

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

اثر محافظتی بیوفیلم حاصل از فعالیت باکتری بی‌هوازی احیاکننده سولفات بر مقاومت به خوردگی فولاد میکروآلیاژ API X42

مجتبی بقال زاده^۱، خلیل‌الله قیصری^{۲*}، حسین معتمدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۲- دانشیار، مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

۳- استاد، میکروبیولوژی، گروه زیست‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

* khgheisari@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۲	در این پژوهش، اثر محافظتی بیوفیلم ایجاد شده توسط گونه باکتریایی کلوستریدیوم، به عنوان یک باکتری بی‌هوازی احیاکننده سولفات (SRB)، بر روی سطح فولاد میکروآلیاژ X42 در محلول شبیه‌سازی شده خاک شور آزمایشگاهی در مقایسه با شرایط استریل مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور ارزیابی مورفولوژی و ریزساختار سطحی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان (FESEM) مجهز به طیف‌سنج تفکیک انرژی (EDS) استفاده شد. رفتار خوردگی نیز به کمک آزمون پلاریزاسیون خطی و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌های ریزساختاری نشانگر تشکیل بیوفیلم حاوی سه جزء سلول‌های باکتری، ماده پلیمری برون سلولی (EPS) و محصولات خوردگی بود. در این ساختار نسبتاً متراکم، ترکیب نیمه‌رسانای سولفید آهن که مخرب رفتار حفاظتی بیوفیلم است مشاهده نشد. بر پایه آزمون EIS، بیوفیلم ایجاد شده از تخلخل کمتری نسبت به محصولات خوردگی ایجاد شده در شرایط استریل برخوردار است. همچنین، بیوفیلم تشکیل شده در زمان ماندگاری ۲۱ روز در محیط تلقیح شده با باکتری، مقاومت پلاریزاسیون را تا $7330 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ارتقا داد؛ در صورتی که در همین زمان، مقاومت پلاریزاسیون لایه محافظ محصولات خوردگی ایجاد شده در شرایط استریل معادل با $1421 \Omega \cdot \text{cm}^2$ بوده است. این مقایسه، بهبود ۵ برابر در مقاومت به خوردگی را در اثر رفتار محافظتی بیوفیلم نشان می‌دهد.
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۲۶	
کلید واژگان: گونه باکتریایی کلوستریدیوم احیاکننده سولفات فولاد میکروآلیاژ X42 بیوفیلم طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی پلاریزاسیون خطی	

Effect of Protective Behaviour of Biofilm Formed By the Anaerobic Sulfate-Reducing Bacteria on the Corrosion Resistance of the API X42 Microalloyed Steel

Mojtaba Baghalzadeh¹, Khalil Allah Gheisari^{2*}, Hosein Motamedi³

1- MSc student, Department of Materials Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

2- Department of Materials Science and Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

3- Faculty of Science Biology Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

* khgheisari@scu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

10.30495/apme.2021.1927007.2045

Keywords:

Sulfate-Reducing Bacterium

Clostridium Sp

X42 Microalloyed Steel

Biofilm

Electrochemical Impedance

Spectroscopy

Linear Polarization

Abstract

In this study, the protective behavior of the biofilm produced on the surface of the API X42 micro-alloyed pipeline steel by the bacterium clostridium sp. as an anaerobic sulfate-reducing bacteria (SRB) is evaluated in a saline simulated soil solution in comparison with the sterile medium. Microstructure and surface morphology was examined by field emission scanning electron microscopy (FESEM) coupled with energy dispersive spectroscopy (EDS). Corrosion properties were investigated using linear polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results approve the formation of a biofilm consisting of bacterial cells, extracellular polymeric substance (EPS), and corrosion products. In this relatively dense biofilm, semiconductive iron sulfide which is destructive to the corrosion behavior of biofilm is not observed. In addition, the biofilm produced on the metal surface at immersion time of 21 days in the bacterial inoculated medium improves polarization resistance to $7330 \Omega \cdot \text{cm}^2$, while at this time the polarization resistance of the protective corrosion products layer created in the sterile condition is about $1421 \Omega \cdot \text{cm}^2$. This comparison shows a 5-fold improvement in corrosion resistance as a result of the biofilm's protective behavior.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mojtaba Baghalzadeh, Khalil Allah Gheisari, Hosein Motamedi, Effect of Protective Behaviour of Biofilm Formed By the Anaerobic Sulfate-Reducing Bacteria on the Corrosion Resistance of the API X42 Microalloyed Steel, New Process in Material Engineering, 2021, 15(4), 51-63.

۱- مقدمه

باکتری‌های احیاکننده سولفات معروف به SRB^۱ از جمله عوامل میکروبیولوژیک بی‌هوازی خوردگی محسوب می‌گردد که به‌صورت ویژه، خطوط انتقال انرژی فولادی را که در شرایط بی‌هوازی در زیرخاک دفن شده‌اند، موردحمله قرار می‌دهند. گرچه این خطوط عموماً با پوشش آلی محافظت می‌شوند، اما آسیب‌دیدگی‌های موضعی نظیر جدایش سطحی، به برهنگی سطح فلز می‌انجامد. سطح برهنه فلز، می‌تواند مواد آلی مورد استفاده باکتری‌های SRB را جذب نماید و به این شکل مکان مناسبی را جهت تجمع میکروارگانیسم‌های (ریز جانداران) بی‌هوازی فراهم می‌آورد. فعالیت پیچیده این باکتری‌ها بر روی سطح برهنه فلز، رفتار خوردگی را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به‌نحوی که خوردگی تحت کنترل فعالیت این باکتری‌ها، به عنوان خوردگی میکروبیولوژیکی (میکروبی، ریز زیستی) شناخته می‌شود [۳-۱]. اهمیت این نوع از خوردگی از آنجا ناشی می‌شود که هر گرم خاک می‌تواند حاوی ۱۰^{۱۰} میکروارگانیسم باشد [۴]. در این نوع از خوردگی، نوع و شدت خوردگی میکروبی متأثر از عوامل بسیاری از جمله گونه باکتریایی است [۵]. جنبه خطرناک‌تر خوردگی میکروبی، استعداد تبدیل آن از خوردگی یکنواخت به سمت خوردگی موضعی از نوع خوردگی حفره‌ای است [۶ و ۷] که سالانه مسبب تحمیل خسارات هنگفت به صنایع مختلف می‌شود [۸].

باکتری‌ها از الگوی هوشمندانه‌ای جهت حمله به سطح فلز استفاده می‌کنند. ابتدا باکتری به سطح فلز نزدیک شده سپس در تعامل با سایر باکتری‌هایی که به سطح رسیده‌اند، مکانی را برای اقامت انتخاب می‌کنند و به عنوان عضوی از یک میکروکلونی درمی‌آیند [۹]. هم‌زمان با جوانه‌زنی میکروکلونی باکتری‌ها بر روی سطح، این ریزجانداران تولید مواد چسبنده لزج مانند می‌کنند که به ماده پلیمری برون سلولی یا EPS^۲ معروف است. به این شکل، میکروکلونی‌هایی متشکل از میکروارگانیسم‌ها SRB و ماده لزج EPS شکل می‌گیرد. EPS مانند بستری چسبناک، به تشکیل شبکه‌ای پیوسته از این میکروکلونی‌ها می‌انجامد و

پایداری آن‌ها را ممکن می‌کنند. سپس این میکروکلونی‌ها با توسعه و رشد سه بعدی خود، ساختار سه بعدی را به نام بیوفیلم شکل می‌دهند [۱۰].

یک واحد بیوفیلم ایجاد شده با سازوکار توصیف شده در بالا، پس از رسیدن به دوره بلوغ خود، در اثر جدایش فیزیکی، بخشی از باکتری‌ها را به مکان‌های دیگری از سطح گسیل می‌دهد. به این شکل در اثر گسترش فعالیت باکتری‌ها، میکروکلونی‌ها بر روی سطح گسترده می‌شوند و در نهایت یک پوشش لغزنده بر روی سطح فلز تشکیل می‌دهند که گاهی به کل این پوشش لغزنده بیوفیلم گفته می‌شود [۱۱]. ایجاد محصولات خوردگی در حین واکنش الکتروشیمیایی خوردگی تسریع شده توسط فعالیت باکتری، ترکیب بیوفیلم را تغییر داده و محصولات خوردگی نظیر سولفید آهن را وارد ساختار بیوفیلم می‌کند. به این شکل بیوفیلم نهایی از سه جزء سلول‌های باکتریایی، مواد پلیمری برون سلولی و محصولات خوردگی تشکیل شده است. هر بیوفیلم حاوی ۷۵-۹۵ درصد EPS و محصولات خوردگی است و تنها ۵-۲۵ درصد از فضای باقیمانده را سلول‌های باکتریایی اشغال می‌نماید [۱۲].

بیوفیلم ایجاد شده ممکن است نقش محافظت در برابر خوردگی یا برعکس نقش تسریع کننده خوردگی داشته باشد. بر پایه یافته‌های زیادی و همکاران [۱۳]، بیوفیلم به دلیل ایجاد مانعی برای انتقال الکترون بین الکترولیت و سطح فلز، مقاومت به خوردگی را بهبود می‌بخشد. با توجه به یافته‌های آن‌ها از آزمون طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی، مقاومت به انتقال بار در عرض لایه دوگانه در اثر حضور بیوفیلم افزایش و ظرفیت خازنی لایه دوگانه کاهش می‌یابد. کاهش ظرفیت لایه دوگانه، به دلیل افزایش سطح بیوفیلم جذب شده و در نتیجه کاهش سطح مؤثر لایه دوگانه است [۱۴]. اثر مشابهی در مقاومت به انتقال بار (افزایش) و ظرفیت خازنی لایه دوگانه (کاهش) در اثر شکل‌گیری بیوفیلم محافظ مشاهده شده است [۱۲]؛ اما در شرایطی که ساختار بیوفیلم در اثر حضور سولفید آهن رسانا به عنوان محصول خوردگی حاصل از فعالیت باکتری‌ها شکل می‌گیرد، رسانایی الکتریکی بیوفیلم افزایش می‌یابد. در این شرایط

یک پیل گالوانیک بین بیوفیلم و زیرلایه فلزی ایجاد می‌شود که به افزایش سرعت خوردگی منجر می‌گردد [۱۴ و ۱۵]. به تعبیر دیگر، افزایش هدایت الکتریکی بیوفیلم، به سهولت انتقال بار از عرض لایه دوگانه منجر می‌گردد [۱۲]. افزون بر تضعیف رفتار حفاظتی بیوفیلم به دلیل افزایش هدایت الکتریکی بیوفیلم، عامل دیگری که به تخریب رفتار محافظتی بیوفیلم می‌انجامد، ناپایداری و ریزش بیوفیلم است. ناپایداری بیوفیلم به دلیل اتمام فعالیت متابولیکی باکتری‌ها در زمان‌های ماندگاری بالا (بسته به شرایط) به صورت ریزش بیوفیلم مشاهده شده است. ریزش بیوفیلم، اثر محافظتی آن را در دوره زمانی‌های کوتاه‌تر از بین برده و به افزایش مجدد آهنگ خوردگی منجر می‌گردد [۱۲].

در بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته، مقاومت به خوردگی به صورت تابعی از زمان ماندگاری فلز در محیط حاوی باکتری سنجیده شده است؛ اما پیچیدگی رفتار بیوفیلم باعث شده که رفتار مشابهی مشاهده نگردد. در پژوهش مرادی و همکاران [۵] که به بررسی دو گونه از باکتری سودوآلتروموناس^۳ پرداختند، دو رفتار متفاوت از تأثیر بیوفیلم را مشاهده کردند. در یک گونه، ابتدا مقاومت به خوردگی به دلیل تشکیل بیوفیلم افزایش و سپس در زمان‌های ماندگاری طولانی‌تر روند کاهش را دنبال نموده است. برعکس، در گونه دیگری از همین خانواده، تشکیل بیوفیلم به صورت پیوسته به کاهش مقاومت به خوردگی با افزایش زمان ماندگاری انجامیده است. در پژوهش العباس و همکاران [۱۵] یک کنسرسیوم باکتریایی حاوی سه نوع باکتری دسولفومیکروبیوم^۴، کلستریدیوم^۵ و آناروفاگا^۶ که از یک چاه نفتی نمونه‌برداری شده شناسایی گردید. بیوفیلم تشکیل شده توسط این کنسرسیوم باکتریایی نیز ابتدا رفتار محافظتی نشان داده است، اما با افزایش زمان ماندگاری، به دلیل تغییر ترکیب بیوفیلم و تجزیه آن، به کاهش شدید مقاومت به خوردگی انجامیده است. رفتار مشابهی توسط ال وی و همکاران [۱۶] در یک محیط ترکیبی از دو باکتری احیاکننده سولفات و اکسیدکننده آهن، همچنین در محیط حاوی باکتری گونه دسولفوویریو^۷ احیاکننده سولفات توسط لی و همکاران [۱۷] مشاهده گردیده است.

فولادهای میکروآلیاژ، فولادهایی با ترکیب شیمیایی پایه نزدیک به فولادهای ساده کربنی هستند که به آن‌ها مقادیر کمی (در حد چند دهم درصد) از عناصر میکروآلیاژ (نظیر وانادیوم، نیوبوم، تیتانیوم و ...) افزوده شده است؛ اما همین افزایش کم، تأثیر قابل توجهی در بهبود رفتار مکانیکی آن‌ها دارد که به گسترش کاربری آن‌ها در خطوط انتقال انرژی انجامیده است [۱۸ و ۱۹].

هدف از این پژوهش، مطالعه اثر محافظتی بیوفیلم ایجاد شده در اثر فعالیت گونه باکتریایی کلستریدیوم، به عنوان یک باکتری بی‌هوازی احیاکننده سولفات، بر مقاومت به خوردگی فولاد میکروآلیاژ X42 مورد استفاده در خطوط انتقال گاز است. به این منظور، یک محلول شبیه‌سازی شده خاک شور در دو شرایط استریل و تلقیح شده با باکتری تهیه و نمونه‌های فولاد میکروآلیاژ x42 در شرایط بی‌هوازی از زمان ماندگاری سه روز تا ۲۸ روز درون محلول قرار داده شد. ابتدا به کمک آزمون پلاریزاسیون خطی، مقاومت و سرعت خوردگی به صورت تابعی از زمان ماندگاری تعیین گردید. سپس شرایطی که بیوفیلم بهترین رفتار حفاظتی را از خود نشان می‌دهد انتخاب و به کمک طیف‌نگاری امپدانس و ارزیابی‌های ریزساختاری، ویژگی محافظتی بیوفیلم در مقایسه با لایه شبه محافظ محصولات خوردگی ایجاد شده در شرایط استریل، مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته تا به کنون، این نخستین پژوهشی است که به صورت مشخص رفتار حفاظتی ساختار بیوفیلم شکل گرفته در اثر گونه خاص باکتریایی کلستریدیوم را به کمک آزمون‌های الکتروشیمیایی پلاریزاسیون خطی، امپدانس و ارزیابی‌های ریزساختاری مورد بررسی و تحلیل قرار می‌دهد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- شناسایی باکتری و تهیه محلول شبیه‌سازی شده خاک آزمایشگاهی در شرایط استریل و تلقیح شده با باکتری

در این پژوهش، از یک خاک آلوده به لجن، جهت جداسازی، شناسایی و سپس کشت باکتری استفاده شد.

شد. به ازای زمان‌های ماندگاری مختلف (۲۴، ۲۱، ۱۴، ۱۰، ۷، ۳ روز)، یک جار در شرایط یاد شده تهیه و نمونه فولادی آماده‌سازی شده درون جار قرار گرفت. همچنین به منظور مقایسه اثر باکتری بر رفتار خوردگی، نمونه‌هایی با شرایط مشابه، در محیط بی‌هوازی استریل (فاقد باکتری) قرار داده شد.

۲-۲- ارزیابی مورفولوژی سطحی و رفتار خوردگی

مورفولوژی سطحی شامل ارزیابی ریزساختاری محصولات خوردگی، بیوفیلم، شکل ظاهری باکتری‌ها و ترکیب شیمیایی آن‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدان (FESEM) مجهز به طیف‌سنج تفکیک انرژی (EDS) مطالعه شد. قبل از ارزیابی ریزساختاری، فرآیند آب‌زدایی و تثبیت محصولات بیولوژیک بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت [۱۲]. به منظور ارزیابی رفتار خوردگی در دوره زمانی‌ها مختلف در شرایط استریل و تلقیح شده با باکتری، از دو آزمون پلاریزاسیون خطی و طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد.

آزمون طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بر پایه استاندارد ASTM G 106 - 89 (1999)، با به‌کارگیری دامنه ± 10 mv نسبت به پتانسیل مدار باز در بازه بسامدی 10^{-4} - 10^4 Hz انجام گردید. به این منظور، از یک سیستم اندازه‌گیری الکتروشیمیایی خوردگی حاوی یک سل الکتروشیمیایی سه الکترودی (Auto Lab, AUT 84091) استفاده شد که در آن، نمونه فولادی به عنوان الکتروکاتود، الکترود پلاتینی به عنوان الکتروکاتود شماره‌دهنده و الکترود Ag /AgCl به عنوان الکترود مرجع استفاده شد. همچنین، آزمون خوردگی پلاریزاسیون خطی بر مبنای استاندارد ASTM G3 (1999) 89، با در نظرگیری دامنه پتانسیل ± 20 mV نسبت به پتانسیل مدار باز و گام روبشی در حدود 1 mV انجام شد. پس از روبش پتانسیل در این محدوده و ثبت چگالی جریان در هر پتانسیل، منحنی پلاریزاسیون رسم گردید. جهت استخراج داده‌های آزمون‌های خوردگی از نرم‌افزار NOVA

مراحل یاد شده پس از نمونه‌برداری از خاک، در آزمایشگاه میکروبیولوژی صورت گرفت. نتیجه شناسایی مولکولی جدایه‌های جداسازی شده بیانگر حضور باکتری کلوستریدیوم (Clostridium) است؛ به نحوی که یک جدایه شناسایی شده، تشابه ۹۶/۴۱ درصدی با گونه Clostridium aestuarii strain Hy و جدایه دوم نیز تشابه ۹۵/۷۵ درصدی با گونه Clostridium ganghwense strain Hy نشان داد. کلوستریدیوم باکتری میله‌ای شکل، بی‌هوازی اجباری و خاک‌زی محسوب می‌گردد که از جمله عوامل ایجاد کننده بیماری‌های گوارشی است [۲۰]. پس از شناسایی باکتری، مرحله کشت باکتری در شرایط بی‌هوازی و با تجهیزات به دقت استریل شده صورت گرفت. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۲] آمده است.

آماده‌سازی محلول خاک شبیه‌سازی شده، بر مبنای چند نمونه‌گیری از خاک شور در اعماق مختلف منطقه شهری اهواز صورت گرفت. بر پایه میانگین غلظت آنیون‌های سولفات، کلرید و بی‌کربنات به عنوان مهم‌ترین آنیون‌های معرف خاک شور، محلول شبیه‌سازی شده با غلظت ۴/۸ g/L و ۲/۱۴ سولفات سدیم، ۸۴/۵ g/L کلرید سدیم و ۴/۸ g/L بی‌کربنات سدیم تهیه گردید.

از فولاد میکروآلیاژ X42 که در خطوط انتقال گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد به عنوان فلز هدف باکتری‌ها استفاده شد. نمونه‌های فولادی به ابعاد $1 \times 1.5 \times 1.5$ cm³ تهیه و به جزء یکی از سطوح جانبی خود به مساحت ۲/۲۵ cm²، بقیه به کمک مانت سرد پوشیده شد و سطح مورد نظر پرداخت گردید. به انتهای هر نمونه، یک سیم مسی جهت برقراری جریان الکتریکی به نمونه‌ها متصل شد، سپس نمونه‌ها توسط آب مقطر و استون شسته و با استفاده از لامپ UV استریل گردید.

مقدار ۱۱۴ سی‌سی از محلول خاک شبیه‌سازی شده در یک بشر ۱۵۰ سی‌سی ریخته و ۶ سی‌سی از محلول کشت باکتری به آن تلقیح شد. برای برقراری شرایط مناسب تکثیر باکتری کلوستریدیوم در محلول شبیه‌سازی شده، شرایط بی‌هوازی به کمک جار بی‌هوا و با استفاده از یک گازپگ نوع A ایجاد و جار در انکوباتور با دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد نگهداری

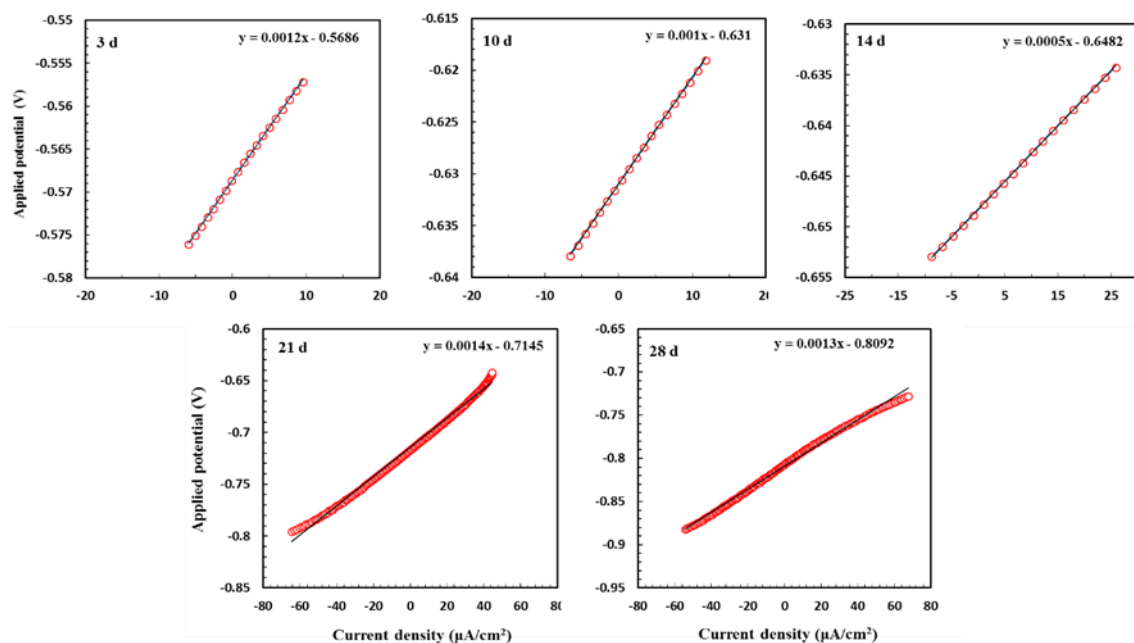
الکترولیت (مقاومت در برابر واکنش کاتدی) یا مقاومت در برابر انتقال یونی از عرض لایه دوگانه (مقاومت در برابر واکنش آندی) است. بدیهی است که هر چه این مقاومت بیشتر باشد، به دلیل کند شدن واکنش‌ها، مقاومت به خوردگی نیز بیشتر می‌گردد. شیب منحنی‌های شکل ۱ با توجه به قانون اهم معادل با مقاومت خوردگی است. در این صورت با یک تقریب خوب، سرعت خوردگی برابر می‌گردد با [۲۱]:

$$i_{cor} \cong \frac{26(mV)}{R_{cor}} \quad (1)$$

1.10.4 و جهت شبیه‌سازی داده‌های امپدانس و انتخاب مدار معادل، از نرم‌افزار ZView استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

شکل ۱، منحنی‌های به دست آمده از آزمون پلاریزاسیون خطی برای نمونه‌های قرار گرفته در زمان‌های ماند مختلف در محیط شبیه‌سازی شده خاک در شرایط استریل را نمایش می‌دهد. هدف اصلی از آزمون پلاریزاسیون خطی، به دست آوردن مقاومت (در برابر خوردگی) است. منظور از مقاومت خوردگی یا مقاومت پلاریزاسیون، مقاومت فلز در برابر انتقال الکترون‌هایش به سمت اجزای فعال اکسندۀ موجود در



شکل (۱): منحنی‌های پلاریزاسیون خطی در زمان‌های ماندگاری مختلف نمونه فولادی در محیط استریل

است. با تقسیم شدت خوردگی بر چگالی ماده ($\rho(g/cm^3)$)، سرعت نفوذ خوردگی به دست می‌آید [۲۱]:

$$CPR(cm/s) = \frac{Mi_{cor}}{mF\rho} \quad (3)$$

در جدول ۱، مقادیر مقاومت خوردگی، سرعت خوردگی، شدت خوردگی و سرعت نفوذ خوردگی برحسب زمان ماندگاری در محیط شبیه‌سازی شده خاک نشان داده شده است. با توجه به نتایج، یک روند بسیار ملایم صعودی در مقاومت به خوردگی و در نتیجه یک روند کاهش در

علاوه بر سرعت خوردگی، شدت خوردگی (CI) و سرعت نفوذ خوردگی (CPR) به عنوان دو مشخصه سینتیکی دیگر خوردگی در ارائه داده‌های خوردگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شدت خوردگی، از روی سرعت خوردگی، با توجه به رابطه زیر به دست می‌آید [۲۱]:

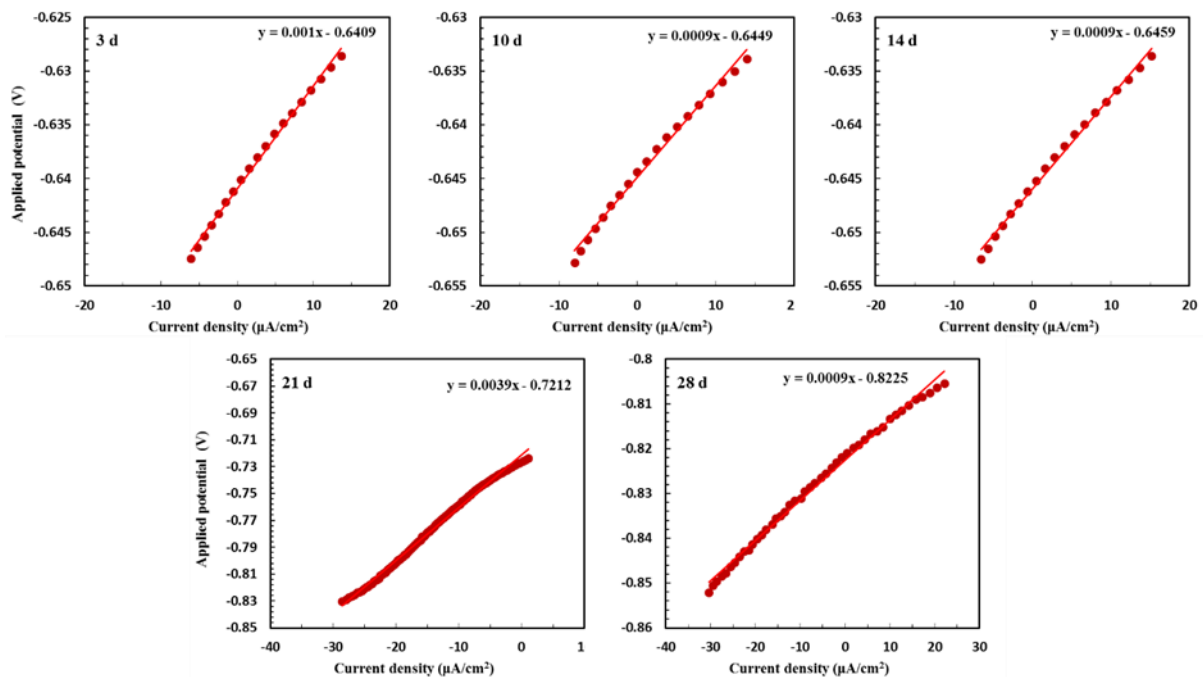
$$CI(g/cm^2.s) = \frac{Mi_{cor}}{mF} \quad (2)$$

که m ظرفیت یونی، $M(g/mol)$ جرم مولی و F ثابت فاراده است. واحد چگالی جریان خوردگی در رابطه بالا A/cm^2

سرعت خوردگی و شدت خوردگی، سرعت نفوذ خوردگی با افزایش زمان ماندگاری در محیط استریل مشاهده می‌شود. این روند، به دلیل ایجاد و توسعه محصولات خوردگی بر روی سطح فلز است که شبیه یک پوشش محافظتی به بهبود رفتار خوردگی انجامیده است؛ اما در زمان ماند ۱۴ روز، یک کاهش قابل توجه و خارج از روند صعودی در مقاومت به خوردگی مشاهده می‌شود. این کاهش ممکن است به دلیل ریزش محصولات خوردگی در حین یا قبل از آزمون باشد. چنین ریزش احتمالی که به دلیل لایه غیر چسبنده محصولات خوردگی ایجاد شده و به کاهش اثر محافظتی لایه می‌انجامد، توسط محققین دیگر نیز مشاهده شده است [۱۲].

در شکل ۲، منحنی‌های آزمون پلاریزاسیون خطی برای نمونه‌های قرار گرفته در زمان‌های ماند مختلف در محیط شبیه‌سازی شده خاک حاوی باکتری آمده است. مقاومت به

سرعت خوردگی و سایر مشخصات سینتیک خوردگی به دست آمده از این منحنی‌ها نیز در جدول ۱ آمده است. با توجه به نتایج، مقاومت به خوردگی در زمان ۲۱ روز ماندگاری، افزایش قابل توجهی یافته است. این افزایش به دلیل تشکیل بیوفیلم محافظ ناشی از فعالیت باکتری‌ها است. در واقع، حضور باکتری‌ها در زمان ماندگاری کمتر از ۲۱ روز، مقاومت به خوردگی را نسبت به محیط استریل افزایش می‌دهد که در اثر آن، محصولات خوردگی و بیوفیلم به سرعت ایجاد می‌شود. شکل ۳، مقاومت به خوردگی در دو محیط را در دوره زمانی ماندگاری مختلف مقایسه کرده است. افزایش آهنگ خوردگی در اثر حضور باکتری‌ها در زمان‌های ماندگاری کم، به دلیل اضافه شدن واکنش کاتدی احیای سولفات در کنار واکنش کاتدی احیای آب توسط باکتری است.

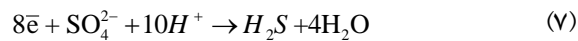


شکل (۲): منحنی‌های پلاریزاسیون خطی در زمان‌های ماندگاری مختلف نمونه فولادی در محیط حاوی باکتری.

به‌طور کلی، سینتیک فرآیند خوردگی در اثر فعالیت بی‌هوازی حاصل از باکتری‌های احیاکننده سولفات را می‌توان بر مبنای دو تئوری مختلف کلاسیک و نوین ارائه نمود. تئوری کلاسیک که معروف به خوردگی

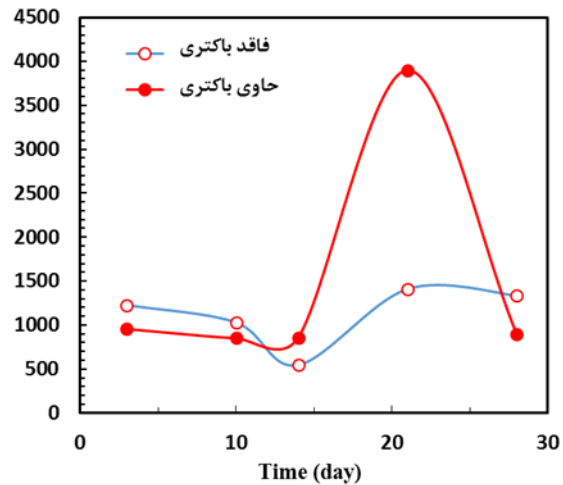
میکروبیولوژیکی شیمیایی (CMIC) است، شامل چندین سازوکار متفاوت است که از معروف‌ترین آن‌ها می‌توان به فرآیند دیپلاریزاسیون کاتدی اشاره نمود.

باکتری بدون واسطه، الکترون‌های آزاد شده توسط واکنش آندی آهن (واکنش ۴) را مصرف می‌کند. در این شرایط، واکنش کاتدی احیای سولفات زیر جایگزین واکنش ۶ می‌شود [۲۴]:



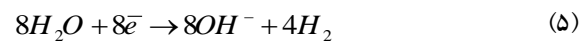
از منظر سینتیک خوردگی، واکنش کاتدی فوق با آهنگ بالاتری صورت می‌گیرد؛ اما پس از اینکه بیوفیلم به دوره بلوغ خود در زمان ماندگاری ۲۱ روز دست می‌یابد، به دلیل اثر محافظتی بیوفیلم، مقاومت به خوردگی افزایش قابل توجهی را از $860 \Omega \cdot cm^2$ در زمان ماندگاری ۱۴ روز تا $3900 \Omega \cdot cm^2$ (بیش از ۴/۵ برابر) دارد. بر پایه برخی از گزارش‌ها [۲۲ و ۲۵]، بیوفیلم داری بار منفی است؛ به نحوی که ساختار چگال با بار منفی بیوفیلم، یک نیروی دافعه‌ای را به آنیون‌های خورنده موجود در محیط وارد کرده که در نتیجه، بهبود رفتار خوردگی را به دنبال دارد.

اما دوره بلوغ بیوفیلم، دوره آغاز فروپاشی و تخریب بیوفیلم نیز است. اثر اضمحلال بیوفیلم در مقاومت به خوردگی به‌خوبی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در زمان ماندگاری ۲۸ روز، به دلیل فروپاشی بیوفیلم، مقاومت به خوردگی به $898 \Omega \cdot cm^2$ کاهش و حتی نسبت به زمان مشابه در محیط استریل ($1335 \Omega \cdot cm^2$) از مقدار کمتری برخوردار شده است. فروپاشی بیوفیلم به دلیل کاهش فعالیت متابولیکی بیوفیلم است که در اثر آن بیوفیلم فروپاشیده و مورفولوژی سطحی توفقی به‌جا می‌ماند [۱۲]. فروپاشی بیوفیلم در دوره مرگ باکتری به اثر لیز شستگی ساختار بیوفیلم در اثر انباشت پیکر باکتری‌ها در ناحیه زیرین بیوفیلم نسبت داده شده است. در واقع، دوره مرگ باکتری در پی افزایش ضخامت بیوفیلم با جذب مواد مغذی موجود در سیستم رخ می‌دهد که همراه با کاهش واکنش‌های تنفسی سلول‌های موجود در نقاط عمیق‌تر به دلیل ساختار فشرده بیوفیلم است که دست‌یابی آن‌ها را به سولفات و سایر مواد مغذی مورد نیاز فعالیت خود دشوار می‌کند.

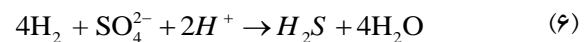


شکل (۳): نحوه تغییر مقاومت به خوردگی برحسب زمان ماندگاری در محلول استریل و حاوی باکتری.

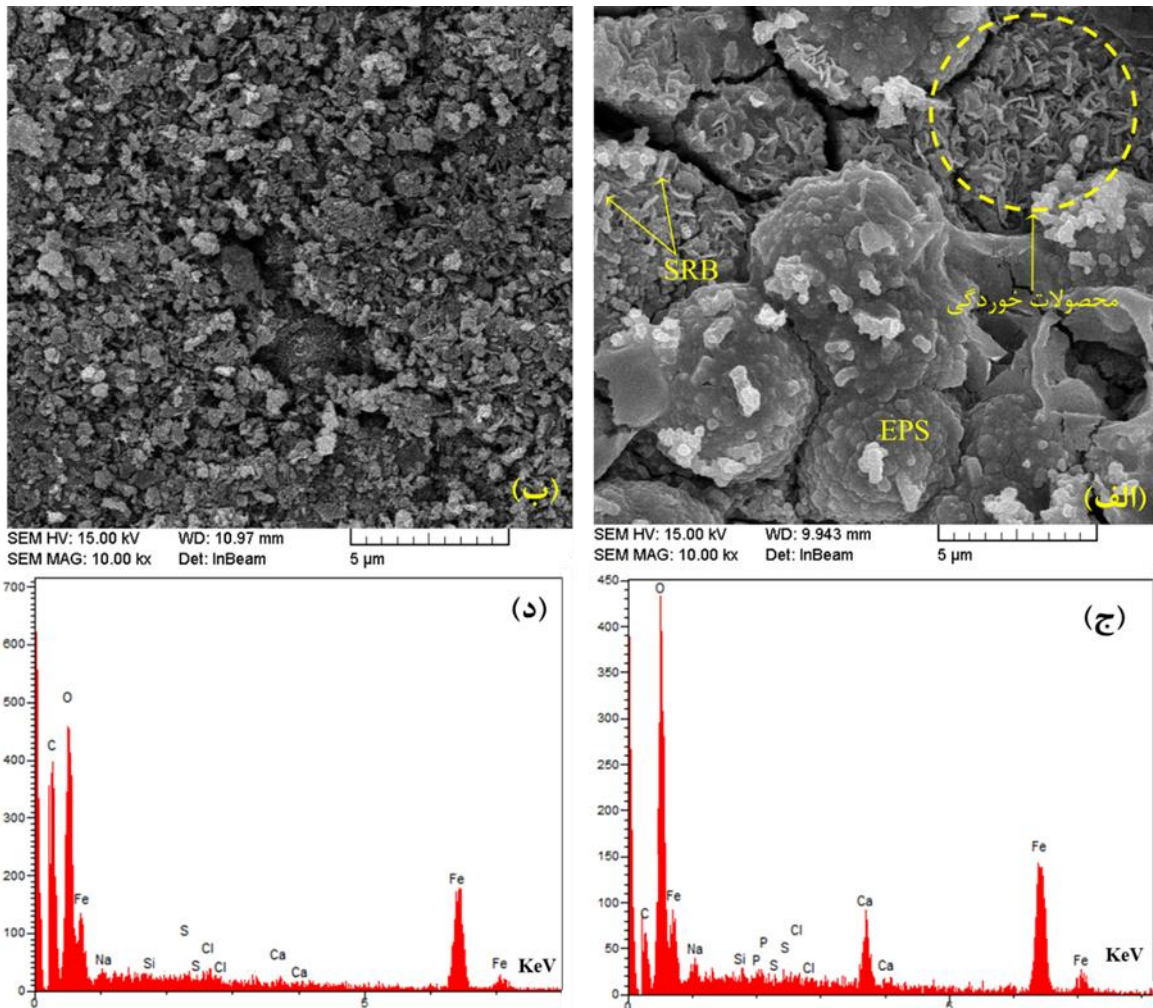
جهت درک بهتر این سازوکارها، ابتدا بایستی سازوکار خوردگی در یک محیط فاقد باکتری را توصیف نمود. در محیط فاقد باکتری، واکنش‌های الکتروشیمیایی آندی (در اینجا اکسایش آهن) و کاتدی (در اینجا احیای آب) به ترتیب به‌صورت زیر توصیف می‌گردد [۲۲ و ۲۳].



اما در شرایط حضور باکتری و بر مبنای تئوری کلاسیک، باکتری‌های احیاکننده سولفات از H_2 ناشی از احیای آب به عنوان دهنده الکترون (واکنش ۵) به انضمام H^+ ناشی از تجزیه آب استفاده می‌کند تا مطابق واکنش زیر سولفات را به سولفید احیا نماید [۲۴]:



بنابراین در اثر حضور SRB، H_2 مصرف می‌شود که به کاهش فشار جزئی مولکول هیدروژن منجر می‌شود. جبران کاهش فشار جزئی H_2 سبب می‌شود که واکنش کاتدی ۵ و در نتیجه آن، واکنش آندی ۶ تشدید گردد. به این شکل سرعت خوردگی در اثر فعالیت باکتری احیاکننده سولفات، شبیه اثر کاتالیزور، افزایش می‌یابد؛ اما در سال‌های اخیر، تئوری جدیدی با عنوان سازوکار خوردگی میکروبیولوژیکی الکتریکی (EMIC) مورد توجه قرار گرفته است. بر این پایه،



شکل (۴): الف) مورفولوژی بیوفیلم، ب) محصولات خوردگی ایجاد شده بر روی سطح در محیط استریل، ج) میکروآنالیز شیمیایی بیوفیلم و د) میکروآنالیز شیمیایی محصولات خوردگی.

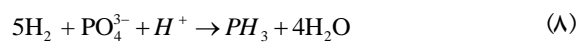
نازک شدن قسمت میانی سلول است، در شکل مشاهده می‌شود. این تصویر، بیانگر فعالیت متابولیکی باکتری است. مورفولوژی محصولات خوردگی ایجاد شده در شرایط استریل ظاهری کاملاً متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-ب، ذرات ظریفی از محصولات خوردگی با اندازه میانگین کمتر از ۱ میکرومتر مشاهده می‌شود که نسبت به ظاهر متراکم‌تر بیوفیلم (خصوصاً در قسمتی که با EPS پوشیده شده)، از تراکم کمتر و در نتیجه رفتار محافظتی ضعیف‌تر برخوردار است.

طیف‌نگاری تفکیک انرژی مربوط به بیوفیلم و محصولات خوردگی ایجاد شده در محیط استریل به ترتیب در شکل‌های ۴-ج و ۴-د نشان داده شده است. با توجه به این الگوها، نتایج زیر قابل استنتاج است:

شکل ۴-الف مورفولوژی سطحی بیوفیلم را متشکل از اجزای سه‌گانه ماده پلیمری برون سلولی، سلول‌های باکتریایی و محصولات خوردگی نشان می‌دهد. شایان‌ذکر است که مادامی که بیوفیلم به دوره بلوغ خود می‌رسد، با مورفولوژی پیوسته و ضخامت کم و بیش یکنواخت کل سطح را می‌پوشاند. در این شرایط، سلول‌های باکتری معمولاً درون بستر EPS فرو می‌روند و به دشواری دیده می‌شوند [۲۶]. در شکل ۴-الف، توده‌های متراکم مشاهده شده مربوط به EPS، تیغه‌های ظریف که در ظاهر مشابه با سلول‌های باکتریایی است مربوط به محصولات خوردگی و ذرات مشاهده شد با مورفولوژی میله‌ای شکل با طول تقریبی ۱ میکرومتر مربوط به سلول باکتری است. تکثیر یکی از سلول‌ها که به صورت

حد قابل‌سنجشی ایجاد نشده است. عدم تشکیل این ترکیب نیمه‌رسانا، امکان تشکیل پیل گالوانیک بین بیوفیلم و زیرلایه که یکی از سازوکارهای تشدید خوردگی در اثر بیوفیلم است را منتفی می‌کند. این نتیجه با رفتار محافظتی مطلوب بیوفیلم (جدول ۱) به‌خوبی سازگار است.

۴) در طیف آنالیز شیمیایی مربوط به بیوفیلم، خطوط مشخصه انرژی کلسیم و فسفر مشاهده می‌شود. منبع این عناصر محیط کشت باکتری است؛ اما جذب قابل توجه آن در بیوفیلم، ممکن است به دلیل تشکیل فسفات کلسیم $(Ca_3(PO_4)_2)$ در اثر عملکرد باکتری در احیای فسفات و تشکیل فسفین باشد [۲۷]:



فسفین ایجاد شده می‌تواند با یون‌های آهن آزاد شده در نیم واکنش آندی واکنش دهد و فسفید آهن را ایجاد نماید.

۱) در هر دو طیف، خطوط مشخصه انرژی آهن و اکسیژن مشاهده می‌شود؛ اما در طیف مربوط به محیط حاوی باکتری، نسبت شدت قله اکسیژن به آهن بالاتر است. این تغییر ممکن است به دلیل تغییر ترکیب محصول خوردگی باشد. اگر فرض کنیم که محصول خوردگی از نوع Fe_xO_y باشد، نسبت Y به X در محصول خوردگی مربوط به بیوفیلم بیشتر است. امکان دیگر، افزایش تدریجی ضخامت لایه بیوفیلم است که در اثر آن، پرتوالکترونی کمتر به زیر لایه فولادی برخورد کرده و در نتیجه آهن مربوط به زیر لایه کمتر در حجم آنالیز قرار می‌گیرد.

۲) در هر دو طیف، درصد کمی از عناصر کلر و سدیم مشاهده می‌شود. این عناصر از محلول خاک شور شبیه‌سازی شده دریافت شده‌اند.

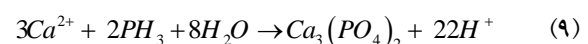
۳) در بیوفیلم تشکیل شده، درصد قابل توجهی عنصر گوگرد مشاهده نمی‌شود؛ بنابراین ترکیب سولفید آهن در بیوفیلم در

جدول (۱): شاخص‌های خوردگی به دست آمده از منحنی‌های پلاریزاسیون خطی در دو محیط استریل و حاوی باکتری

CPR (mils per year)	CI (mg/cm ² . y)	i_{corr} (μA/cm ²)	R_{corr} (Ω.cm ²)	زمان ماندگاری
محیط استریل				
۹/۷	۱۹۳/۷	۲۱/۲	۱۲۲۹	۳
۱۱/۶	۲۳۱/۱	۲۵/۲	۱۰۳۰	۱۰
۲۱/۹	۴۳۶/۲	۴۷/۶	۵۴۶	۱۴
۸/۵	۱۶۸/۸	۱۸/۴	۱۴۱۰	۲۱
۸/۹	۱۷۸/۳	۱۹/۵	۱۳۳۵	۲۸
محیط حاوی باکتری				
۱۲/۵	۲۴۹/۳	۲۷/۲	۹۵۴	۳
۱۴/۰	۲۷۹/۷	۳۰/۵	۸۵۱	۱۰
۱۳/۹	۲۷۶/۷	۳۰/۲	۸۶۰	۱۴
۳/۱	۶۱/۰	۶/۷	۳۹۰۰	۲۱
۱۳/۳	۲۶۵/۱	۲۸/۹	۸۹۸	۲۸

ممکن است مورفولوژی تیغه‌ای شکل مشاهده شده از ترکیب‌های غیرآلی در بیوفیلم، در اثر ایجاد محصول فوق باشد. به منظور ارزیابی دقیق‌تر رفتار خوردگی در اثر حضور بیوفیلم محافظ، در مقایسه با محصولات خوردگی، از طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی استفاده شد. در شکل ۵، منحنی‌های نایکوئیست، بُد، فاز و همچنین مدار معادل که معرف سازوکار فیزیکی خوردگی است برای زمان

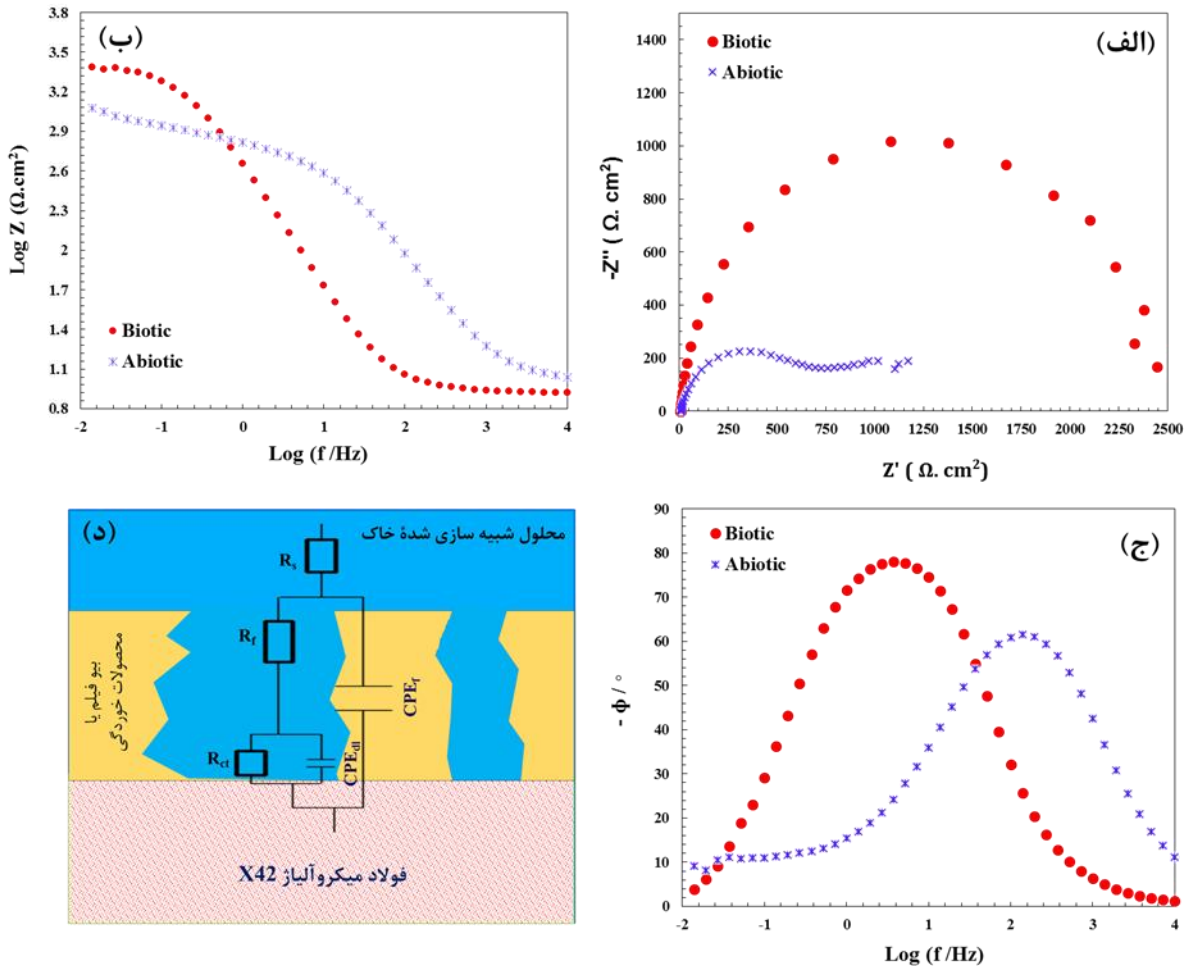
اما احتمال دیگر، واکنش فسفین با یون‌های دیگر موجود در محلول نظیر کلسیم به شکل زیر است:



واکنش فوق، هم غلظت بیشتر اکسیژن ایجاد شده در بیوفیلم را نسبت به محصولات خوردگی در محیط استریل توجیه می‌کند و هم غلظت قابل توجه فسفر و کلسیم در بیوفیلم را.

گردد. داده‌های به دست آمده پس از حصول بهترین انطباق ممکن در جدول ۲ گزارش گردیده است.

ماندگاری ۲۱ روز در دو محیط حاوی باکتری و استریل آماده است. اجزای مدار معادل به نحوی تعیین گردیدند که بهترین انطباق ممکن بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی حاصل



شکل (۵): مقایسه منحنی‌های الف) نایکوئیست، ب) بد و ج) فاز نمونه فولادی قرار گرفته شده در محیط حاوی باکتری و استریل به مدت مشابه ۲۱ روز به همراه د) مدار معادل مورد استفاده به منظور رسم منحنی‌های شبیه‌سازی شده.

جدول (۲): داده‌های امپدانسی استخراج شده از طیف نگاری امپدانس شکل ۵

نمونه	R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_f ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{n-1}$)	R_f ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{dl} ($\text{F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{n-1}$)	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$R_s + R_f$ ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
حاوی باکتری	۳۵	۰/۰۰۰۳۴	۱۰۲۶	۰/۰۰۲۹۳	۶۳۰۴	۷۳۳۰
فاقد باکتری	۱۰	۰/۰۰۰۴۷	۵۰۸	۰/۰۰۱۹۳۷	۹۱۳	۱۴۲۱

فاز ثابت (CPE_{ct}) و مقاومت انتقال بار از عرض لایه دوگانه (R_{ct}) ثابت زمانی در بسامدهای بالا مربوط به لایه محافظ (بیوفیلم/محصولات خوردگی) و ثابت زمانی دوم در بسامد پایین مربوط به انجام واکنش‌های الکتروشیمیایی روی سطح

با توجه به مورفولوژی سطحی، در مدار معادل از دو ثابت زمانی استفاده شد. یکی مربوط به لایه محافظ بیوفیلم/محصولات خوردگی با دو عضو فاز ثابت (CPE_f) و مقاومت لایه (R_f) و دیگری مربوط به لایه دوگانه با دو عضو

د: به ازای هر سطح مقطع دلخواه از پوشش، نسبت کل سطح تخلخل‌ها (A_{pore}) به کل سطح پوشش (A_f) یکسان است. با توجه به پیش‌فرض‌های بالا، کسر حجمی تخلخل‌های پوشش برابر است با:

$$P = \frac{R_s}{R_f} = \frac{\rho(l/A_f)}{\rho(l/A_{pore})} = \frac{A_{pore}}{A_f} = \frac{V_{pore}}{V_f} \quad (9)$$

با توجه به رابطه ۱۰ و داده‌های جدول ۲، درصد حجمی تخلخل‌ها برای بیوفیلم و محصولات خوردگی به ترتیب برابر است با ۲/۲٪ و ۴/۵٪. این محاسبات گرچه از نظر کمی یک تخمین است، اما از منظر کیفی تراکم بیشتر بیوفیلم را نشان می‌دهد.

شایان‌ذکر است که رفتار محافظتی مطلوب‌تر بیوفیلم به صورت واضحی بر مبنای قطر بزرگتر منحنی نایکوئیست مشخص است؛ اما منحنی فاز نیز این رفتار مطلوب‌تر را نشان می‌دهد. در منحنی فاز، بسامدی که در آن قدر مطلق زاویه فاز بیشینه است به سمت بسامدهای کوچک‌تر انتقال یافته است. انتقال این بسامد در منحنی فاز، معرف انتقال بسامدی نقطه شکست به بسامدهای کمتر است. بسامد نقطه شکست، بسامدی است که در بسامدهای بالاتر آن رفتار خازنی لایه محافظ مدار معادل و در بسامدهای کمتر از آن، مجموع اجزای مقاومتی مدار معادل نقش غالب را در مسیر حامل‌های بار ایفا می‌کند [۲۹]. وقتی که این بسامد حدی به سمت بسامدهای کمتر سوق می‌یابد، طیف امپدانس به سمت رفتار ایده‌آل خازنی نزدیک می‌گردد. در نتیجه این انتقال، منحنی بد در بسامد نزدیک به صفر، با مقادیر بالاتری از مقدار امپدانس $\text{Log } Z_{0.01\text{Hz}}$ مواجه می‌گردد. منحنی بد شکل ۵-ب و ج، این رویداد را تأیید می‌کند. محل تقاطع منحنی بُد به محور قائم، در امپدانس بالاتری رخ می‌دهد که بیانگر مقدار بزرگتری از شاخصه $\text{Log } Z_{0.01\text{Hz}}$ است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مورفولوژی و رفتار حفاظت از خوردگی بیوفیلم ایجاد شده توسط باکتری بی‌هوازی احیاکننده سولفات، گونه باکتریایی کلستریدیوم، بر روی فولاد

است [۲۸]. مقاومت محلول نیز با نماد R_s در نظر گرفته شد. با توجه به شکل ۵-د، ذرات بار دار برای عبور از الکترولیت و فلز با برعکس، از دو مسیر مقاومتی عبور می‌کنند. یکی مقاومت ناشی از مسدود شدن سطح فلز به دلیل حضور بیوفیلم/محصولات خوردگی و دیگری مقاومت در برابر عبور از عرض لایه دوگانه. هرچه منافذ لایه محافظ کمتر و لایه محافظ تراکم‌تر باشد، عبور گونه‌های خورنده از منافذ لایه محافظ کمتر و مقاومت R_f بزرگتر می‌گردد. با توجه به داده‌های جدول ۲، بیوفیلم از مقاومت R_f بزرگتری نسبت به محصولات خوردگی ایجاد شده در شرایط بدون باکتری برخوردار است (بیش از دو برابر). افزایش مقاومت به انتقال بار R_{ct} در نمونه حاوی باکتری نیز ممکن است به همین دلیل باشد؛ زیرا که حامل‌های بار کمتری امکان عبور از منافذ بیوفیلم را یافته‌اند، در نتیجه غلظت کمتری از این حامل‌ها امکان عبور از عرض لایه را دارند که در نتیجه آن جریان عبوری کمتری و برعکس آن مقاومت به عبور بیشتر شده است. در نهایت، بیوفیلم هم از R_f بزرگتر و هم از R_{ct} بزرگتری برخوردار گردیده است. مجموع این دو مقاومت $R_f + R_{ct}$ به عنوان مقاومت به خوردگی (در برخی منابع، مقاومت پلاریزاسیون) در نظر گرفته شده است [۲۹]؛ بنابراین، بیوفیلم از مقاومت پلاریزاسیونی در حدود ۵ برابر محصولات خوردگی در نمونه فاقد باکتری برخوردار است. از آنجا که تفاوت رفتار بیوفیلم و محصولات خوردگی، متأثر از منافذ آن‌ها است، در زیر مدلی ساده جهت تخمین درصد تخلخل پوشش ارائه می‌گردد. در این مدل چهار پیش‌فرض در نظر گرفته شده است:

الف: جنس یکسان الکترولیت در محلول با الکترولیت نفوذ کرده به تخلخل‌های پوشش یکی است. بنابراین مقاومت ویژه (ρ) الکترولیت برای هر دو پوشش یکسان است و مقاومت الکترولیت (R_s) میانگین دو مقاومت در دو محیط در نظر گرفته شده است.

ب: ضخامت پوشش (t) در هر دو حالت یکسان است.

ج: طول عمقی حفرات پوشش معادل با ضخامت پوشش ($l=t$) است.

[3] H. Liu & Y. F. Cheng, "Mechanism of microbiologically influenced corrosion of X52 pipeline steel in a wet soil containing sulfate-reduced bacteria", *Electrochimica Acta*, vol. 253, pp. 368-378, 2017.

[4] H. Liu & Y. F. Cheng, "Microbial corrosion of initial perforation on abandoned pipelines in wet soil containing sulfate-reducing bacteria", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 190, pp. 110899, 2020.

[5] M. Moradi, Z. Song, X. Nie, M. Yan & F. Q. Hu, "Investigation of bacterial attachment and biofilm formation of two different *Pseudoalteromonas* species: Comparison of different methods", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 65, pp. 70-78, 2016.

[6] V. S. Liduino, M. T. S. Lutterbach & E. F. C. Sêrvulo, "Biofilm activity on corrosion of API 5L X65 steel weld bead", *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 172, pp. 43-50, 2018.

[7] R. Jia, D. Yang, J. Xu, D. Xu & T. Gu, "Microbiologically influenced corrosion of C1018 carbon steel by nitrate reducing *Pseudomonas aeruginosa* biofilm under organic carbon starvation", *Corrosion Science*, vol. 127, pp. 1-9, 2017.

[8] K. M. Usher, A. H. Kaksonen, I. Cole & D. Marney, "Critical review: microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes", *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 93, pp. 84-106, 2014.

[9] P. Watnick & R. Kolter, "Biofilm, city of microbes", *Journal of bacteriology*, vol. 182, no. 10, pp. 2675-2679, 2000.

[10] B. J. Little & J. S. Lee, "Microbiologically influenced corrosion", vol. 3, John Wiley & Sons, 2007.

[11] J. W. Costerton, P. S. Stewart & E. P. Greenberg, "Bacterial biofilms: a common cause of persistent infections", *Science*, vol. 284, no. 5418, pp. 1318-1322, 1999.

[12] Z. Shahryari, Kh. Gheisari & H. Motamedi, "Effect of sulfate reducing *Citrobacter* sp. strain on the corrosion behavior of API X70 microalloyed pipeline steel", *Materials Chemistry and Physics*, vol. 236, pp. 121799, 2019.

[13] I. Ziadi, H. Akrouf, H. Hassairi, L. El-Bassi & L. Bousselmi, "Investigating the biocorrosion mechanism of 304L stainless steel in raw and treated

میکروآلیاژ X42 در محلول شبیه‌سازی شده خاک شور آزمایشگاهی تلقیح شده با باکتری در مقایسه با شرایط استریل ارزیابی گردید. بر پایه آزمون پلاریزاسیون خطی، در اثر قرارگیری نمونه فولادی به مدت ۲۱ روز در محیط تلقیح شده با باکتری، بیوفیلم با بهترین رفتار حفاظتی تشکیل شده است. با افزایش زمان ماندگاری، به دلیل مختل شدن سازوکار تنفسی باکتری، دوره حیات باکتری به پایان و باکتری وارد دوره مرگ خود شده است. ارزیابی ریزساختاری از بیوفیلم، ساختار سه جزئی نسبتاً متراکمی متشکل از سه جزء سلول‌های باکتری، ماده پلیمری برون سلولی و محصولات خوردگی را نشان داد. تحلیل یافته‌های آزمون طیف‌نگاری امیدانس الکتروشیمیایی نشان داد که میزان تخلخل‌های بیوفیلم تشکیل شده نسبت به محصولات خوردگی ایجاد شده در شرایط استریل کمتر بوده است. همین امر به بهبود قابل توجه رفتار حفاظتی بیوفیلم نسبت به لایه محصولات خوردگی انجامیده است. در زمان ماندگاری ۲۱ روز، مقاومت پلاریزاسیون بیوفیلم معادل با $7330 \Omega \cdot \text{cm}^2$ به دست آمد؛ در صورتی که در همین زمان، مقاومت پلاریزاسیون لایه محافظ محصولات خوردگی ایجاد شده در شرایط استریل $1421 \Omega \cdot \text{cm}^2$ بوده است.

۵- تشکر و قدردانی

تقدیر از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز به دلیل اعطای پژوهانه مورد نیاز این پژوهش به شماره SCU.EM99.222، وظیفه‌ای است که با کمال امتنان ادا می‌گردد.

۶- مراجع

[1] H. Liu & Y. F. Cheng, "Corrosion of initial pits on abandoned X52 pipeline steel in a simulated soil solution containing sulfate-reducing bacteria", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 7180-7189, 2020.

[2] Z. Wang, F. Xie, D. Wang & J. Liu, "Effect of applied potential on stress corrosion cracking behavior of X80 steel in alkaline soil simulated solution with sulfate-reducing bacteria", *Engineering Failure Analysis*, vol. 121, pp. 105109, 2021.

strength steel (API-5L X80)", International Biodeterioration & Biodegradation, vol. 78, pp. 34-42, 2013.

[23] X. Chen, G. Wang, F. Gao, Y. Wang & C. He, "Effects of sulphate-reducing bacteria on crevice corrosion in X70 pipeline steel under disbonded coatings", Corrosion Science, vol. 101, pp. 1-11, 2015.

[24] X. Ping, X. Chao, W. Tao, W. Jing & Zh. Yajun, "Chemical and electron microbial influenced corrosion", Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, vol. 5, no. 12, pp. 476-481, 2013.

[25] J. Xu, C. Sun, M. Yan & F. Wang, "Effects of sulfate reducing bacteria on corrosion of carbon steel Q235 in soil-extract solution", International Journal of Electrochemical Science, vol. 7, pp.11281-96, 2012.

[26] Z. Shahryari, Kh. Gheisari & H. Motamedi, "Corrosion behavior of API X70 microalloyed pipeline steel in a simulated soil solution in the absence and presence of aerobic Pseudomonas species", Materials Research Express, vol. 6, no. 6, pp. 065409, 2019.

[27] A. George, "Microbial reduction of phosphate?, Microbial Diversity project", School of molecular and medical biosciences, University of wales cardff, Cardff, UK, 1995.

[28] C. Sun, J. Xu & F. Wang, "Interaction of sulfate-reducing bacteria and carbon steel Q 235 in biofilm", Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 50, no. 22, pp. 12797-12806, 2011.

[29] R. G. Kelly, J. R. Scully, D. Shoesmith & R. G. Buchheit, "Electrochemical techniques in corrosion science and engineering", CRC Press, 2002.

۲- پی نوشت

- [1] Sulfate-Reducing Bacteria (SRB)
- [2] Extracellular Polymeric Substances (EPS)
- [3] Pseudoalteromonas SP.
- [4] Desulfomicrobium SP.
- [5] Clostridium SP.
- [6] Anaerophaga SP.
- [7] Desulfovibrio Sp.
- [8] Chemical Microbial Influenced Corrosion
- [9] Electrical Microbial Influenced Corrosion

urban wastewaters", Engineering Failure Analysis, vol. 101, pp. 342-56. 2019.

[14] C. Sun, J. Xu & F. Wang, "Interaction of sulfate-reducing bacteria and carbon steel Q 235 in biofilm", Industrial & engineering chemistry research, vol. 50, no. 22, pp.12797-12806, 2011.

[15] F. M. AlAbbas, C. Williamson, S. M. Bholra, J. R. Spear, D. L. Olson, B. Mishra & A. E. Kakpovbia, "Microbial corrosion in linepipe steel under the influence of a sulfate-reducing consortium isolated from an oil field", Journal of materials engineering and performance, vol. 22, no. 11, pp. 3517-3529, 2013.

[16] M. Lv, M. Du, X. Li, Y. Yue & X. Chen, "Mechanism of microbiologically influenced corrosion of X65 steel in seawater containing sulfate-reducing bacteria and iron-oxidizing bacteria", Journal of Materials Research and Technology, vol. 8, no. 5, pp. 4066-4078, 2019.

[17] Q. Li, J. Wang, X. Xing & W. Hu, "Corrosion behavior of X65 steel in seawater containing sulfate reducing bacteria under aerobic conditions", Bioelectrochemistry, vol. 122, pp.40-50, 2018.

[۱۸] ب. یوسفیان، ک. امینی و م. کثیری، "بررسی تأثیر سرعت سرد کردن، دمای پیشگرم و تغییر ترکیب شیمیایی بر روی ریز ساختار و خواص مکانیکی فولاد میکروآلیاژ وانادیوم دار متوسط کربن"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۵۴-۴۷، ۱۳۹۴.

[۱۹] ج. احمدی راد و غ. خلیج، "مدل سازی دگرگونی تشکیل آستنیت در منطقه متأثر حرارتی جوش دو فولاد خط لوله X70 و X65"، فصلنامه علمی پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۲، شماره ۳، صفحه ۷۰-۵۷، ۱۳۹۷.

[20] K. A. Kouassi, A. T. Dadie, Z. Y. Nanga, K. M. Dje & Y. G. Loukou, "Prevalence of sulfite reducing Clostridium species in barbecued meat in Abidjan, Cote d'Ivoire", Journal of Applied Biosciences, vol. 38, pp. 2518-2522, 2011.

[21] E. E. Stansbury & R. A. Buchanan, "Fundamentals of electrochemical corrosion", ASM international, 2000.

[22] F. M. AlAbbas, C. Williamson, S. M. Bholra, J. R. Spear, D. L. Olson, B. Mishra & A. E. Kakpovbia, "Influence of sulfate reducing bacterial biofilm on corrosion behavior of low-alloy, high-