرایط محیطی مختلف استفاده های بسیار زیادی دارد [۱]. یکی از کاربردهای فولاد ساده کربنی استفاده ی آن در ساخت بدنه ی بویلرها است [۲]. نرخ خوردگی فولاد کربنی به شدت وابسته

*danaee@put.ac.ir

به محیط شیمیایی است که سطح فلز با آن در ارتباط است. قدرت اسیدی یا بازی آبی که به بویلر تغذیه می شود یکی از پارامترهای شیمیایی است که روی نرخ خوردگی اثر گذار است. غالباً pH آب ورودی بویلرها جهت جلوگیری از تشکیل اسیدکربنیک، بین ۹.۲ تا ۱۰ انتخاب می شود [۲].

معمولاً سیستم پیشگیری از خوردگی جهت کاهش خوردگی تمایل به استفاده از بازدارنده هایی دارد که خطر زیست محیطی حداقل داشته باشند. بازدارنده ها مواد شیمیایی هستند که وقتی به مقدار کم به محیط خورنده وارد می شوند، سرعت خوردگی را کاهش می دهند. بیش تر بازدارنده های شناخته شده مواد آلی دارای زنجیره های حلقوی شامل اکسیژن، نیتروژن یا سولفور و پیوند های دوگانه می باشند که باعث جذب آن ها روی سطح فلز می شوند [۳ و ۴]. فیلم تشکیل شده در اثر جذب بازدارنده روی سطح، باعث حفاظت آن از خوردگی می شود. این حفاظت از خوردگی می تواند به علت جدایش فیزیکی سطح از محیط خورنده و یا به علت عقب افتادن پروسه ی واکنش های الکتروشیمیایی باشد. این ترکیبات اغلب هر دو واکنش آندی و کاتدی را تحت تاثیر قرار می دهند. لذا گاهی اوقات به این مواد بازدارنده های مختلط هم می گویند [۱۱-۵]. وجود صفحات مسطح در مولکول ها از جمله حلقه بنزنی و همچنین وجود جفت الکترون تنها در زنجیره های حلقوی مشخصه های مهمی هستند که به جذب مولکول های بازدارنده روی سطح کمک می کنند [۱۲].

در مقاله ی حاضر رفتار THAPDP به عنوان یک بازدارنده ی خوردگی برای کاهش خوردگی فولاد ساده کربنی در محیط بازی- نمکی به وسیله ی آزمون نافل مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر دما بر روی خوردگی مورد مطالعه قرار گرفته است و پارامتر های ترمودینامیکی به وسیله ی نتایج آزمایش در دماهای مختلف محاسبه شده است.

مواد و روش تحقیق

مواد شیمیایی به کار رفته در تحقیق حاضر از شرکت مرک^۱ تهیه شده و بدون هر گونه تغییری مورد استفاده قرار گرفت. برای آماده سازی نمونه ها (الکتروود کار)، فولاد ساده کربنی از نوع SA-210 با ترکیب شیمیایی زیر انتخاب شد:

۰/۲۷٪ کربن، ۰/۱٪ سیلیسیم، ۰/۹۳٪ منگنز، ۰/۰۴۸٪ فسفر، ۰/۰۵۸٪ سولفور و ۹۸/۵۹۴٪ آهن.

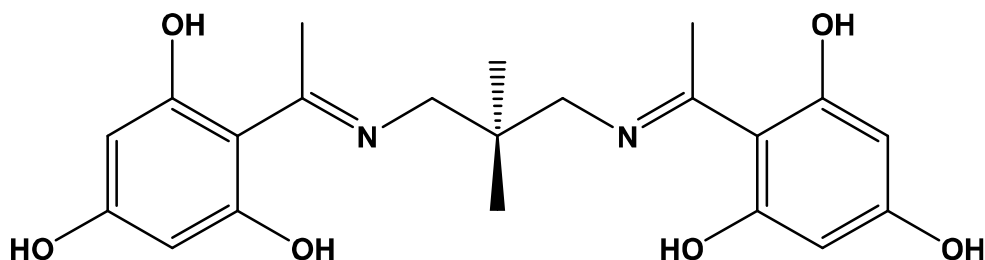
قطعه ی فولاد کربنی با ابعاد ۱×۱×۰/۲ سانتی متر به وسیله ی رزین پلی استر آب بندی شد؛ به گونه ای که فقط سطح ۱ سانتی متر مربع از نمونه با محیط خورنده در تماس باشد. آن گاه سطح نمونه با کاغذ سمباده سیلیکون کاربرد با درجه های ۲۲۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ به صورت مکانیکی ساییده شد تا سطح آینه شود. نمونه قبل از هر آزمایش با استون چربی زدایی شده و به وسیله ی آب مقطر شسته شد.

محلول های آزمایش همگی به وسیله ی آب مقطر، سدیم کلرید به میزان ۳۰ گرم در هر لیتر و سود سوزآور جهت رساندن قدرت قلیایی محلول به ۱۰ آماده شد. همچنین غلظت های مختلف از بازدارنده در

^۱Merck company

^۲Mount

محدوده ی ۱ تا ۱۰۰ میکرومولار انتخاب شد. شکل ۱ ساختار مولکولی بازدارنده ی لیگاند سالن مورد استفاده در این تحقیق را نشان می دهد:



شکل ۱. ساختار مولکولی N,N'-bis(2,4,6-trihydroxyacetophenone)-2,2-dimethylpropanediimine (THAPDP)

آزمون های پلاریزاسیون تافل توسط دستگاه پتانسیواستات IVIUM انجام گرفت. پتانسیل های الکتروود کاری نسبت به پتانسیل اشباع کالومل در محلول ۰.۳٪ وزنی سدیم کلرید و در pH=10 در غیاب و در حضور غلظت های گوناگون بازدارنده اندازه گیری شد. از الکتروود پلاتین به عنوان الکتروود کمکی استفاده شد. قبل از انجام هر آزمون الکتروشیمیایی، الکتروود کاری در محلول آزمایش به مدت ۳۰ دقیقه جهت رسیدن به حالت پایدار غوطه ور شد. نمودارهای پلاریزاسیون با تغییر پتانسیل با سرعت ۱ میلی ولت بر ثانیه رسم شد. تمامی آزمون های الکتروشیمیایی تحت کنترل حمام آب در دمای ثابت انجام گرفت. برای هر بار انجام دادن آزمون ها، از یک محلول تازه استفاده شد و جهت حصول اطمینان از صحت و تکرار پذیری داده ها، آزمون-ها در هر غلظت حداقل سه بار تکرار گردید. جریان خوردگی توسط معادله استرن - گیری محاسبه می شود [۱۳ و ۱۴]:

$$I_{corr} = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \left(\frac{1}{R_p} \right) \quad (1)$$

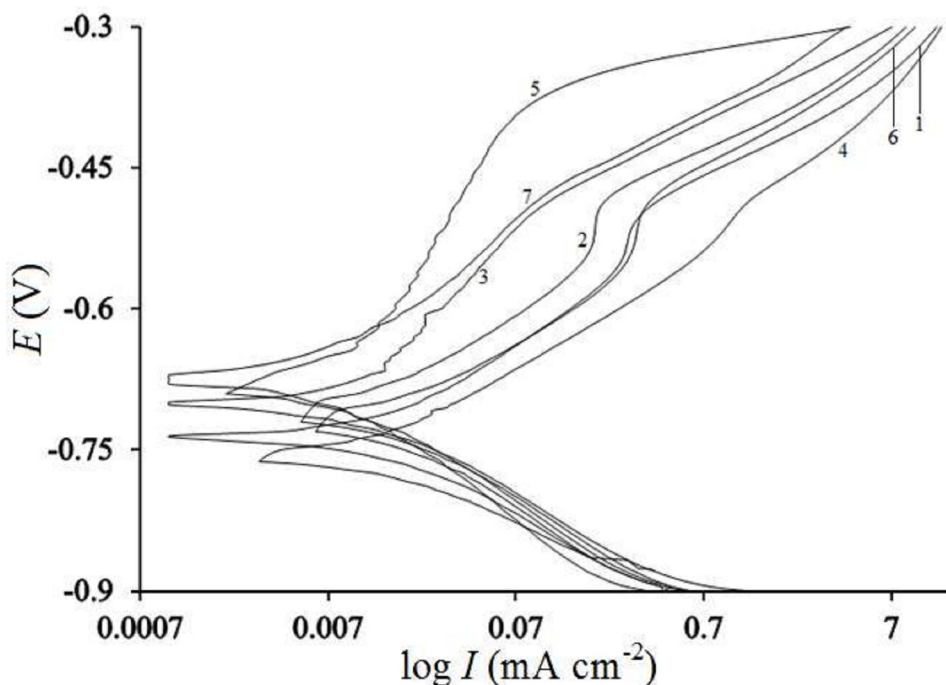
که در آن b_a و b_c به ترتیب نشان گر شیب آندی و کاتدی، R_p نشان گر مقاومت پلاریزاسیون و I_{corr} دانسیته جریان خوردگی است. اثر بازدارندگی در دماهای مختلف جهت محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی خوردگی استیل و جذب بازدارنده مورد بررسی قرار گرفت.

برای انجام بررسی سطح، نمونه توسط کاغذ سمباده سیلیکون کاربید با درجه های ۲۲۰، ۶۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ به صورت مکانیکی ساییده شد، به وسیله ی استون چربی زدایی شد و با آب مقطر کاملاً شست و شو داده شد. سپس در محلول بازی حاوی ۰.۳٪ وزنی سدیم کلرید در غیاب و در حضور بازدارنده با غلظت ۱۰۰ میکرومولار به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت. بلافاصله پس از خروج نمونه از محلول، سطح آن توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی با بزرگنمایی ۳۰۰۰ برابر مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

آزمون پلاریزاسیون تافل

شکل ۲ نمودارهای پلاریزاسیون برای فولاد کربنی در محلول مورد بحث را در غیاب و در حضور غلظت های مختلف بازدارنده در دمای ۲۹۸ کلوین نشان می دهد:



شکل ۲. نمودار پلاریزاسیون فولاد کربنی (۱) بدون بازدارنده، (۲) ۱، (۳) ۵، (۴) ۱۰، (۵) ۳۰، (۶) ۷۰، (۷) ۱۰۰ میکرومولار بازدارنده

جدول ۱ پارامترهای الکتروشیمیایی مانند پتانسیل خوردگی (E_{corr}) (بر حسب الکترواد اشباع کالومل)، شیب جریان کاتدی و آنودی (b_a , b_c)، شدت جریان خوردگی (I_{corr})، درجه ی پوشش سطح (θ) و بازدهی بازدارنده ($IE\% = \theta \times 100$) را نشان می دهد که توسط برون یابی نمودارهای تافل به دست آمده اند [۱۵]. این نتایج نشان می دهند که ترکیب لیگاند سالن مورد آزمایش می تواند به عنوان یک بازدارنده ی موثر برای فولاد ساده کربنی در محیط بازی - نمکی عمل کند. درجه ی پوشش دهی سطح برای غلظت های مختلف بازدارنده توسط فرمول زیر محاسبه می شود [۱۶-۱۸]:

$$\theta = \frac{\dot{I}_{corr} - I_{corr}}{\dot{I}_{corr}} \quad (1)$$

که در آن I_{corr} و \dot{I}_{corr} به ترتیب شدت جریان خوردگی در محلول بدون بازدارنده و در محلول حاوی بازدارنده هستند.

جدول ۱. پارامترهای پلاریزاسیون، درجه ی پوشش دهی سطح و بازدهی بازدارنده در غلظت های مختلف

C (μM)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	$-b_c$ (mV dec $^{-1}$)	b_a (mV dec $^{-1}$)	R_p (Ohm)	θ	I.E%
blank	-738.6	7	66	84	2304	-	-
1	-710.4	5.88	68	79	2686	0.16	16
5	-701.8	3.59	52	62	3425	0.48	48.71
10	-757.2	3.5	34	42	2338	0.5	50
30	-680.3	3.16	68	87	5222	0.54	54.85
70	-721.2	3	33	31	2338	0.57	57.14
100	-673.9	2.55	68	77	6164	0.63	63.57

با اضافه کردن بازدارنده جریان خوردگی کاتدی و آندی هر دو کم می شوند (شکل ۲). با افزایش بازدارنده جریان خوردگی (I_{corr}) به حد قابل توجهی کاهش می یابد و درجه ی پوشش دهی سطح افزایش می یابد. علاوه بر این تغییرات پتانسیل خوردگی تمایل مشخصی به سمت مقادیر مثبت تر یا منفی تر ندارد که نشان می دهد بازدارنده ی THAPDP یک بازدارنده ی مختلط است [۱۹].

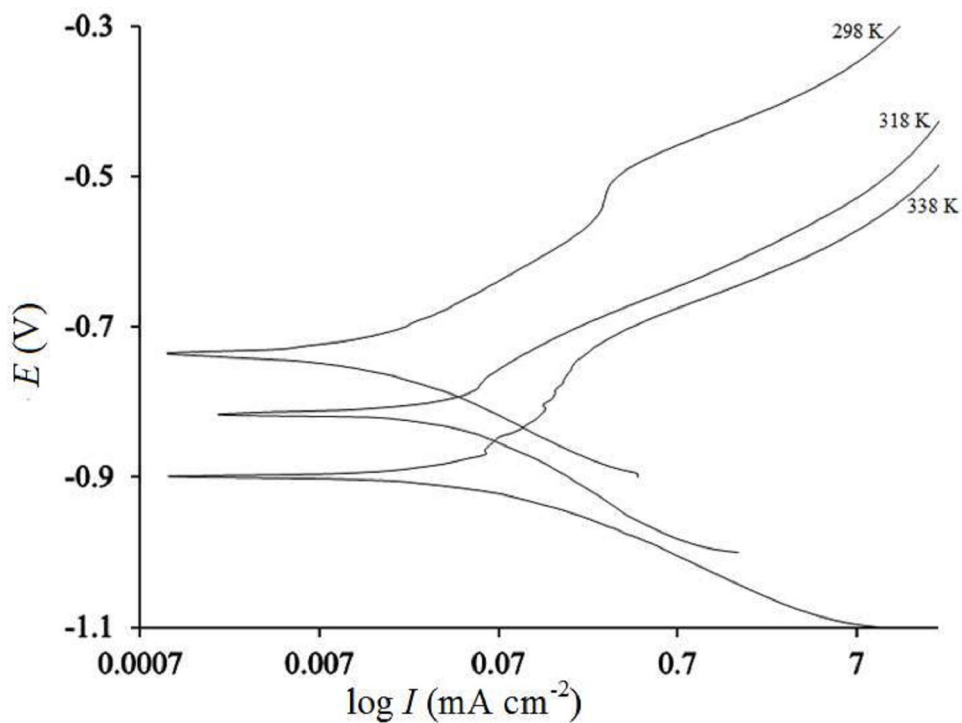
اثر دما

برای ارزیابی جذب بازدارنده روی سطح و به دست آوردن پارامترهای اکتیواسیون خوردگی فولاد کربنی، اثر دما روی واکنش فلز - محلول در حضور بازدارنده و در محدوده ی دمایی ۲۹۸ تا ۳۳۸ کلوین مورد بررسی قرار گرفت (شکل های ۳ و ۴).

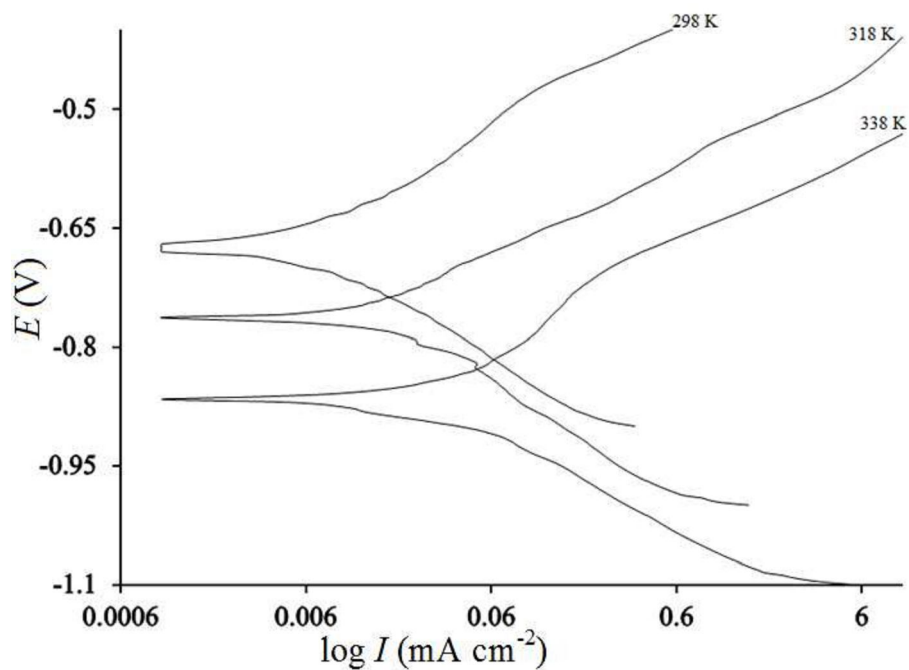
جدول های ۲ و ۳ پارامترهای الکتروشیمیایی خوردگی حاصل از نمودارهای پلاریزاسیون به ترتیب در دماهای ۳۱۸ و ۳۳۸ کلوین نشان می دهد. این داده ها نشان می دهند که جریان خوردگی (I_{corr}) با افزایش دما افزایش پیدا می کند. رابطه ی بین جریان خوردگی و دما به وسیله ی معادله ی آرنیوس بیان می شود [۲۰]:

$$\ln I_{\text{corr}} = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (2)$$

در این رابطه A یک عدد ثابت، E_a انرژی اکتیواسیون، T دمای مطلق و R ثابت گازها می باشد.



شکل ۳. نمودار پلاریزاسیون آنودی و کاتدی در دماهای مختلف بدون حضور بازدارنده



شکل ۴. نمودار پلاریزاسیون آنودی و کاتدی در دماهای مختلف در حضور ۱۰۰ میکرومولار بازدارنده

جدول ۲. پارامترهای پلاریزاسیون در غیاب و در حضور غلظت های مختلف بازدارنده در دمای ۳۱۸ کلوین

C (μM)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	$-b_C$ (mV dec $^{-1}$)	b_A (mV dec $^{-1}$)	R_p (Ohm)	θ	IE%
blank	-816.6	29.78	102	143	865.3	-	-
1	-805.1	14.92	69	86	1113	0.49	49.89
5	-804.6	10.86	52	76	1238	0.63	63.53
10	-826.5	9.715	43	68	1183	0.67	67.37
30	-816.3	5.465	34	36	1387	0.81	81.64
70	-805.7	4.607	43	19	1251	0.84	84.52
100	-765	3.823	21	34	1466	0.87	87.16

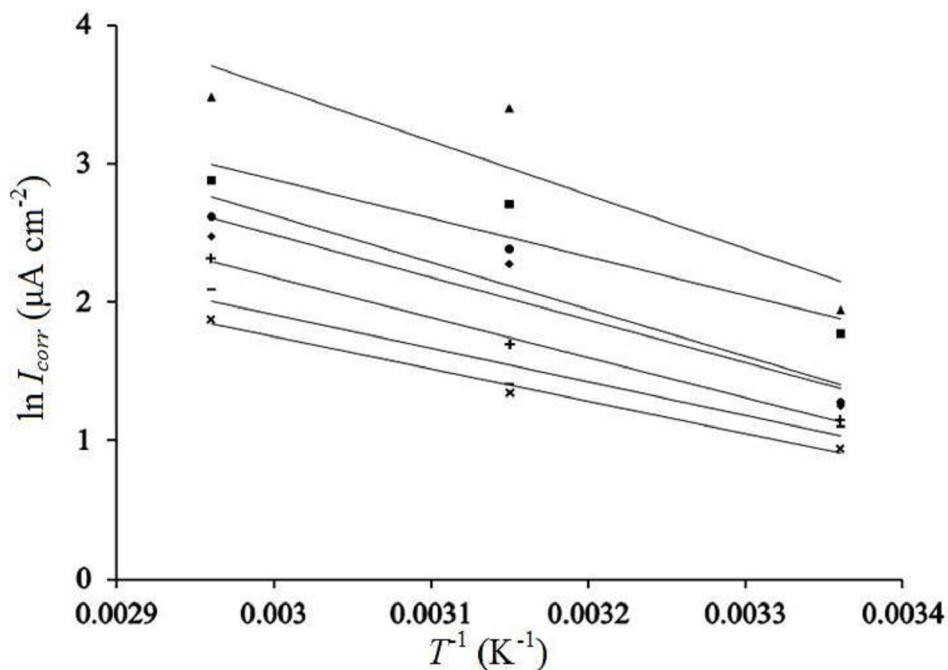
جدول ۳. پارامترهای پلاریزاسیون در غیاب و در حضور غلظت های مختلف بازدارنده در دمای ۳۳۸ کلوین

C (μM)	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A cm}^{-2}$)	$-b_C$ (mV dec $^{-1}$)	b_A (mV dec $^{-1}$)	R_p (Ohm)	θ	IE%
blank	-899.7	32.33	64	147	601.4	-	-
1	-889.3	17.7	48	61	658.6	0.45	45.25
5	-908.4	13.65	46	38	663.8	0.57	57.77
10	-909	11.83	55	56	1016	0.63	63.40
30	-903.3	10.09	42	48	957	0.68	68.79
70	-868.9	8.026	43	43	1156	0.75	75.174
100	-866.8	6.532	36	44	1317	0.79	79.79

شکل ۵ تغییرات جریان نسبت به T^{-1} را نشان می دهد که از روی شیب خطوط انرژی اکتیواسیون بدست می آید. مقدار انرژی اکتیواسیون در عدم حضور بازدارنده با استفاده از شکل ۵ برابر $32/24$ کیلوژول بر مول محاسبه شد، در حالی که این مقدار در حضور 100 میکرومولار از بازدارنده برابر $19/48$ کیلوژول بر مول است. کاهش مقدار انرژی اکتیواسیون در حضور بازدارنده (جدول ۴) دلیلی بر جذب شیمیایی آن بر روی سطح است و افزایش آن مربوط به جذب فیزیکی است. همچنین کاهش انرژی اکتیواسیون در غلظت های بالاتر بازدارنده به تمرکز واکنش خوردگی بر روی قسمت پوشیده نشده ی سطح فولاد کربنی توسط بازدارنده ارتباط دارد [۲۱].

آنتالپی و آنتروپی اکتیواسیون به وسیله ی فرمول زیر به دست آمده اند [۲۲]:

$$I_{\text{corr}} = \left(\frac{RT}{Nh}\right) \exp\left(\frac{\Delta s_a}{R}\right) \exp\left(\frac{-\Delta H_a}{RT}\right) \quad (3)$$



شکل ۵. نمودار آرنیوس (بر حسب $1/T$) برای فولاد کربنی در محیط Δ بدون بازدارنده، \square ، \circ ، \diamond ، Δ ، \diamond ، \times ، $+$ ، $-$ ، \times و \times ۱۰۰ میکرومولار بازدارنده

جدول ۴. پارامترهای اکتیواسیون انحلال فولاد کربنی در غیاب و حضور غلظت های مختلف بازدارنده

C (μM)	$E_a (\pm 1)$ (kJ mol^{-1})	$A (\pm 10^3)$ (A cm^{-2})	$\Delta H_a (\pm 1)$ (kJ mol^{-1})	$\Delta S_a (\pm 2)$ ($\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$)	$E_a - \Delta H_a = RT (\pm 1)$ (kJ mol^{-1})
blank	32.24	3925483.161	29.63	-127.46	2.61
1	23.14	76038.87487	20.53	-160.17	2.61
5	28.04	340782.5944	25.42	-147.70	2.61
10	25.57	121783.48	22.96	-156.25	2.61
30	24.08	52365.32947	21.47	-163.27	2.61
70	20.3	10273.26327	17.68	-176.81	2.62
100	19.48	6530.899751	16.87	-180.58	2.61

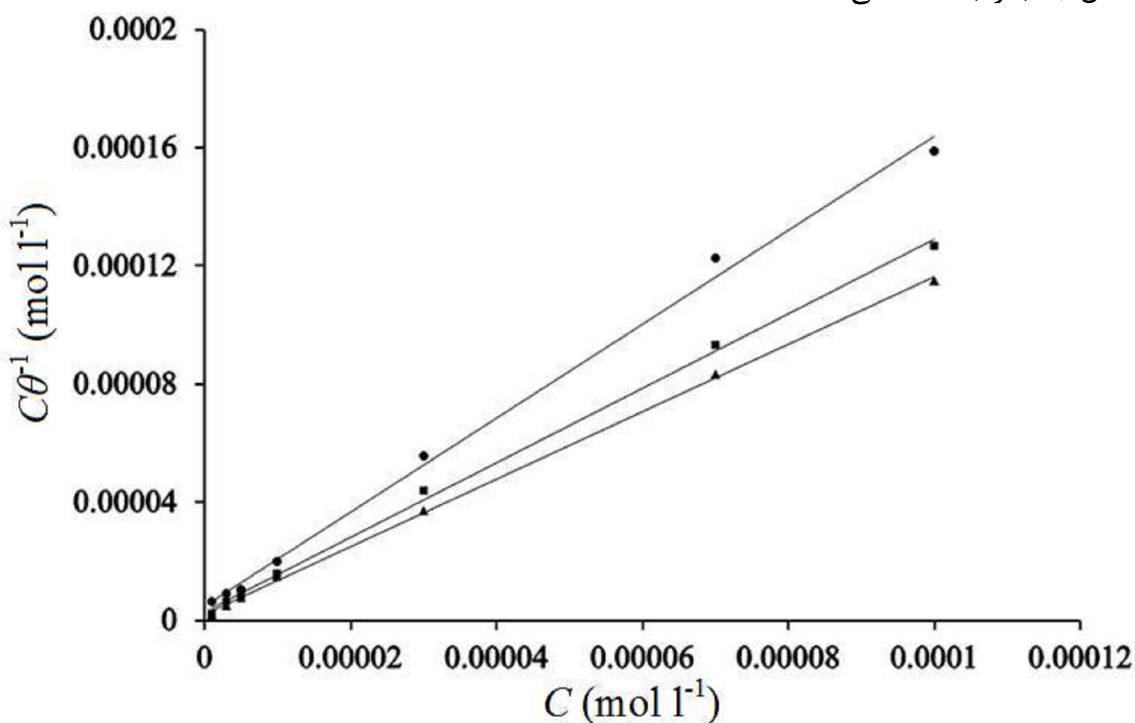
آنتالپی و آنتروپی اکتیواسیون به وسیله فرمول زیر به دست آمده اند [۲۲]:

$$I_{corr} = \left(\frac{RT}{Nh} \right) \exp\left(\frac{\Delta S_a}{R} \right) \exp\left(\frac{-\Delta H_a}{RT} \right) \quad (4)$$

در این رابطه h ثابت پلانک، N عدد آووگادرو، ΔS_a آنتروپی اکتیواسیون و ΔH_a آنتالپی اکتیواسیون است. نمودار $\ln(I_{corr}/T)$ بر حسب $1/T$ در شکل ۶ رسم شده است. خطوط راستی که به دست آمده دارای شیب برابر با $-\Delta H_a/R$ و عرض از مبدا $(\ln R/Nh + \Delta S_a/R)$ است که مقادیر ΔH_a و ΔS_a به وسیله آن محاسبه شده

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K_{ads}} + C \quad (5)$$

در این رابطه C غلظت بازدارنده در محلول و K_{ads} ثابت تعادل جذب بازدارنده است. شکل ۷ نمودار C/θ بر حسب C و رابطه‌ی خطی حاصل شده را نشان می‌دهد. بررسی‌های بیش‌تر این شکل ثابت می‌کند که بنابر شیب خط نزدیک به واحد، پروسه‌ی جذب THAPDP روی سطح از قانون جذب لانگمویر پیروی می‌کند. این قانون فرض می‌کند که مولکول‌های بازدارنده به صورت تک لایه بر روی سطح فلز قرار می‌گیرند و با یکدیگر هیچ گونه برهم کنشی ندارند [۲۴]. عرض از مبدا خطوط نمودار شکل ۷ مقادیر ثابت تعادل جذب را به دست می‌دهند.



شکل ۷. نمودار ایزوترم جذب لانگمویر در دمای (○) ۲۹۸، (Δ) ۳۱۸، (□) ۳۳۸ کلوین

انرژی آزاد گیبس استاندارد برای پروسه‌ی جذب بازدارنده با ثابت تعادل جذب آن به وسیله‌ی معادله زیر رابطه پیدا می‌کند:

$$\Delta G_{ads} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (6)$$

در این رابطه عدد ۵۵/۵ غلظت آب در محلول است که واحد آن مول بر لیتر (مولار) است. آنتالپی و آنتروپی جذب را نیز می‌توان از روابط زیر به دست آورد [۱۶]:

$$\Delta G_{ads} = \Delta H_{ads} - T\Delta S_{ads} \quad (7)$$

$$\ln K_{ads} = -\frac{\Delta H_{ads}}{RT} + \frac{\Delta S_{ads}}{R} - \ln(55.5) \quad (8)$$

مقادیر به دست آمده برای آنتالپی جذب در جدول ۵ آورده شده است.

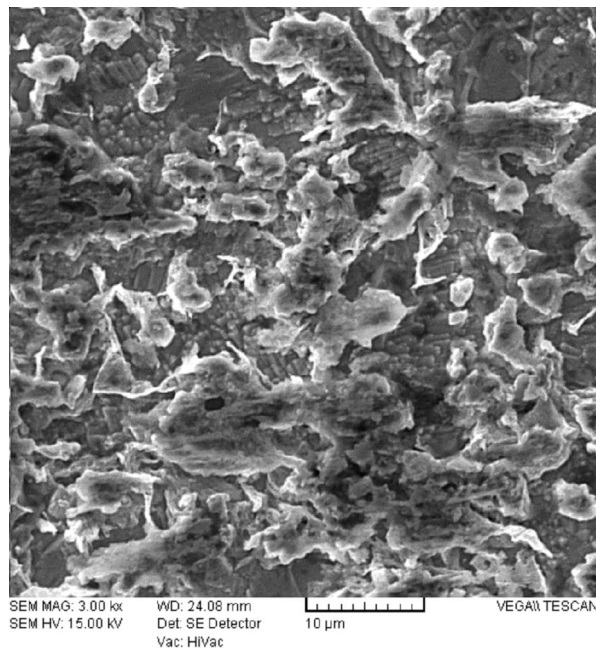
جدول ۵. پارامترهای ترمودینامیکی و تعادل جذب بازدارنده THAPDP روی فولاد کربنی

$K_{ads}(\pm 10^2) (L mol^{-1})$			$\Delta G_{ads}(\pm 10^{-1}) (kJ mol^{-1})$			ΔH_{ads} ($kJ mol^{-1}$)	ΔS_{ads} ($J mol^{-1}K^{-1}$)
298 K	318 K	338 K	298 K	318 K	338 K		
2×10^5	5×10^5	3.33×10^5	-40.192	-45.312	-47.022	11.04	173.52

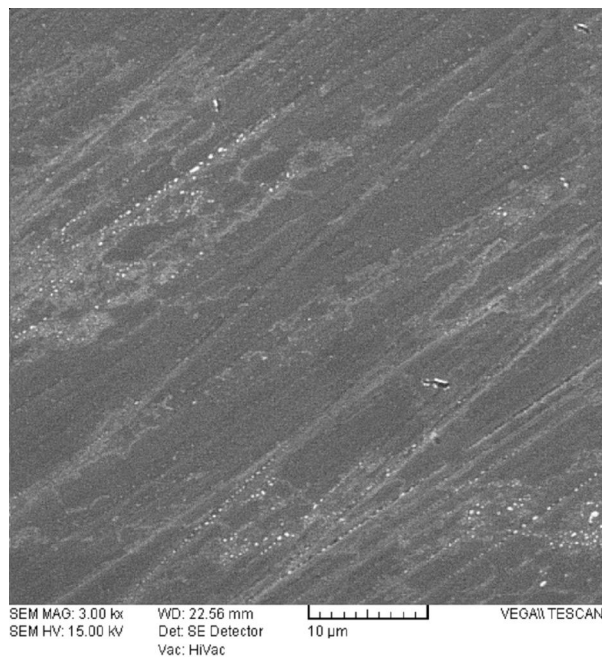
مقدار مثبت به دست آمده برای آنتالپی جذب برابر با ۱۱/۰۴ نشان می دهد که جذب بازدارنده ی THAPDP روی سطح فولاد کربنی یک پروسه ی گرماگیر است [۸]. علاوه بر این مقدار مثبت برای آنتروپی جذب نشان می دهد که پروسه ی تبدیل مولکول های بازدارنده به مولکول های جذب شده روی سطح، باعث افزایش بی نظمی سیستم می شود. این افزایش بی نظمی می تواند این گونه تفسیر شود که با جذب هر مولکول بزرگ بازدارنده روی سطح، تعداد مولکول بیش تری از آب از سطح فلز جدا شده و وارد الکترولیت می شوند [۱۴]. مقدار منفی انرژی آزاد گیبس جذب نیز نشان گر خود به خودی بودن فرآیند جذب بازدارنده بر روی سطح است [۲۵]. مقادیر ΔG_{ads} در حدود ۲۰- کیلوژول بر مول (و یا مقادیر مثبت تر از آن) با جذب فیزیکی و مقادیر حدود ۴۰- کیلوژول بر مول (و یا مقادیر منفی تر از آن) با جذب شیمیایی مولکول های بازدارنده روی سطح سازگار است [۲۶]. طبق داده های جدول ۵ مقادیر ΔG_{ads} منفی تر از ۴۰- کیلوژول بر مول است، در نتیجه جذب بازدارنده ی THAPDP روی فولاد کربنی در محیط ۳٪ وزنی سدیم کلرید با pH=10 یک فرآیند شیمیایی محسوب می شود.

آنالیز سطح

اثر بازدارندگی THAPDP روی واکنش خوردگی به وسیله ی تصویر برداری میکروسکوپ الکترونی روبشی در غیاب و در حضور ۱۰۰ میکرومولار بازدارنده مورد بررسی قرار گرفت (شکل های ۸ و ۹). از نمونه های ساییده شده تازه در این آزمایش استفاده شده است. همان طور که در تصاویر دیده می شود، سطح فلز قرار گرفته در محلول بدون بازدارنده به طور یکنواخت خورده شده است (شکل ۸)، در حالی که با اضافه کردن ۱۰۰ میکرومولار بازدارنده به خوبی مورد محافظت قرار گرفته است (شکل ۹). این تصاویر نشان می دهد که همواری سطح فلز مورد آزمایش در حضور بازدارنده بهتر حفظ شده است. همواری سطح به دلیل جذب مولکول های بازدارنده روی سطح فلز و جلوگیری از دسترسی مواد خورنده به سطح اتفاق افتاده است. بنابراین، تشکیل لایه ی محافظ روی سطح فلز علت کاهش سرعت فرآیند خوردگی در این تحقیق است.



شکل ۸. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در محلول بدون بازدارنده پس از ۴۸ ساعت قرار گیری در محلول



شکل ۹. تصویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی در محلول حاوی ۱۰۰ میکرومولار بازدارنده پس از ۴۸ ساعت قرار گیری در محلول

نتایج

- ۱- ترکیب لیگاند سالن THAPDP به عنوان یک بازدارنده ی موثر برای خوردگی فولاد ساده کربنی در محیط ۳٪ سدیم کلرید با $\text{pH}=10$ عمل می کند. ضمن اینکه راندمان بازدارندگی با افزایش غلظت بازدارنده افزایش می یابد.
- ۲- طبق نتایج آزمون های پلاریزاسیون، ترکیب لیگاند سالن THAPDP را می توان در دسته ی بازدارنده های مختلط قرار داد. همچنین جذب مولکول های بازدارنده روی سطح از قانون جذب لانگمویر پیروی می کند.
- ۳- مقادیر ΔG_{ads} نشان می دهد که جذب بازدارنده روی سطح در اثر انتقال بار از مولکول های بازدارنده به سطح فلز و تشکیل پیوند کووالانسی اتفاق می افتد (جذب شیمیایی).
- ۴- پارامترهای ترمودینامیکی جذب نشان می دهند که فرآیند جذب بازدارنده روی سطح، یک فرآیند خود به خودی و گرماگیر است.
- ۵- بررسی سطح به وسیله ی میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان می دهد که سطح فلز در محلول حاوی بازدارنده هموارتر و یک نواخت تر از محلول بدون بازدارنده به نظر می رسد.

فهرست علائم و نشانه ها

T	Absolute temperature
E_a	Activation energy
b_a	Anodic slope
N	Avogadro's number
b_c	Cathodic slope
A	Constant value
I_{corr}	Corrosion current density
ΔH_a	Enthalpy of adsorption
ΔS_a	Entropy of adsorption
K_{ads}	Equilibrium constant of adsorption
ΔG_{ads}	Free energy of adsorption
R	Gas constant
h	Plank's constant
R_p	Polarization resistance
θ	Surface coverage

منابع

1. Deyab, M.A., "Effect of cationic surfactant and inorganic anions on the electrochemical behavior of carbon steel in formation water." *Corrosion Science*, vol.49, no. 5, pp.2315-2328, 2007.
2. Banweg, A. "Boiler and Feedwater Treatment." *Sheir's Corrosion*, vol.4, pp. 2971-2989, 2010.



3. Hongfang, Ma., Tao, Song., Hua, Sun. and Xiao Li., "Experimental and theoretical elucidation on the inhibition mechanism of 1-methyl-5-mercapto-1,2,3,4-tetrazole self-assembled films on corrosion of iron in 0.5 M H₂SO₄ Solutions," *Thin Solid Films*, vol. 516, no. 6, pp. 1020-1024, 2008.
4. Obot, I.B., Obi-Egbedi, N.O., Odozi, N.W."Acenaphtho [1,2-b] quinoxaline as a novel corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄." *Corrosion Science*, vol.52, pp.923-926, 2010.
5. Popova, A., Christov, M., Raicheva, S. and Sokolova, E., "Adsorption and inhibitive properties of benzimidazole derivatives in acid mild steel corrosion," *Corrosion Science*, vol. 46, no. 6, pp. 1333-1350, 2004.
6. Döner, A., Solmaz, R., Özcan, M. and Kardaş, G., "Experimental and theoretical studies of thiazoles as corrosion inhibitors for mild steel in sulphuric acid solution," *Corrosion Science*, vol. 53, no. 9, pp. 2902-2913, 2011.
7. Zhang, D., An, Z., Pan, Q., Gao, L. and Zhou, G., "Comparative study of bis-piperidiniummethyl-urea and mono-piperidiniummethyl-urea as volatile corrosion inhibitors for mild steel," *Corrosion Science*, vol. 48, no. 6, pp. 1437-1448, 2006.
8. Bentiss, F., Lebrini, M, and Lagrenée, M., "Thermodynamic characterization of metal dissolution and inhibitor adsorption processes in mild steel/2,5-bis(n-thienyl)-1,3,4-thiadiazoles/hydrochloric acid system," *Corrosion Science*, vol. 47, no. 12, pp. 2915-2931, 2005.
9. Gökhan, G., "The use of quantum chemical methods in corrosion inhibitor studies," *Corrosion Science*, vol. 50, no. 11, pp. 2981-2992, 2008.
10. Oguzie, E.E., Li, Y. and Wang, F.H., "Corrosion inhibition and adsorption behavior of methionine on mild steel in sulfuric acid and synergistic effect of iodide ion," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 310, no. 1, pp. 90-98, 2007.
11. Hosseini, M.G. and Arshadi, M.R., "Study of 2-butyne-1, 4-diol as Acid Corrosion Inhibitor for Mild Steel with Electrochemical, infrared and AFM Techniques," *International journal of Electrochemical science*, vol. 4, no. 9, pp. 1339-1350, 2009.
12. Quraishi, M.A. and K Sharma, H."4-Amino-3-butyl-5-mercapto-1,2,4-triazole: a new corrosion inhibitor for mild steel in sulphuric acid." *Materials Chemistry and Physics*, vol.78, no.18, 2003.
13. Roberge, P., *Corrosion Inspection and Monitoring*, New Jersey: John Wiley, 2007.
14. Keleş, H., "Electrochemical and thermodynamic studies to evaluate inhibition effect of 2-[(4-phenoxy-phenylimino)methyl]-phenol in 1 M HCl on mild steel," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 130, no. 3, pp. 1317-1324, 2011.
15. Cluble, B.G., *Chemical Inhibitors for Corrosion Control*, Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1990.
16. Ashassi-Sorkhabi, H., Shaabani, B. and Seifzadeh, D., "Corrosion inhibition of mild steel by some schiff base compounds in hydrochloric acid," *Applied Surface Science*, vol. 239, no. 2, pp. 154-164, 2005.
17. Negm, N.A., Elkholy, Y.M., Zahran, M.K. and Tawfik, S.M., "Corrosion inhibition efficiency and surface activity of benzothiazol-3-ium cationic Schiff base derivatives in hydrochloric acid," *Corrosion Science*, vol. 52, no. 10, pp. 3523-3536, 2010.
18. Hosseini, S.M.A. and Azimi, A., "The inhibition effect of the new Schiff base, namely 2,2'-[bis-N(4-choloro benzaldimin)]-1,1'-dithio against mild steel corrosion," *Materials and Corrosion*, vol. 59, no. 1, pp. 41-45, 2008.



19. Obot, I.B. and Obi-Egbedi, N.O., "Adsorption properties and inhibition of mild steel corrosion in sulphuric acid solution by ketoconazole: Experimental and theoretical investigation," *Corrosion Science*, vol. 52, no. 1, pp. 198-204, 2010.
20. Aljourani, J., Raeissi, K. and Golozar, M.A., "Benzimidazole and its derivatives as corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl solution," *Corrosion Science*, vol. 51, pp. 1836-1843, 2009.
21. Olen, L., Riggs, JR. and Ray M. Hurd., "Temperature Coefficient of Corrosion Inhibition," *Corrosion*, vol. 23, pp. 252-260, 1967.
22. Herrag, L., Chetouani, A., Elkadiri, S., Hammouti, B. and Aouniti, A., "Pyrazole derivatives as corrosion inhibitors for steel in hydrochloric acid," *Portugal. Electrochim. Acta*, vol. 26, pp. 211-220, 2008.
23. Sastri, V. S., Green corrosion inhibitors, theory and practice, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
24. Ahamad, I., Prasad, R. and Quraishi, M.A., "Thermodynamic, electrochemical and quantum chemical investigation of some Schiff bases as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solutions," *corrosion science*, vol. 52, pp. 933-942, 2010.
25. Roberge, P., Corrosion Engineering principles and practice, McGraw-Hill, 2008.
26. Khamis, E., Bellucci, F., Latanision, R. M., and El-Ashry, E. S. H., "acid Corrosion Inhibition of Nickel by 2-(Triphenosporanylidene) Succinic Anhydride," *Corrosion*, vol. 47, pp. 677-686, 1991.