

بررسی رفتار بازدارندگی بنزوتری آزول بر خوردگی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در حالت اتصالی و غیراتصالی در آب دریا

کاظم ثابت بکتی^{۱*}، چنگیز دهقانیا^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مواد؛ دانشگاه تهران

^۲ استاد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد؛ دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: kk_sabetb@ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۲۰

چکیده

رفتار بازدارندگی ممانعت کننده‌ی آلی بنزوتری آزول (BTA) بر خوردگی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در حالت اتصالی و غیراتصالی در آب دریا به کمک آزمایش‌های غوطه‌وری، پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش غلظت بازدارنده، افزایش راندمان بازدارنده برای هر دو فلز را در حالت غیراتصالی سبب می‌شود. در این حالت حضور ۰/۰۱ مولار BTA در آب دریا سرعت خوردگی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ را به ترتیب ۵۰ و ۷۰٪ کاهش داد. جذب BTA به سطح هر دو فلز ماهیت فیزیکی داشته و از ایزوترم جذب لانگمیر پیروی می‌کند. اتصال الکتریکی فولاد کم کربن به آلومینیوم ۱۰۵۰ جذب انتخابی بازدارنده به سطح فولاد و همچنین تغییر ماهیت جذب از حالت فیزیکی به شیمیایی را به دنبال داشت که نتیجه‌ی آن کاهش ۹۵ درصدی سرعت خوردگی فولاد متصل به آلومینیوم بود.

کلمات کلیدی: بنزوتری آزول، خوردگی، فولاد کم کربن، آلومینیوم ۱۰۵۰، آب دریا؛

Study the Effect of 1H-Benzotriazole on Corrosion Behavior of Mild Steel and Aluminum 1050 in Artificial Sea Water in Single and Couple Modes

K. Sabet Bokati ^{1*}, Ch. Dehghanian ²

¹ PM.Sc, Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran.

² Professor, School of Metallurgy and Materials Engineering, University of Tehran.

* Corresponding Author: k_taherkhani@metaleng.iust.ac.ir

Submission: 2015, 07, 14 Acceptance: 2015, 11, 11

Abstract

The inhibition behavior of 1H-benzotriazole on corrosion of mild steel and Aluminum alloy 1050 in single and couple modes was investigated in sea water by immersion, Tafel polarization and electrochemical impedance spectrometry methods. The results indicated that an increase in inhibitor concentration cause to enhance in inhibition efficiency for both MS and AA1050 in single mode. In this case, the use of 0.01 M BTA caused to 50 and 70 percent reduction in corrosion rate of mild steel and AA 1050, respectively. BTA adsorbed on both MS and AA1050 surfaces physically according to the Langmuir adsorption isotherm. BTA was adsorbed on mild steel surface chemically when mild steel coupled to AA1050 which in turn caused the corrosion rate of mild steel to reduce more than 95 percent with respect to reference sample.

Keywords: 1H-benzotriazole, Corrosion, Mild steel, Aluminum1050, Sea water;

۱- مقدمه

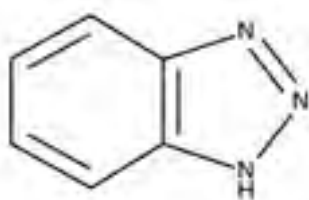
فولاد و آلومینیوم از پرکاربردترین فلزات مورد استفاده در صنایع مختلف از قبیل نفت و گاز، صنایع انتقال نیرو، اتومبیل سازی و صنایع دریایی است. خوردگی این فلزات، بویژه در محیط های دریایی و صنعتی، همواره از مهم ترین چالش های صنعتگران بوده است. آلومینیوم و آلیاژهای آن به دلیل تشکیل فیلم اکسیدی غیرفعال بر روی سطح، مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به فولادهای کربنی ارائه می دهند. با این وجود، این فیلم اکسیدی نیز در برابر یون های خورنده ای از قبیل کلر و سولفات مقاومت کافی نداشته و تخریب آن خوردگی زمینه ای آلومینیومی را به دنبال دارد [۱، ۲]. همچنین اتصال الکتریکی این دو فلز در محیط های مرطوب از قبیل برج های خنک کننده، مخازن، موتور اتومبیل و ... سبب تشکیل پیل گالوانیک و تغییر رفتار خوردگی می شود. یکی از روش های کاهش سرعت خوردگی، استفاده از بازدارنده های خوردگی است. عملکرد بازدارنده ها به میزان جذب و پایداری آن ها بر روی سطح بستگی دارد. فرآیند جذب بازدارنده در محیط های آبی شامل جایگزینی مولکول های بازدارنده با مولکول های آب بر روی سطح فلز است. در این فرآیند، توان جایگزینی به تقابل الکترواستاتیکی بین بازدارنده و سطح فلز بستگی دارد [۳].

بنزوتتری آزول (H-Benzotriazole) (BTA) و مشتقات آن از ترکیبات آلی هستند که خواص شیمیایی و بیولوژیکی متنوعی ارائه می دهند. با وجود اینکه ساختار بنزوتتری آزول در برابر حرارت حساس بوده و افزایش دما سبب تجزیه آن و متصاعد شدن بخارات سمی می شود، اما این ترکیبات همچنان به صورت گسترده در صنعت به کار گرفته می شوند. استفاده از این ترکیبات در ضدیخ و روان کننده ها، کاربرد آن ها به عنوان بازدارنده های خوردگی و همچنین استفاده به عنوان پیش سازهای دارویی از عمده ترین مصارف آن ها در صنعت است [۴، ۵]. بنزوتتری آزول و مشتقات آن، به طور گسترده برای کنترل خوردگی مس و آلیاژهای مسی

در محیط های آبی واسیدی به کار گرفته می شوند [۶-۱۰]. استفاده از این بازدارنده در سیستم های چندفلزی سبب غیرفعال کردن سطح مس و آلیاژهای آن می شود و خوردگی گالوانیک دیگر فلزات متصل به مس را کاهش می دهد [۹]. همچنین، این بازدارنده در حفاظت از فولاد در محیط های اسیدی عملکرد مناسبی داشته و حفاظت مناسبی از آلیاژهای آلومینیوم تجاری در محیط های آبی ارائه داده است [۱۱-۱۳]. با این وجود، مطالعات کمی بر رفتار BTA در حفاظت از فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در محیط های آبی صورت گرفته است. با توجه به تاثیر اتصال گالوانیک بر تغییر موضعی pH و وابستگی خصوصیات جذبی بازدارنده به pH، رفتار بازدارندگی می تواند تحت تاثیر اتصال الکتریکی فلزات به هم قرار گیرد [۱۴]. بر این اساس، این پژوهش با هدف بررسی رفتار بازدارندگی BTA بر خوردگی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در حالت اتصالی و غیراتصالی در آب دریا صورت می گیرد.

۲- روش تحقیق

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد. جدول ۲ ترکیب شیمیایی آب دریای مورد استفاده را نشان می دهد که بر اساس استاندارد ASTM D1141 [۱۵] تهیه شد. در این پژوهش، بنزوتتری آزول با ساختار شیمیایی $C_6H_5N_3$ (محصول شرکت مرک (Merck) آلمان) به عنوان بازدارنده خوردگی مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۱ ساختار شیمیایی بنزوتتری آزول را نشان می دهد.



شکل ۱- ساختار شیمیایی بنزوتتری آزول

جدول ۱- ترکیب شیمیایی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ (درصد وزنی).

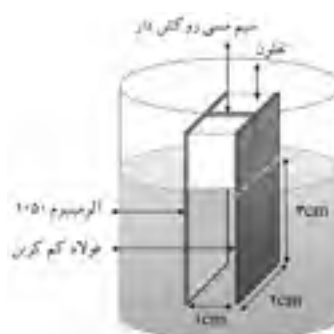
ترکیب الیز	آهن	مس	آلومینیوم	کربن	منیزیم	فسفر	گوگرد	سیلیسیم	منگنز	تیتانیوم	روی
فولاد کم کربن	۹۹/۳۱	-	۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۱	-	-	-
آلومینیوم ۱۰۵۰	۰/۳۵	۰/۰۱	۹۹/۲۸	-	۰/۰۲	-	-	۰/۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آب دریای به صورت مصنوعی مطابق با استاندارد ASTM 1148-98.

ترکیب	NaCl	MgCl ₂	CaCl ₂	KCl	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	KBr
مقدار (g/lit)	۲۴/۵۳	۵/۲	۱/۱۶	۰/۷	۴/۰۹	۰/۳	۰/۱

۳- آزمایش غوطه‌وری

مراحل آماده‌سازی نمونه‌های فلزی با ابعاد $3\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0.3\text{cm}$ شامل سمباده زنی با ورق‌های کاربیدی (از رده ۶۰ تا ۱۰۰۰) و پولیش بود که برای هر یک از نمونه‌های فلزی از سمباده‌های جداگانه استفاده شد. عملیات چربی زدایی با غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول استون در دمای 25°C در حمام التراسونیک انجام شد و پس از آن سطح هر یک از نمونه‌ها با آب مقطر شست و شو داده شد و خشک گردید. پس از اندازه‌گیری وزن اولیه نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت 0.001 گرم، هریک از آن‌ها در حجم مشخصی از آب دریا و آب دریای حاوی بازدارنده غوطه‌ور شدند. به منظور بررسی تاثیر غلظت بازدارنده بر راندمان بازدارندگی، از غلظت‌های 0.0025 ، 0.005 ، 0.0075 و 0.01 مولار بنزوتری آزل در آب دریا استفاده شد. حداقل حجم مورد استفاده برای هر سانتی متر مربع از نمونه‌ها 30ml آب دریا بود. برای غوطه‌ورسازی نمونه‌ها در الکترولیت، هر یک از نمونه‌ها توسط سیم روکش دار به گیره وصل شده و در الکترولیت قرار گرفتند. برای جلوگیری از خوردگی شباری، قسمت اتصال نمونه به سیم روکش دار خارج از محلول الکترولیت قرار گرفت، به گونه‌ای که از هر نمونه قسمتی با ابعاد $3 \times 2 \times 0.3\text{cm}$ در محلول قرار گرفت. برای بررسی تاثیر اتصال الکتریکی بر رفتار خوردگی و بازدارندگی، نمونه‌های فلزی با نسبت سطحی $1:1$ به یکدیگر متصل شدند. به منظور ثابت نگه داشتن فاصله‌ی کاتد و آند، یک قطعه تفلونی در بین ورق‌ها قرار گرفت و نمونه‌ها با سیم مسی به هم متصل شدند که شکل ۲ طرح واره‌ای از اتصال و غوطه‌وری را نشان می‌دهد. غوطه‌وری به مدت 170 ساعت و در دمای میانگین 26°C انجام شد. پس از 170 ساعت غوطه‌وری، نمونه‌ها از محلول خارج شد. به منظور جداسازی اکسیدهای ضعیف سطحی، هر یک از نمونه‌ها به مدت 10 دقیقه در حمام آلتراسونیک قرار گرفت سپس عملیات اسید شویی برای آن‌ها صورت گرفت [۱۶].



شکل ۲- طرح وار غوطه‌وری زوج گالوانیک فولاد کم کربن-آلومینیوم ۱۰۵۰ در محلول.

پس از شست و شوی نمونه‌ها و خشک کردن آن‌ها، وزن آن‌ها اندازه‌گیری شد و سرعت خوردگی و راندمان بازدارندگی محاسبه شد. برای بیان سرعت خوردگی از رابطه مبتنی بر ضخامت خورده شده بر میل (0.001 inch) در سال (MPY) استفاده شد [۱۷].

$$MPY = \frac{534W}{DAT} \quad (1)$$

در این رابطه W تقلیل وزن بر حسب میلی گرم، D دانسیته‌ی نمونه بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب، A سطح نمونه بر حسب اینچ مربع و T زمان آزمایش بر حسب ساعت است. تغییرات سرعت خوردگی هریک از نمونه‌ها پس از جداسازی محصولات حاصل از خوردگی بدست آمد. راندمان بازدارندگی نیز طبق رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$\text{راندمان بازدارنده} = \frac{\text{سرعت خوردگی با حضور بازدارنده} - \text{سرعت خوردگی در عدم حضور بازدارنده}}{\text{سرعت خوردگی در عدم حضور بازدارنده}} \times 100 \quad (2)$$

۴- آزمایش پلاریزاسیون الکتروشیمیایی

این آزمایش با دستگاه Solartron SI 1287 در محیط آبی و در حضور و عدم حضور بازدارنده صورت گرفت. در حالتی که بررسی خوردگی هر فلز به صورت جداگانه مد نظر بود، از نمونه‌هایی آماده شده با سطح فعال 1cm^2 به عنوان الکترود کاری استفاده گردید. در بررسی خوردگی گالوانیک، نمونه‌ها دو به دو به وسیله سیم روکش دار مسی به هم متصل شده به گونه‌ای که از هر نمونه مساحت 1cm^2 در معرض محیط خورنده قرار داشت و نمونه‌ها به فاصله 1cm از هم قرار داشتند. برای تکمیل سلول الکتروشیمیایی از کالومل به عنوان الکترود مرجع و از پلاتین به عنوان الکترود کمکی استفاده شد. بازه‌ی 400mV تا 600mV نسبت به پتانسیل خوردگی و سرعت روبش 1mV/sec به عنوان پارامترهای دستگاهی در نظر گرفته شد. راندمان بازدارندگی نیز بر اساس تغییرات جریان خوردگی در حضور و عدم حضور بازدارنده محاسبه شد [۷].

۵- آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی

این آزمایش با دستگاه Solartron SI 1260 در سلول‌های الکتروشیمیایی مشابه با آزمایش پلاریزاسیون انجام شد. محدوده‌ی فرکانسی 100KHz تا 10mHz با دامنه‌ی اغتشاش 10mV^3 (Perturbation amplitude) برای انجام آزمایش بودند و نتایج حاصل با استفاده

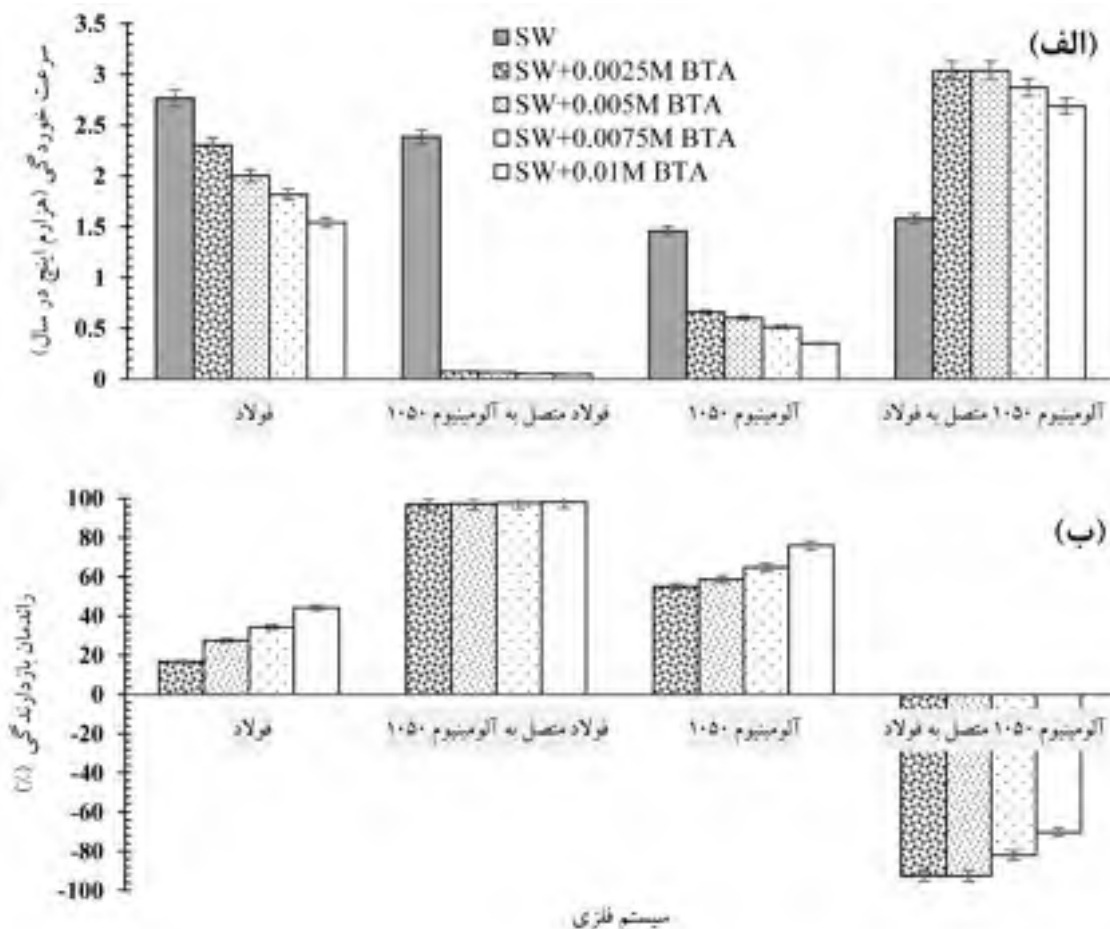
به آلومینیوم (-1050 mV) نجیب تر است. بنابراین، فولاد که در حالت اتصال پتانسیل الکتروشیمیایی نجیب تری دارد به عنوان کاتد عمل کرده و سرعت خوردگی آن کاهش می یابد، در حالی که سرعت خوردگی آلومینیوم متصل به فولاد که به عنوان جزء آندی عمل می کند، افزایش می یابد [۱۹،۲۰].

حضور BTA در آب دریا کاهش سرعت خوردگی هردو فلز را در حالت غیراتصال به دنبال دارد و افزایش غلظت بازدارنده نیز افزایش راندمان بازدارندگی را سبب می شود. مقایسه راندمان بازدارندگی BTA برای فولاد و آلومینیوم نشان داد که این بازدارنده در کنترل خوردگی نمونه آلومینیومی عملکرد بهتری ارائه می دهد. همچنین، حضور BTA در آب دریا سرعت خوردگی فولاد متصل به آلومینیوم را به طور قابل توجهی کاهش داده و سرعت خوردگی آلومینیوم متصل به فولاد را افزایش داده است. با توجه به شکل ۳، استفاده از غلظت های پایین بازدارنده نیز خوردگی فولاد متصل به آلومینیوم را بیش از ۹۵٪ کاهش می دهد. سرعت خوردگی فولاد متصل به آلومینیوم در حالی کاهش یافته که سرعت خوردگی

از نرم افزار ZView ارزیابی شد. راندمان بازدارندگی، بر اساس تغییرات مقاومت خوردگی در حضور و عدم حضور بازدارنده محاسبه شد [۱۸].

نتایج و بحث

شکل ۳ (الف) تغییرات سرعت خوردگی حاصل از کاهش وزن فولاد و آلومینیوم ۱۰۵۰ را در حالت اتصال و غیراتصال نشان می دهد که از غوطه وری نمونه ها در آب دریا و آب دریای حاوی مقادیر مختلف BTA بدست آمد. شکل ۳ (ب) نیز راندمان بازدارندگی BTA را نشان می دهد. کمتر بودن سرعت خوردگی آلومینیوم ۱۰۵۰ نسبت به فولاد کم کربن احتمالاً ناشی از تشکیل لایه اکسیدی غیرفعال بر سطح آلومینیوم است [۱]. بر اساس نتایج حاصل از غوطه وری، اتصال الکتریکی فولاد به آلومینیوم کاهش سرعت خوردگی فولاد و افزایش سرعت خوردگی آلومینیوم را به دنبال دارد. اندازه گیری پتانسیل مدار باز (Open Circuit Potential) این دو فلز در آب دریا نشان داد که پتانسیل فولاد (-760 mV) نسبت



شکل ۳ - (الف) تغییرات سرعت خوردگی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در حالت اتصال و غیر اتصال و آب دریای حاوی مقادیر مختلف بازدارنده BTA، (ب) راندمان بازدارندگی BTA در جلوگیری از خوردگی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در حالت اتصال و غیراتصال در آب دریا

است [۲۳]. بر این اساس، تاثیر همزمان اتصال الکتریکی فولاد به آلومینیوم و استفاده از بازدارنده BTA، کاهش چشمگیر سرعت خوردگی فولاد متصل به آلومینیوم را در پی داشته است.

به منظور بررسی برهم کنش مولکول های جذب شونده و سطح فلز، ایزوترم جذب مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس، انطباق نتایج حاصل از آزمایش غوطه وری با قانون ایزوترم جذب لانگمیر (Langmuir) بررسی شد. شکل ۴ رابطه ی بین غلظت و میزان پوشش دهی بازدارنده را بر اساس معادله (۳) نشان می دهد [۲۴].

$$\frac{C}{\theta} = K_{ads} + C \quad (3)$$

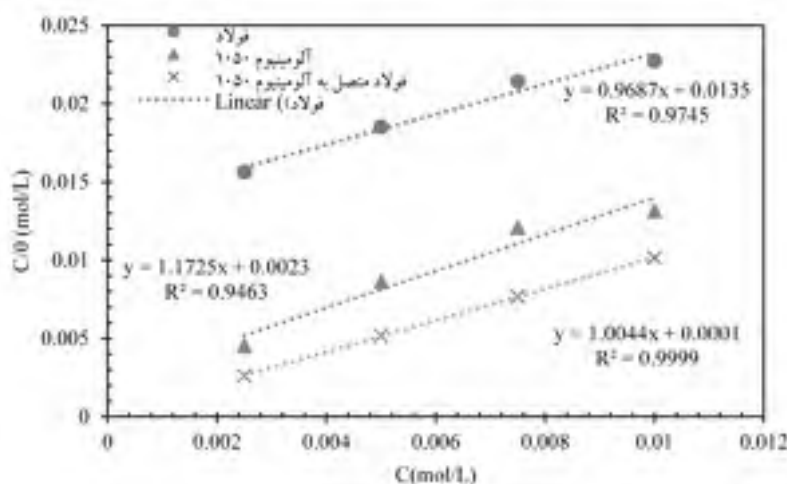
در این معادله Kads ثابت تعادل واکنش جذب بازدارنده است. C غلظت بازدارنده بر حسب مول بر لیتر و θ میزان پوشاندگی سطح یا راندمان بازدارندگی را نشان می دهد. در صورتی که غلظت و میزان پوشش دهی بر طبق رابطه ی (۳)، یک رابطه ی خطی باشیب نزدیک به یک داشته باشند، می توان ایزوترم جذب لانگمیر را برای جذب بازدارنده به سطح در نظر گرفت [۲۵، ۲۶]. بر این اساس، نسبت بالای انطباق (رابطه ی خطی با شیب نزدیک به یک) برای فولاد، آلومینیوم و فولاد متصل به آلومینیوم، نشان دهنده ی تبعیت بازدارنده از قانون جذب هم دمای لانگمیر است. این رفتار نشان می دهد که جذب مولکول های بازدارنده به سطح فلز و اشغال مکان های سطحی، مستقل از دیگر اجزای جذب شده است.

با بدست آوردن ثابت تعادل و طبق رابطه ی (۴) انرژی آزاد استاندارد جذب (ΔG_{ads}°) قابل محاسبه است.

$$\Delta G_{ads}^{\circ} = -RT \ln(55.5 K_{ads}) \quad (4)$$

در این رابطه R ثابت گازها (بر حسب J/mole.Kelvin) و T دمای آزمایش (بر حسب کلوین) است. مقادیر منفی انرژی استاندارد

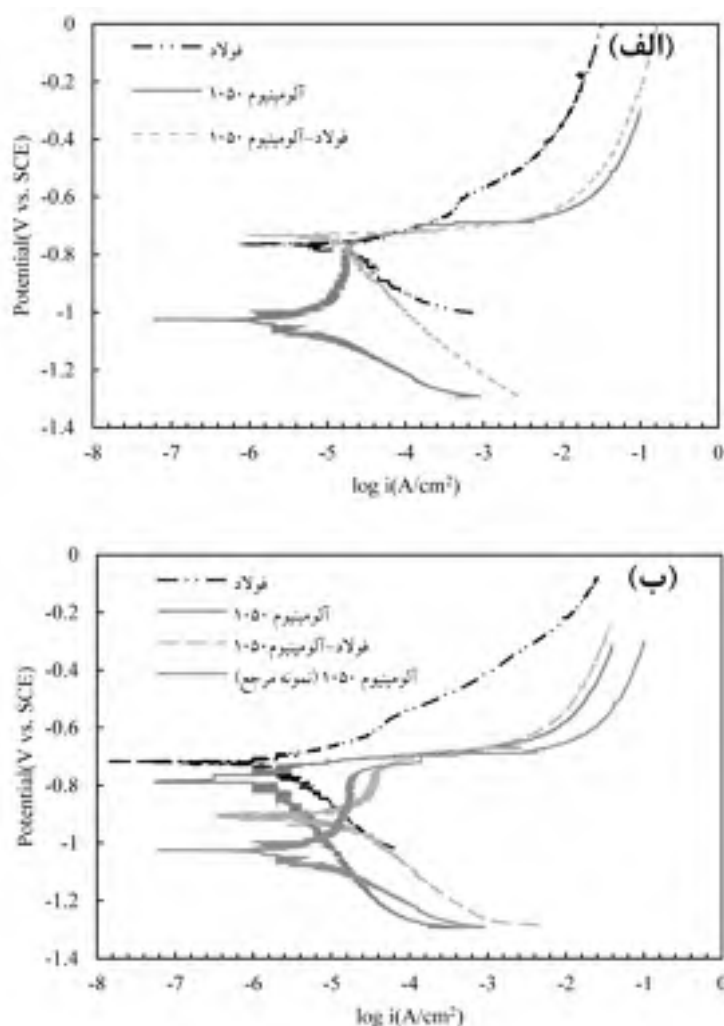
آلومینیوم متصل به فولاد در حضور بازدارنده، حتی از نمونه مرجع آلومینیوم در محلول بدون بازدارنده هم بیشتر شده است. چنین رفتاری احتمالا ناشی از جذب انتخابی بازدارنده به سطح فولاد است که در زوج گالوانیک به عنوان کاتد عمل می کند. جذب انتخابی بنزوتتری آزل بر روی جزء کاتدی در زوج گالوانیک مس - آهن و آلومینیوم - مس نیز گزارش شده است [۱۰، ۲۱]. در حالت کلی، بر روی سطح فلزات مناطق موضعی کاتد و آند تشکیل می شود که محصولات خوردگی بر روی مناطق کاتدی نشست کرده و بدین ترتیب یک پوشش روی سطح فلز تشکیل می دهند [۲۲]. در صورتی که پوشش ایجاد شده غیرفعال بوده و پایداری مناسبی داشته باشد، سبب کاهش سرعت خوردگی می شود. پیش از اتصال آلومینیوم به فولاد، مناطق کاتدی و آندی بر سطح آلومینیوم تشکیل شده و محصولات خوردگی، یک لایه ی غیرفعال بر سطح آلومینیوم تشکیل می دهند که کاهش سرعت خوردگی آلومینیوم را به دنبال دارد [۱]. در حالتی که آلومینیوم به فولاد متصل می شود، مناطق کاتدی به سطح فولاد منتقل شده و ایجاد پوشش غیرفعال بر سطح آلومینیوم به تاخیر می افتد. بنابراین، سرعت خوردگی آلومینیوم که در حالت اتصالی به عنوان آند فدا شونده عمل می کند، افزایش می یابد و از طرفی سرعت خوردگی فولاد متصل به آلومینیوم کاهش می یابد. با این وجود، با افزایش زمان غوطه وری، تشکیل لایه ی غیرفعال بر سطح آلومینیوم متصل به فولاد، فدا شوندگی آن را کاهش می دهد. با توجه به نتایج حاصل از غوطه وری، حضور BTA در آب دریا احتمالا از غیرفعال شدن آلومینیوم (جزء آندی) در اتصال گالوانیک جلوگیری کرده و از طریق افزایش فدا شوندگی آلومینیوم، سرعت خوردگی فولاد متصل به آلومینیوم را به طور چشمگیر کاهش داده است. در بررسی رفتار بازدارندگی سیکلو هگزیل آمین بر خوردگی زوج گالوانیک فولاد - آلومینیوم ۷۰۷۵ نیز نتایج مشابهی بدست آمده



شکل ۴- نمودار ایزوترم جذب بازدارنده BTA بر فولاد کم کربن، آلومینیوم ۱۰۵۰ و فولاد کم کربن متصل به آلومینیوم ۱۰۵۰ در آب دریا

محاسبات برای تعیین ثابت تعادل در این حالت صورت نگرفت. به منظور بررسی بهتر رفتار بازدارندگی، آزمایش های پلاریزاسیون و امپدانس در آب دریا و آب دریای حاوی ۰/۰۱ مولار بنزوتتری آزول انجام شد. در غلظت های مورد مطالعه در آزمایش غوطه وری (کاهش وزن)، غلظت ۰/۰۱ مولار بیشترین راندمان بازدارندگی را ارائه داد. بنابراین در آزمایش های الکتروشیمیایی نیز همین مقدار بازدارنده مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۵ نمودار پلاریزاسیون فولاد، آلومینیوم ۱۰۵۰ و زوج گالوانیک آلومینیوم ۱۰۵۰-فولاد را در آب دریا و آب دریای حاوی BTA نشان می دهد که پارامترهای حاصل از آن در جدول ۳ آورده شده است. مقایسه ی نمودار پلاریزاسیون فولاد در حضور و عدم حضور بازدارنده نشان می دهد که بنزوتتری آزول پتانسیل خوردگی فولاد را به سمت مقادیر مثبت (نجیب) جابجا می کند و دانسیته ی جریان خوردگی را کاهش می دهد. بنزوتتری آزول در محیط سدیم کلرید با محصولات خوردگی

جذب برای فولاد ($-20/76 \text{ kJ/mole}$) و آلومینیوم ($-24/98 \text{ kJ/mole}$) نشان دهنده ی جذب خودبخودی بازدارنده به سطح فلزات است [۲۷]. مقادیر انرژی استاندارد جذب مثبت تر از -20 kJ/mole ، برهم کنش الکترواستاتیک بازدارنده و بار سطحی فلز (جذب فیزیکی) را نشان می دهد و مقادیر منفی تر از -40 kJ/mole اشتراک بار بین بازدارنده و سطح فلز (جذب شیمیایی) را نشان می دهد [۲۸]. مقادیر بدست آمده برای هر دو فلز نشان می دهد که جذب BTA بیشتر به صورت فیزیکی است. همچنین اتصال الکتریکی فولاد به آلومینیوم در آب دریای حاوی بازدارنده BTA انرژی استاندارد جذب بر روی سطح فولاد را به $-34/26 \text{ kJ/mole}$ می رساند. این رفتار نشان می دهد که اتصال فولاد به آلومینیوم، امکان جذب شیمیایی بازدارنده بر سطح فولاد را ایجاد می کند. میزان پوشش دهی بازدارنده برای آلومینیوم متصل به فولاد نیز مقادیری منفی را نشان می دهد که فاقد مفهوم فیزیکی است. بنابراین



شکل ۵- منحنی پلاریزاسیون فولاد کم کربن، آلومینیوم ۱۰۵۰ و زوج گالوانیک فولاد کم کربن-آلومینیوم ۱۰۵۰ در (الف) آب دریا و (ب) آب دریای حاوی ۰/۰۱ مولار BTA

بر روی سطح فولاد کربنی یک فیلم محافظ تشکیل می دهد و با ایجاد پوشش، واکنش های آندی و کاتدی را کند می کند [۱۱]. کاهش دانسیته ی جریان در هر دو شاخه ی کاتدی و آندی احتمالاً ناشی از عملکرد ترکیبی BTA برای فولاد است. همچنین عدم تغییر در شیب شاخه های کاتدی و آندی منحنی پلاریزاسیون فولاد در حضور و عدم حضور بازدارنده نشان دهنده ی این است که حضور بازدارنده تغییری در مکانیزم واکنش های کاتدی و آندی ایجاد نکرده است و حفاظت از طریق پوشش دهی و غیرفعال کردن مناطق کاتدی و آندی صورت گرفته است [۲۹].

شاخه ی آندی نمودار پلاریزاسیون آلومینیوم در آب دریا دارای سه ناحیه ی پتانسیلی است. ناحیه ی اول (-1020 mV تا -940 mV) که در پتانسیل های نزدیک به پتانسیل خوردگی اتفاق می افتد، مربوط به حل شدن موضعی آلومینیوم در اطراف ترکیبات بین فلزی موجود در سطح است. ناحیه دوم (-940 mV تا -790 mV) مربوط به تشکیل فیلم غیرفعال (Passive) بر سطح آلومینیوم و ناحیه سوم (پتانسیل های مثبت تر از -790 mV) که در پتانسیل های فعال تر و پس از ناحیه ی غیرفعال اتفاق می افتد، مربوط به حل شدن بین دانه ای زمینه ی آلومینیومی است [۱۲]. کاهش دانسیته ی جریان خوردگی آلومینیوم 1050 در حضور بازدارنده، عملکرد حفاظتی BTA را نشان می دهد. کاهش سرعت واکنش های کاتدی نقش عمده ای در عملکرد بازدارندگی ممانعت کننده ی آژولی داشته است. حضور BTA در آب دریا سبب حذف نواحی مربوط به خوردگی موضعی و تشکیل اکسید سطحی غیرفعال (-1020 mV تا -790 mV) از شاخه ی آندی آلومینیوم شده است. این رفتار را می توان به عملکرد مناسب بازدارنده در جلوگیری از خوردگی موضعی نسبت داد. این بازدارنده در جلوگیری از خوردگی آلومینیوم 2024 نیز عملکردی مشابه داشته و از طریق ایجاد پوشش بر روی سطح، سرعت خوردگی زمینه آلومینیومی را کاهش داده است [۱۲].

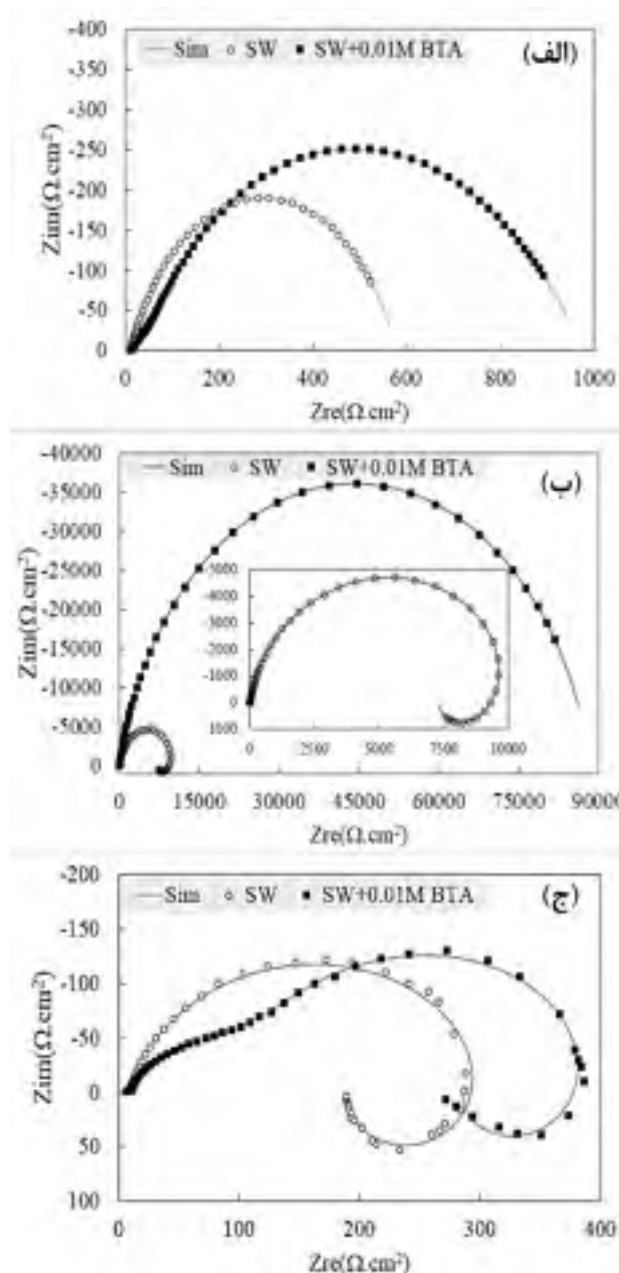
بر اساس تئوری پتانسیل مختلط (Mixed-Potential Theory)،

منحنی پلاریزاسیون زوج گالوانیک براساس جمع سرعت های احیا و اکسیداسیون اجزا در حالت غیر اتصال شکل می گیرد. با مشخص کردن محل تقاطع امتداد خطی شاخه کاتدی فلز نجیب تر و همچنین شاخه آندی فلز فعال تر (تئوری اوانز (Evans Theory)) مقادیر پتانسیل و جریان خوردگی محاسبه شد و با مقادیر تجربی مربوط به زوج گالوانیک مقایسه شد [۳۰]. نتایج نشان داد که دانسیته ی جریان خوردگی زوج گالوانیک، نزدیک به دانسیته ی جریان خوردگی فلزات در حالت غیراتصال است. بنابراین، اتصال الکتریکی نمونه ها به یکدیگر تغییر چشمگیری در دانسیته ی جریان خوردگی آن ها نسبت به حالت غیراتصال ایجاد نکرده که مطابق با نتایج حاصل از آزمایش غوطه وری است. نتایج نشان می دهد که به کارگیری BTA به عنوان ممانعت کننده در آب دریا، عدم مطابقت بین مقادیر حاصل از تئوری اوانز و نمودار زوج گالوانیک را سبب می شود. این عدم تطابق احتمالاً ناشی از تغییر رفتار بازدارندگی در حالت اتصال است. بررسی منحنی پلاریزاسیون زوج گالوانیک غوطه ور در آب دریای حاوی BTA و مطابقت آن با تئوری پتانسیل مختلط نیز نشان می دهد که منحنی بر اساس جمع سرعت های احیا و اکسیداسیون فولاد تحت حفاظت و آلومینیوم مرجع (آلومینیوم در آب دریای فاقد بازدارنده) شکل گرفته است. در واقع، شاخه ی کاتدی منحنی پلاریزاسیون زوج گالوانیک، در امتداد شاخه ی کاتدی فولاد در آب دریای حاوی BTA است، در حالی که شاخه ی آندی منحنی زوج گالوانیک بر اساس شاخه ی آندی آلومینیوم در آب دریای بدون بازدارنده شکل گرفته است. بر اساس تئوری پتانسیل مختلط، این رفتار می تواند نشان دهنده ی عدم جذب بازدارنده به سطح آلومینیوم متصل به فولاد باشد. بر این اساس، حضور BTA در آب دریا نیز تغییرات محسوسی در دانسیته ی جریان خوردگی گالوانیک ایجاد نکرده است که با توجه به کاهش سرعت واکنش های کاتدی بر سطح فولاد، بدست آمدن چنین نتایجی دور از انتظار است. بررسی دقیق تر منحنیهای پلاریزاسیون نشان می دهد که محل برخورد شاخه کاتدی فولاد در حضور و عدم حضور بازدارنده

جدول ۳ - پارامترهای حاصل از منحنی های پلاریزاسیون فولاد کم کربن، آلومینیوم 1050 و زوج گالوانیک فولاد کم کربن-آلومینیوم 1050 در آب دریا و آب دریای حاوی 10^{-3} مولار BTA.

محل	سطح	زمان (h)	دانسیته ی جریان خوردگی ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	پتانسیل خوردگی (mV vs. SCE)	شیب کاتدی (mV/decade)	شیب آندی (mV/decade)	براهمان بازدارندگی (%)
3	فولاد کم کربن	۱	۲۱/۸۷	-۷۷۱	۱۸۲	۱۰۱	-
	آلومینیوم 1050	۱	۸/۱۲	-۱۰۵۲	۱۱۵	۳۹۷	-
	فولاد کم کربن-آلومینیوم 1050	۱	۱۸/۱۹	-۷۶۲	۲۷۲	۱۷	-
3 BTA	فولاد کم کربن	۱	۳/۰۹	-۷۲۲	۱۸۶	۱۰۶	۸۵
	آلومینیوم 1050	۱	۱/۶۲	-۸۱۱	۳۱۵	۳۴	۸۰
	فولاد کم کربن-آلومینیوم 1050	۱	۱۶/۲۱	-۹۱۵	۲۰۵	۳۴۸	۱۰

نکته قابل توجه، کمتر بودن مقاومت انتقال بار نمونه گالوانیک در مقایسه با فلزات در حالت اتصالی است. در سیستم های گالوانیک، رفتار خوردگی زوج گالوانیک تحت تاثیر جزء فعال تر است [۳۳]. در زوج گالوانیک آلومینیوم-فولاد نیز وجود حلقه القایی در محدوده فرکانس های پایین، تایید کننده این رفتار است. بنابراین افزایش سرعت خوردگی آلومینیوم متصل به فولاد، کاهش مقاومت انتقال بار نمونه آندی را به دنبال دارد که به سبب آن مقاومت انتقال بار نمونه گالوانیک کمتر از حالت غیراتصالی فلزات می شود.

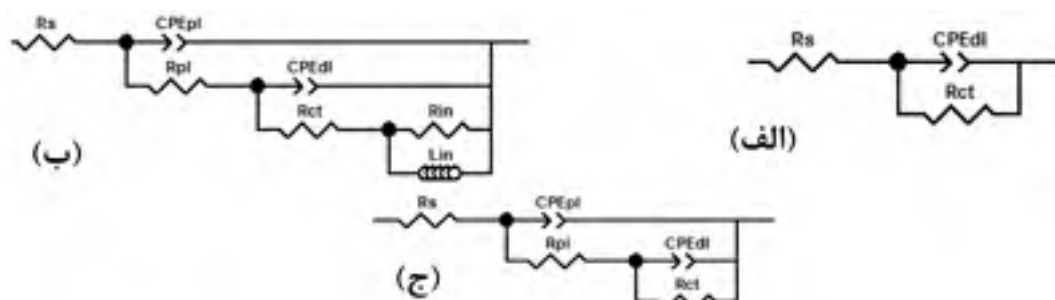


شکل ۶ - نمودارهای نایکوئیست حاصل از آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی و شبیه سازی شده (Sim) با مدار معادل (الف) آلومینیوم ۱۰۵۰، (ب) فولاد کم کربن و (ج) زوج گالوانیک فولاد کم کربن - آلومینیوم ۱۰۵۰ در آب دریا (SW) و آب دریای حاوی بازدارنده بنزوتتری آزول (SW+0.01M BTA)

با شاخه آندی آلومینیوم مرجع در محدوده پتانسیل های غیرفعال آلومینیوم (۹۴۰ mV تا -۷۹۰ mV) واقع شده است. با توجه به اینکه در محدوده پتانسیل غیرفعال، دانسته جریان آندی تغییرات اندکی دارد، بنابراین کاهش دانسته جریان کاتدی فولاد نیز تغییر محسوسی در جریان گالوانیک ایجاد نکرده است. از سویی افزایش دانسته جریان های آندی زوج گالوانیک در آب دریای حاوی بازدارنده نسبت به نمونه مرجع نشان می دهد که حضور بازدارنده تشکیل فیلم محافظ بر سطح آلومینیوم را به تاخیر می اندازد. بنابراین کاهش دانسته جریان کاتدی (کاهش سرعت خوردگی جزء کاتدی) در تقابل با افزایش دانسته جریان آندی قرار گرفته و سبب می شود که حضور بازدارنده تغییر محسوسی در جریان گالوانیک ایجاد نکند.

به منظور ارزیابی بهتر رفتار بازدارندگی، آزمایش امپدانس الکتروشیمیایی نیز انجام شد. شکل ۶ نمودارهای نایکوئیست فولاد، آلومینیوم ۱۰۵۰ و زوج گالوانیک آلومینیوم ۱۰۵۰-فولاد را در آب دریا و آب دریای حاوی BTA نشان می دهد. برای تفسیر نمودارها از مدار معادل های شکل ۷ استفاده شد و نمودار حاصل از شبیه سازی با این مدارها نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. مدار (الف) مربوط به فولاد در آب دریا است که در آن R_s مقاومت محلول، R_{ct} مقاومت انتقال بار و CPE_{dl} رفتار خازنی لایه دوگانه را نشان می دهد. عنصر فاز ثابت Constant Phase Element (CPE) دارای دو پارامتر Y و n است که Y رابطه مستقیمی با سطح فعال خوردگی داشته و n نیز به زبری سطح نسبت داده می شود. مقدار پارامتر n می تواند بین صفر و یک تغییر کند و هرچه این مقدار به یک نزدیک تر باشد، رفتار عنصر فاز ثابت به رفتار یک خازن ایده آل نزدیک تر می شود. همچنین افزایش پارامتر n می تواند به کاهش زبری سطح نسبت داده شود [۳۱]. مدار (ب) مربوط به نمونه آلومینیوم و زوج گالوانیک در آب دریا است. در این مدار R_{pl} و CPE_{pl} به ترتیب مقاومت فیلم اکسیدی غیرفعال و ظرفیت خازنی آن را نشان می دهد. ظهور حلقه القایی Inductive loop (L_{in} و R_{in}) را می توان به ضعیف بودن لایه اکسید سطحی در تشکیل لایه محافظ نسبت داد که به سبب آن در اطراف ترکیبات بین فلزی موجود بر سطح آلومینیوم خوردگی موضعی رخ می دهد [۳۲]. برای تفسیر نمودارهای امپدانس آلومینیوم و فولاد در آب دریای حاوی بازدارنده از مدار (ج) استفاده شد که R_{pl} به ترتیب مقاومت فیلم محافظ تشکیل شده بوسیله بازدارنده و رفتار خازنی این فیلم محافظ را نشان می دهد. مدار مورد استفاده برای تفسیر نمودار امپدانس زوج گالوانیک در آب دریای حاوی بازدارنده BTA نیز مشابه مدار (ب) است، اما در این حالت پارامترهای R_{pl} و CPE_{pl} مربوط به فیلم محافظ تشکیل شده توسط بازدارنده است.

مقاومت بالای انتقال بار نمونه آلومینیومی در مقایسه با نمونه فولادی، کمتر بودن سرعت خوردگی آلومینیوم در آب دریا را نشان می دهد.



شکل ۷ - مدار معادل های مورد استفاده در تفسیر نمودارهای نایکوئیست (الف) فولاد کم کربن در آب دریا، (ب) آلومینیوم ۱۰۵۰ در آب دریا و زوج گالوانیک فولاد کم کربن-آلومینیوم در آب دریا و آب دریای حاوی ۰/۱ مولار BTA (ج) فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در آب دریای حاوی ۰/۱ مولار BTA

جدول ۵- پارامترهای حاصل از همسازی نمودارهای نایکوئیست شکل ۵ با مدارهای شکل ۶.

الکترولیت	سطح	R_s	CPE_{pl}		R_{pl}	CPE_{dl}		R_{ct}	L_{lin}	R_L	راندمان بازدارندگی (%)
			n_{pl}	Y_{pl}		n_{dl}	Y_{dl}				
آب دریا	فولاد کم کربن	۱۱/۰۴	-	-	-	۰/۷۵	۸۱۵	۵۶۶	-	-	-
	آلومینیوم ۱۰۵۰	۸/۳۱	۲/۱	۰/۸۸	۶/۲۴	۱۲/۸۴	-۰/۹	۷۳۱۷	۳۹۵۱	۲۳۹۵	-
	فولاد کم کربن-آلومینیوم ۱۰۵۰	۶/۱۳	۱/۷۲	۰/۷۲	۶/۹۳	۷۶/۳۵	۰/۹۱	۱۷۶/۳	۷۱/۸۲	۱۴۱/۳	-
BTA	فولاد کم کربن	۱۲/۵۲	۱/۹۸	۰/۵۶	۷۸/۶	۶۷	۰/۷۸	۹۱۶	-	-	۳۹
	آلومینیوم ۱۰۵۰	۱۳/۸۹	۱۱/۳۷	۰/۸۷	۲۶۹۱۳	۰/۴۱	۰/۸۸	۶۱۶۱۹	-	-	۸۸
	فولاد کم کربن-آلومینیوم ۱۰۵۰	۹/۱۶	۶۹	۰/۷۵	۱۳۴/۱	۲۹۰	۰/۸۲	۱۴۲/۷	۵۲/۶۱	۱۵۲/۶	-۲۳
$R (\Omega \text{ cm}^2) - Y (\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{n-1}) - L(\text{H})$											

نتایج پلاریزاسیون (کاهش دانسیته جریان های کاتدی) و امپدانس الکتروشیمیایی (حذف حلقه القایی) نشان می دهد که تشکیل فیلم محافظ بر سطح، واکنش های کاتدی بر سطح ترکیبات بین فلزی موجود در آلومینیوم را به تاخیر می اندازد. چنین رفتاری کاهش سرعت خوردگی موضعی در اطراف ترکیبات بین فلزی را سبب می شود [۱۲]. نتایج امپدانس الکتروشیمیایی زوج گالوانیک در آب دریای حاوی بازدارنده نیز جذب انتخابی بازدارنده بر سطح فولاد متصل به آلومینیوم را تایید می کند. با توجه به اینکه رفتار امپدانس زوج گالوانیک بیشتر تحت تاثیر رفتار جزء فعال تر است [۳۳]، عدم حذف حلقه القایی زوج گالوانیک فولاد-آلومینیوم در آب دریای حاوی بازدارنده نشان می دهد که رفتار زوج گالوانیک در این حالت بیشتر تحت تاثیر آلومینیوم مرجع (در آب دریا و در حالت غیراتصالی) است. همچنین مقاومت انتقال بار در حضور بازدارنده کمتر از حالتی است که بازدارنده در محیط حضور ندارد. این رفتار، تاثیر مخرب بازدارنده بر مقاومت به خوردگی آلومینیوم ۱۰۵۰ متصل

حضور بازدارنده در آب دریا باعث کاهش مقادیر پارامتر Y_{dl} برای هر دوفلز در حالت غیراتصالی شده است. با توجه به اینکه این پارامتر رابطه مستقیمی با سطح فعال خوردگی دارد، کاهش مقادیر این پارامتر می تواند نشان دهنده تشکیل پوشش محافظ بر سطح هر دوفلز باشد [۳۴]. بنزوتری آزل از طریق ترکیب شدن با محصولات خوردگی بر روی سطح فولاد و همچنین با جذب بر روی سطح آلومینیوم، یک فیلم محافظ تشکیل می دهد [۱۱، ۱۲]. بدین ترتیب، غوطه وری آلومینیوم و فولاد در آب دریای حاوی BTA، افزایش مقاومت انتقال بار را به دنبال دارد که به سبب آن سرعت خوردگی هر دوفلز کاهش می یابد. داده های موجود در جدول نشان می دهد که جذب بازدارنده به سطح آلومینیوم ۱۰۵۰ بیش از فولاد است که این رفتار راندمان بهتر بازدارنده برای آلومینیوم را سبب شده است. نکته قابل توجه، حذف حلقه القایی از نمودار نایکوئیست و مدار معادل فلز آلومینیوم در حضور بازدارنده است که نشان از پایداری لایه محافظ در جلوگیری از خوردگی موضعی دارد.

به فولاد را تایید می کند که مطابق با نتایج حاصل از پلاریزاسیون و غوطه وری است. یکی از مشکلات استفاده از آندهای فداشونده آلومینیومی در سیستم های حفاظت کاتدی، غیرفعال شدن سطح این آندهاست که کاهش خاصیت فداشوندگی را سبب می شود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که به کارگیری بازدارنده آلای BTA در کنار چنین سیستم هایی از غیرفعال شدن سطح آند آلومینیومی جلوگیری می کند.

نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار بازدارندگی ممانعت کننده آلای بنزوتتری آزول بر خوردگی فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- بازدارنده BTA (غلظت ۰/۰۱ مولار) با عملکرد ترکیبی سرعت خوردگی فولاد کم کربن در آب دریا را ۵۰٪ کاهش می دهد.
- ۲- BTA (غلظت ۰/۰۱ مولار) با ایجاد پوشش بر سطح و به تاخیر انداختن واکنش های کاتدی، سرعت خوردگی آلومینیوم ۱۰۵۰ در آب دریا را ۷۰٪ کاهش می دهد. به تاخیر افتادن واکنش های کاتدی بر سطح ترکیبات فلزی موجود در سطح این فلز از خوردگی موضعی اطراف این ترکیبات بین فلزی نیز جلوگیری می کند.
- ۳- جذب بازدارنده BTA به سطح فولاد کم کربن و آلومینیوم ۱۰۵۰ در آب دریا از ایزوترم جذب لانگمیر پیروی می کند. مقدار انرژی استاندارد جذب BTA به سطح فولاد و آلومینیوم به ترتیب برابر $20/76 \text{ kJ/mole}$ و $24/98 \text{ kJ/mole}$ - که نشان می دهد بازدارنده بیشتر به صورت فیزیکی به سطح این فلزات جذب می شود.
- ۴- اتصال الکتریکی فولاد کم کربن به آلومینیوم ۱۰۵۰ در آب دریا، علاوه بر ایجاد یک چرخه حفاظت کاتدی برای فولاد باعث جذب انتخابی BTA به سطح فولاد متصل به آلومینیوم نیز می شود که به سبب آن سرعت خوردگی فولاد حدود ۹۵٪ کاهش می یابد. مقدار انرژی استاندارد جذب BTA به سطح فولاد در این حالت به $34/26 \text{ kJ/mole}$ - می رسد که نشان می دهد جذب بیشتر به صورت شیمیایی صورت گرفته است.

مراجع

- [1] J.W. Diggle, T.C. Downie, C.W. Goulding, The dissolution of porous oxide films on aluminium, *Electrochim. Acta*. Vol. 15, 1970, Pp.1079-1093.
- [2] F.M. Al-Kharafi, W.A. Badawy, Corrosion and passivation of Al and Al-Si alloys in nitric acid solutions II—Effect of chloride ions, *Electrochim. Acta*. Vol. 40, 1995, Pp.1811-1817.
- [3] A. Balyanov, J. Kutnyakova, N.A. Amirkhanova, V. V Stolyarov, R.Z. Valiev, X.Z. Liao, et al., Corrosion resistance of ultra fine-grained Ti, *Scr. Mater.* Vol. 51, 2004, Pp. 225-229.
- [4] R.R. Kale, V. Prasad, P.P. Mohapatra, V.K. Tiwari, Recent developments in benzotriazole methodology for construction of pharmacologically important heterocyclic skeletons, *Monatshefte Für Chemie-Chemical Mon.* Vol 141, 2010, Pp. 1159-1182.
- [5] C. Cheng, D. Phipps, R.M. Alkhaddar, Investigation of changes in the microbial community during the biodegradation of benzotriazole, in: *Built Environ. Nat. Environ. Conf. Liverpool*, 2006.
- [6] S. Peng, W. Zhao, H. Li, Z. Zeng, Q. Xue, X. Wu, The enhancement of benzotriazole on epoxy functionalized silica sol-gel coating for copper protection, *Appl. Surf. Sci.* Vol. 276, 2013, Pp. 284-290.
- [7] Z. Chen, L. Huang, G. Zhang, Y. Qiu, X. Guo, Benzotriazole as a volatile corrosion inhibitor during the early stage of copper corrosion under adsorbed thin electrolyte layers, *Corros. Sci.* Vol. 65, 2012, Pp. 214-222.
- [8] Y.H. Lei, N. Sheng, A. Hyono, M. Ueda, T. Ohtsuka, Effect of benzotriazole (BTA) addition on Polypyrrole film formation on copper and its corrosion protection, *Prog. Org. Coatings*. Vol. 77, 2014, Pp. 339-346.
- [9] M. Finšgar, I. Milošev, Inhibition of copper corrosion by 1, 2, 3-benzotriazole: a review, *Corros. Sci.* Vol. 52, 2010, Pp. 2737-2749.
- [10] J. Izquierdo, J.J. Santana, S. González, R.M. Souto, Uses of scanning electrochemical microscopy for the characterization of thin inhibitor films on reactive metals: The protection of copper surfaces by benzotriazole, *Electrochim. Acta*. Vol. 55, 2010, Pp. 8791-8800.

- [11] M.M. Mennucci, E.P. Banczek, P.R.P. Rodrigues, I. Costa, Evaluation of benzotriazole as corrosion inhibitor for carbon steel in simulated pore solution, *Cem. Concr. Compos.* Vol. 31, 2009, Pp. 418–424.
- [12] M.L. Zheludkevich, K.A. Yasakau, S.K. Poznyak, M.G.S. Ferreira, Triazole and thiazole derivatives as corrosion inhibitors for AA2024 aluminium alloy, *Corros. Sci.* Vol. 47, 2005, Pp. 3368–3383.
- [13] S.H. Sanad, Effect of benzotriazole on acid corrosion of steel, *Surf. Technol.* Vol. 22, 1984, Pp. 29–37.
- [14] M.M. Antonijevic, S.M. Milic, M.D. Dimitrijevic, M.B. Petrovic, M.B. Radovanovic, A.T. Stamenkovic, The influence of pH and chlorides on electrochemical behavior of copper in the presence of benzotriazole, *Int. J. Electrochem. Sci.* Vol. 4, 2009 Pp. 962–979.
- [15] A. D1141-98, Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water, (2008).
- [16] A. Standard, G1-03, Stand. Pract. Prep. Cleaning, Eval. Corros. Test Specimens, *Annu. B. ASTM Stand.* Vol. 3, 2003, Pp. 17–25.
- [17] M.G. Fontana, Corrosion engineering, Tata McGraw-Hill Education, 2005.
- [18] K.F. Khaled, Molecular simulation, quantum chemical calculations and electrochemical studies for inhibition of mild steel by triazoles, *Electrochim. Acta.* Vol. 53, 2008, Pp. 3484–3492.
- [19] E.E. Stansbury, R.A. Buchanan, Fundamentals of electrochemical corrosion, ASM international, 2000.
- [20] X.G. Zhang, Galvanic corrosion, *Uhlig's Corros. Handb.* Vol. 8, 51 2011, Pp. 123.
- [21] S. Marcelin, N. Pébère, Synergistic effect between 8-hydroxyquinoline and benzotriazole for the corrosion protection of 2024 aluminium alloy: a local electrochemical impedance approach, (n.d.).
- [22] T. Hodgkiess, C.W. Lim, Aspects of galvanic corrosion behaviour of a range of materials in seawater, *Corros. Sci.* Vol. 35, 1993, Pp. 269–283.
- [23] D.R. Lenard, J.G. Moores, The effects of vapor phase corrosion inhibitors on the galvanic corrosion of aluminum, *Corros. Sci.* Vol. 34, 1993, Pp. 871–880.
- [24] V. Afshari, C. Dehghanian, Inhibitor effect of sodium benzoate on the corrosion behavior of nanocrystalline pure iron metal in near-neutral aqueous solutions, *J. Solid State Electrochem.* Vol. 14, 2010, Pp. 1855–1861.
- [25] V.S. Sastri, Corrosion inhibitors: principles and applications, n.d.
- [26] A.K. Singh, S.K. Shukla, M. Singh, M.A. Quraishi, Inhibitive effect of ceftazidime on corrosion of mild steel in hydrochloric acid solution, *Mater. Chem. Phys.* Vol. 129, 2011, Pp. 68–76.
- [27] G. Moretti, G. Quartarone, A. Tassan, A. Zingales, 5-Amino-and 5-chloro-indole as mild steel corrosion inhibitors in 1 N sulphuric acid, *Electrochim. Acta.* Vol. 41, 1996, Pp. 1971–1980.
- [28] P. Atkins, J. de Paula, Atkins' physical chemistry, Oxford Univ. Press. (2006).
- [29] M.A. Amin, K.F. Khaled, S.A. Fadel-Allah, Testing validity of the Tafel extrapolation method for monitoring corrosion of cold rolled steel in HCl solutions—experimental and theoretical studies, *Corros. Sci.* Vol. 52, 2010, Pp. 140–151.
- [30] R. Baboian, Corrosion tests and standards: application and interpretation, American Society for Testing and Materials (ASTM), 1995.
- [31] I. Ahamad, R. Prasad, M.A. Quraishi, Thermodynamic, electrochemical and quantum chemical investigation of some Schiff bases as corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid solutions, *Corros. Sci.* Vol. 52, 2010, Pp. 933–942.
- [32] M. Keddam, C. Kuntz, H. Takenouti, D. Schuster, D. Zuili, Exfoliation corrosion of aluminium alloys examined by electrode impedance, *Electrochim. Acta.* Vol. 42, 1997, Pp. 87–97.
- [33] S. Kallip, A.C. Bastos, K.A. Yasakau, M.L. Zheludkevich, M.G.S. Ferreira, Synergistic corrosion inhibition on galvanically coupled metallic materials, *Electrochem. Commun.* Vol. 20, 2012, Pp. 101–104.
- [34] C. Liu, Q. Bi, A. Leyland, A. Matthews, An electrochemical impedance spectroscopy study of the corrosion behaviour of PVD coated steels in 0.5 N NaCl aqueous solution: Part II.: EIS interpretation of corrosion behaviour, *Corros. Sci.* Vol. 45, 2003, Pp. 1257–1273.