

نقش میکروارگانیسم‌ها در جلوگیری از خوردگی فلزات

رضا کاظمی درسنگی^{۱*}، علیرضا حبیبی^۲

^۱کارشناس ارشد میکروبیولوژی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه دریایی امام خمین‌ای (مدظله‌العالی)، Darsanaki@hotmail.com

^۲دانشجوی دکتری سلولی و مولکولی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه دریایی امام خمین‌ای (مدظله‌العالی)، Alirh110@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۱)

چکیده

فاکتورهای فیزیکی، شیمیایی، الکتروشیمیایی و میکروبیولوژیکی در خوردگی نقش دارند. خوردگی دارای اثرات بد اقتصادی و اجتماعی است و در ایمنی و سلامت افرادی که در صنایع فعالیت می‌کنند، اثرگذار است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد مکانیسم‌های دخیل در خوردگی میکروبی می‌توانند در سرکوبی خوردگی نیز نقش داشته باشند. طی این مطالعه‌ی مروری، مکانیسم‌های میکروبی در جلوگیری از خوردگی فلزات (مهار خوردگی به‌وسیله‌ی باکتری‌های احیاء‌کننده‌ی نیترات، تولیدکنندگان بیوفیلم، باکتریوفاژها، فاژنمایی و...) موردبررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی

خوردگی، فلزات، میکروارگانیسم‌ها.

Role of microorganisms in corrosion inhibition of metals

Reza Kazemi Darsanaki¹, Alireza Habibi²

¹Msc Microbiology, Faculty of Science, Imam Khamenei Marine Sciences University, Email: Darsanaki@hotmail.com

²PhD Candidate, Faculty of Science, Imam Khamenei Marine Sciences University, Email: Alirh110@gmail.com

(Submitted: 2016/Dec/25; Accepted: 2017/Jan/10)

Abstract

The Physical, chemical, electrochemical and microbiological factors can cause corrosion. The corrosion possesses social and economic bad implications and these engage in the safety and health of people either working in industries. Recent studies have shown that the mechanisms involved in microbial corrosion may also contribute to corrosion inhibition. In this paper, we reviewed microbial mechanisms (e.g., Nitrate reducing bacteria, Biofilm-forming bacteria, Bacteriophage and phage display) in corrosion inhibition of metals.

Keywords

Corrosion, Metals, Microorganisms.

خوردگی را می‌توان به‌عنوان فعل و انفعالات یک فلز با محیط پیرامون تعریف نمود که سبب تحلیل‌گند، پایدار و برگشت‌ناپذیری در خواص فیزیکی و شیمیایی فلز می‌گردد. به دلیل الزام به تعویض جزئی یا کلی تجهیزات و سازه‌ها به دلیل خوردگی و تعطیلی کارخانه به‌منظور انجام تعمیرات، پدیده‌ی خوردگی خسارت‌های اقتصادی بسیار قابل‌توجهی به همراه دارد. خوردگی علاوه بر تأثیرات بد اقتصادی، اثرات اجتماعی نیز ایجاد می‌کند و در ایمنی و سلامت افرادی که در صنایع فعالیت می‌کنند یا در شهرهای مجاور ساکن‌اند، نقش دارد. عوامل فیزیکی، شیمیایی، الکتروشیمیایی و میکروبیولوژیکی در خوردگی مؤثر هستند. خوردگی فیزیکی از طریق ضربه، تنش یا فرسودگی فلز ایجاد می‌گردد. خوردگی شیمیایی در اثر اکسیژن، گوگرد، فلوئور، کلر یا سایر گازها ایجاد می‌شود که تحت شرایط محیطی که این پدیده را تسهیل می‌کنند، مستقیماً بر فلز تأثیر می‌گذارند. خوردگی الکتروشیمیایی هنگامی ایجاد می‌شود که در فلز یا در جسم، ناهمگنی وجود داشته باشد و نشان‌دهنده‌ی وجود مناطق آندی و کاتدی و یک‌الکترولیت است [۱].

خوردگی به انواع متعددی طبقه‌بندی می‌شود:

- ۱- خوردگی تعمیم‌یافته (یکنواخت)، که یکپارچه با تهاجم سطح پایین است و هیچ‌گونه نفوذ متمرکز را نشان نمی‌دهد. این خوردگی از دیدگاه فنی اهمیت چندانی ندارد، زیرا عمر تجهیزاتی که تحت این نوع خوردگی قرار می‌گیرند را می‌توان به‌راحتی تخمین زد.
- ۲- خوردگی همراه با سوراخ‌شدگی (حفره‌ای)، که به‌صورت نفوذ متمرکز عمیق مشخص می‌گردد. در این خوردگی، سازه با چند درصد کاهش وزن نسبت به وزن واقعی‌اش، به‌راحتی دچار شکست می‌شود.
- ۳- خوردگی گالوانیک (دوفلزی) که معمولاً زمانی رخ می‌دهد که فلزاتی با پتانسیل‌های آکسایش-کاهش متفاوت در تماس با یکدیگر قرار دارند و فلز دارای پتانسیل آکسایش-کاهشی بالاتر را وادار می‌سازند تبدیل به آند شده و سرعت خوردگی را تسریع بخشد.
- ۴- خوردگی میکروبی^۱ یا خوردگی زیستی که در اثر فعالیت‌های مستقیم یا غیرمستقیم میکروارگانیسم‌ها آغاز

یا تشدید می‌شوند [۲]. نقش میکروارگانیسم‌ها در خوردگی فلزات از اوایل دهه ۱۹۰۰ شناخته شد. خوردگی میکروبی در صنعت و به‌خصوص صنایع نفت و گاز به‌عنوان یک نگرانی عمده تلقی می‌گردد [۳]. باکتری‌ها، قارچ‌ها و جلبک‌ها در خوردگی میکروبی نقش دارند. باکتری‌های عمده‌ای که در خوردگی میکروبی دخیل‌اند شامل: باکتری‌های احیاء‌کننده سولفات^۲، باکتری‌های اُکسیدکننده منگنز/آهن، باکتری‌های احیاء‌کننده‌ی آهن و باکتری‌های تولیدکننده‌ی اسید هستند. این باکتری‌ها معمولاً در اشکال بیوفیلم وجود دارند و با فعالیت متابولیک خود بر فرآیند الکتروشیمیایی تأثیر می‌گذارند [۴]. فعالیت باکتریایی در سطوح فلزی می‌تواند منجر به القاء یا مهار خوردگی گردد [۵]. در حال حاضر راهبردهای پُرکاربرد کنترل خوردگی دارای معیاری چون گران بودن، محدودیت‌های زیست‌محیطی و گاهی ناکارآمدی می‌باشند. مکانیسم‌های احتمالی می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- ۱- حذف عوامل خوردگی (مانند اکسیژن) از طریق فعالیت‌های فیزیولوژیکی باکتریایی (مانند تنفس هوازی).
- ۲- بازدارنده رشد باکتری‌های ایجادکننده خوردگی از طریق مواد ضد میکروبی که در بیوفیلم ایجاد شده‌اند (به‌عنوان مثال، ممانعت از خوردگی باکتری‌های احیاء‌کننده سولفات از طریق بیوفیلم باکتری باسیلوس برویس تولیدکننده‌ی گرام‌سی‌دین).
- ۳- ایجاد لایه‌ی حفاظتی از طریق بیوفیلم (به‌عنوان مثال، بیوفیلم باسیلوس لیکنی‌فرمیس بر روی یک سطح آلومینیومی، یک لایه‌ی حفاظتی چسبنده گاما پلی‌گلوتاماتی تولید می‌کند) [۲، ۶].

طی مقاله مروری حاضر، پیشرفت‌های اخیر در خصوص نقش میکروب‌ها در جلوگیری از خوردگی فلزات بیان می‌شود.

۲- مکانیسم‌های خوردگی میکروبی

فرآیند خوردگی معمول که در محیط‌های مرطوب دریا رخ می‌دهد، فرآیند الکترولیتی است و از طریق اختلاف‌های پتانسیل الکتریکی میان محل‌های آندی و کاتدی بر روی سطوح فولاد ایجاد می‌گردد. میکروب‌ها ممکن است در آب راکدی که حاوی ماده آلی (شامل

² Sulfate Reducing Bacteria (SRB)

¹ Microbial Influenced Corrosion (MIC)

روغن) است؛ به‌عنوان مثال، آب کثیف کشتی‌ها یا آبی که بر روی تانکرهای باری نفت تجمع می‌یابد، رشد و نمو نمایند. خوردگی میکروبی اغلب در دو یا سه مرحله انجام می‌گیرد:

۱- در طول تکثیر میکروبی اولیه، اکسیژنی که به‌طور عادی در آب محلول است، توسط باکتری‌های هوازی و سایر میکروب‌ها مصرف می‌شود. در این مرحله، مواد شیمیایی آلی نسبتاً اسیدی از طریق فرآیندهای اکسایش میکروبی تولید می‌شوند که می‌تواند خوردگی یکنواخت را شتاب دهد. منطقه‌ی نزدیک به رشد میکروبی، دارای کمبود اکسیژن گردیده و آندی می‌شود.

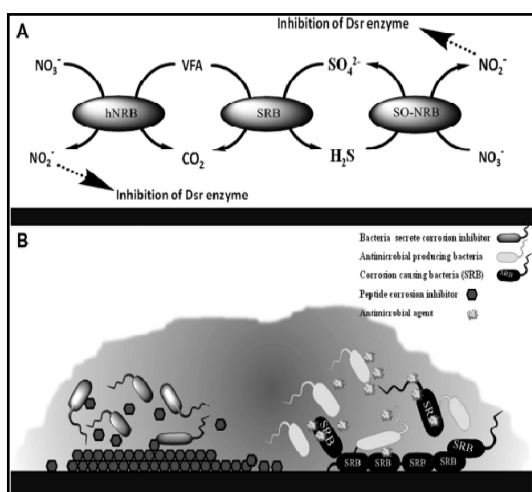
۲- در برخی موارد، شرایط به‌گونه‌ای است که مرحله دیگری رخ می‌دهد که در آن یک یا چند گونه‌ی ویژه از باکتری‌های بی‌هوازی، از مواد شیمیایی اسیدی تغذیه می‌کنند. شناخته‌شده‌ترین نمونه‌های این گونه‌های بی‌هوازی، باکتری‌های احیاءکننده‌ی سولفات است.

۳- اسیدهای قوی مانند اسیدسولفوریک می‌توانند از طریق باکتری‌های اُکسیدکننده‌ی گوگرد و در هنگامی که اکسیژن مجدداً در دسترس قرار می‌گیرد، تولید شود. اسیدهای قوی شتاب بیشتری به فرآیند خوردگی مداوم می‌دهند [۷، ۸].

۳- مهار خوردگی

در حال حاضر، فناوری‌های پُرکاربرد کنترل خوردگی شامل پوشش‌های محافظ، بازدارنده‌های خوردگی، پلیمرها و آلیاژهای مقاوم به خوردگی و ... هستند. پوشش‌های محافظ که عمدتاً برای حفاظت فولاد کربن که به سهولت دچار خوردگی می‌گردد به کار می‌رود. هزینه‌ی پوشش‌های حفاظتی، بزرگ‌ترین بخش هزینه‌ی حفاظت از خوردگی را تشکیل می‌دهد (۸۹/۵ درصد از کل هزینه‌های حفاظت خوردگی). پوشش‌های حفاظتی عبارت‌اند از: پوشش‌های آلی (مانند الاستیک کلردار، وینیل‌ها، اکریلیک‌ها، قیر، پلیمرهای تزریق‌کننده‌ی شعله‌ای و انواع پوشش‌های پلیمریزه) و پوشش‌های غیرآلی (مانند پوشش‌های گالوانیزه‌کننده و فلزی‌کننده). زمانی که پوشش‌های حفاظتی مؤثر نبوده یا با بودجه‌ی محدود مواجه‌اند، آلیاژهای مقاوم در برابر خوردگی مانند فولاد ضدزنگ، آلیاژهای نیکل و آلیاژهای تیتانیوم، به‌عنوان یک گزینه مطرح می‌گردند. بازدارنده‌های خوردگی، آن دسته مواد شیمیایی هستند که زمانی که در مقدار بسیار

اندک به کار می‌روند، می‌توانند مانع از خوردگی گردند و این راهبرد کنترل به شکل گسترده‌ای در صنعت نفت به کار می‌رود [۲]. فناوری‌های فعلی که برای کنترل آلودگی میکروبی به کار می‌روند عبارت‌اند از: بکارگیری آلیاژهای فولادی گران‌قیمت برای مقاومت در برابر خوردگی زیستی، تزریق آفت‌کش‌های شیمیایی و تراشیدن مکانیکی بیوفیلم‌ها که در خطوط لوله ایجاد می‌شوند (با بکارگیری قالب‌های چدنی). جدا از هزینه و مسمومیت‌زایی محیطی، این تکنیک‌ها نمی‌توانند رشد باکتریایی را در بیوفیلم، تحت کنترل قرار دهند. این محدودیت‌ها نگرانی‌های عمده‌ای را در توسعه روش‌های جایگزین غیرفعال‌سازی میکروارگانیسم‌هایی که باعث خوردگی می‌شوند، ایجاد نموده‌اند. یکی از حیطه‌های کاربرد عملی، استفاده از میکروب‌ها برای حذف میکروارگانیسم‌های ایجادکننده‌ی خوردگی است. برخی از این روش‌های بازدارنده شامل کاربرد باکتری‌های احیاءکننده‌ی نیترات، بیوفیلم‌ها، باکتريوفاژها و فاژنمای است (شکل‌های (۱) و (۲)) [۴].



شکل (۱): مکانیسم‌های مهار خوردگی توسط باکتری‌ها. (A) حذف باکتری‌های ایجادکننده‌ی خوردگی (SRB) از طریق باکتری‌های هتروتروف احیاءکننده نیترات (hNRB) و باکتری‌های اُکسیدکننده‌ی سولفید، احیاءکننده‌ی نیترات (So-NRB). (B) مهار خوردگی توسط باکتری‌های تشکیل‌دهنده‌ی بیوفیلم به دلیل تولید یک ماده ضد میکروبی که باکتری‌های عامل خوردگی (SRB) را نابود می‌کند.

می‌دهد، به اندازه‌ای که باکتری‌های بی‌هوازی سخت‌گیر، مانند SRB سرکوب گردند. حذف SRB می‌تواند مانع از تولید هیدروژن شده و سرعت خوردگی را کاهش دهد. نیتريت به‌عنوان یک بازدارنده‌ی آندی شناخته می‌شود. اگرچه، غلظت ناکافی نیتريت می‌تواند باعث خوردگی از نوع حفره‌ای گردد. بنابراین، پایش دائم غلظت نیتريت، برای کاربرد موفق کنترل خوردگی از طریق NRB ضروری است. استفاده از NRB برای کنترل خوردگی می‌تواند گزینه‌ای جالب‌توجه برای صنعت باشد، زیرا یک تکنیک سازگار با محیط‌زیست است که می‌تواند جایگزین آفت‌کش‌ها شود. در این تکنیک، نیتريت به نیتروژن تبدیل می‌گردد که از نظر شیمیایی یک ترکیب بی‌اثر است [۹، ۴].

۳-۲- مهار خوردگی به‌وسیله‌ی بیوفیلم‌های مفید

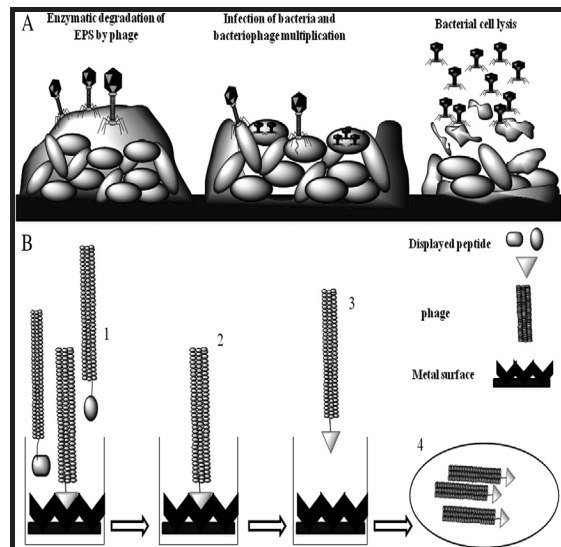
بیوفیلم‌های میکروبی در سال ۱۹۳۶ برای اولین بار توصیف شدند. بیوفیلم از اجتماع باکتریایی بسیار سازمان یافته که در آن سلول‌ها در شبکه‌ای که توسط پلیمر خارج سلولی گرفتار شده‌اند، تشکیل می‌یابد. سلول‌های موجود در بیوفیلم، حالت رشد دیگری را که متفاوت از رشد پلانکتونی است را تجربه می‌کنند. مراحل متعددی در تشکیل بیوفیلم دخیل است:

۱- سلول‌های پلانکتونیک (باکتری‌های آزادی شناور) به سطح نزدیک می‌شوند، به سطح می‌چسبند و رابطه پایداری را از طریق تشکیل یک ریزکلونی با سطح ایجاد می‌کنند.

۲- یک بیوفیلم کامل با ساختار سه‌بعدی که حاوی کانال‌های آب برای انتقال مواد مغذی و پسماندها است تشکیل می‌گردد.

۳- در موارد محرومیت از مواد مغذی، سلول‌ها اجتماع سازمان‌یافته را ترک نموده و به وضعیت رشد پلانکتونی باز می‌گردند [۱۰].

شکل‌گیری بیوفیلم باکتریایی بر روی سطوح فلزی می‌تواند سبب افزایش و یا مهار خوردگی شود. شبکه بیوفیلم می‌تواند مانع از نفوذ عوامل خورنده (مانند اکسیژن، کلراید و غیره) شده و تماس آنها با سطح فلز را کاهش دهد، در نتیجه خوردگی را کاهش می‌یابد [۴]. قابلیت باکتری‌های تشکیل‌دهنده بیوفیلم در ممانعت از خوردگی، طی شرایط آزمایشگاهی نشان داده شده است [۱۱، ۱۲]. برخی باکتری‌های تشکیل‌دهنده‌ی



شکل (۲): مکانیسم‌های مهار خوردگی توسط فاژ. (A) حذف بیوفیلم از طریق تجزیه آنزیمی (پلیمر خارج سلولی) Eps و لیز سلول باکتریایی. (B) پوشش سطوح فلزی از طریق پیتید بازدارنده‌ی خوردگی از طریق روش فاژنمایی.

۳-۱- مهار خوردگی به‌وسیله‌ی باکتری‌های احیاء کننده نیتريت

باکتری‌های احیاء کننده‌ی سولفات می‌توانند باعث ایجاد مشکلات جدی مانند خوردگی میکروبی و ترسیدگی نفت خام شوند. چنین مشکلاتی می‌توانند از طریق تزریق نیتريت تحت کنترل قرار گیرند. نیتريت، رشد باکتری‌های هتروتروف احیاء کننده‌ی نیتريت^۳ و باکتری‌های اکسید کننده‌ی سولفید و احیاء کننده‌ی نیتريت (SO-NRB) را تحریک می‌کند. hNRB برای دستیابی به منبع کربن مانند اسیدهای چرب فرار با باکتری‌های احیاء کننده‌ی سولفات رقابت می‌کند. باکتری‌های اکسید کننده‌ی سولفید و احیاء کننده‌ی نیتريت، اتوتروف بوده و برای دهنده‌های الکترون با SRB رقابت نمی‌کنند. اگرچه همانند hNRB، نیتريت را به نیتريت، اکسید نیتريك، نیتروژن مونوکسید و نیتروژن کاهش می‌دهند. نیتريت برای SRB کشنده است، زیرا می‌تواند از دیس سیمیلاتوری سولفیت ردوکتاز (Dsr) ممانعت نماید که آنزیمی است که کاهش سولفیت به سولفید را کاتالیز می‌کند. حذف SRB می‌تواند به دلیل فعالیت نیتروژن مونوکسید رخ دهد. مونوکسید نیتروژن، پتانسیل اکسایش-کاهش یک محیط معین را افزایش

³ Heterotrophic Nitrate Reducing Bacteria (hNRB)

بیوفیلیم می‌توانند باعث خوردگی شوند، درحالی‌که برخی دیگر می‌توانند مانع از آن گردند. گاهی همان باکتری‌هایی که باعث خوردگی می‌شوند، رفتار سرکوبگر نیز نشان می‌دهند.

تحقیقات بیشتر پیرامون تأثیر بیوفیلیم جمعیت مختلط بر خوردگی ارزشمند خواهد بود؛ زیرا نشان داده شده است که بیوفیلیم تک‌گونه‌ای *Desulfovibrio aespoensis* خوردگی را تسریع می‌نماید، درحالی‌که بیوفیلیم دو‌گونه‌ای *Desulfovibrio aespoensis* و گونه‌ی *Clostridium spp.* مانع از خوردگی فولاد کربن می‌گردد.

اگرچه برخی مکانیسم‌های مشابه برای تسریع و مهار خوردگی از جمله خواص اتصال فلزی EPS وجود دارد، اما برخی از این مکانیسم‌ها، متناقض‌اند. مکانیسم‌های دخیل در مهار خوردگی توسط بیوفیلیم عبارت‌اند از: ۱- جداسازی عوامل خوردگی، ۲- شکل‌گیری یک لایه‌ی حفاظتی، ۳- حذف باکتری‌های ایجادکننده‌ی خوردگی از طریق ماده‌ی ضد میکروبی، ۴- تولید بازدارنده‌ی خوردگی پتید، ۵- تولید ماده‌ی فعال در سطح زیستی [۴].

۳-۳- مهار خوردگی به‌وسیله‌ی فازنمایی

فازنمایی، کاربردترین و عملی‌ترین روش ترکیبی برای تولید کتابخانه‌های پتیدی به شمار می‌رود. این تکنیک تأثیر به‌سزایی در اکتشافات انجام‌شده در زمینه‌ی ایمونولوژی، زیست‌شناسی سلولی و داروسازی دارد. اسمیت و همکاران در سال ۱۹۸۵ این تکنیک را بنا نهادند [۱۳]. اسیدهای آمینه، بازدارنده‌های خوردگی هستند که مسموم‌کننده نیستند. در محیط‌های آبی، کاملاً قابل‌حل هستند و می‌توانند با خلوص بالایی با هزینه‌ی پایین تولید شوند. این بازدارنده‌ها می‌توانند از طریق تکنیک فازنمایی انتخاب گردند. برای دستیابی به توالی‌های پتید تعیین‌شده‌ای که با یک مولکول خاص فعل و انفعال یابند، از مجموعه‌های پتید فازنمایی استفاده می‌شود. در این روش، پتیدهای متفاوتی از طریق همجوشی با یکی از پروتئین‌های سطح فاز، بر روی سطح فاز بیان می‌شوند و سپس پتیدهای دلخواه بر اساس پیوند به مولکول هدف (سطح فلز) انتخاب می‌گردند. تحقیقاتی به مطالعه پتانسیل اسیدهای آمینه به‌عنوان بازدارنده‌های خوردگی پرداخته‌اند [۴]. زو و همکاران در سال ۲۰۰۵ از مجموعه‌ای از ۱۲ پتید

اسیدآمینه که به‌صورت تصادفی تحت نمایش فاز قرار گرفته بودند، برای یافتن پتیدهای جدید استفاده نمودند که می‌تواند از خوردگی آلومینیوم و فولاد ممانعت نماید [۱۴]. هلوچن و همکاران در سال ۱۹۸۸ به بررسی مهار خوردگی آهن از طریق ۲۲ اسیدآمینه پرداختند و مشاهده نمودند که رفتار مهارکنندگی اسیدهای آمینه متغیر بود. برخی مواد مانند تربیتوفان، خوردگی را کاهش دادند درحالی‌که سیستئین و سیستین خوردگی را تشدید نمودند. اسیدهای آمینه با زنجیره هیدروکربن طولانی‌تر و گروه‌های آمینه بیشتر، سرکوبی بالاتری را نشان دادند درحالی‌که اسیدهای آمینه دارای زنجیره کوتاه‌تر مانند اسیدآسپاریک تنها کاهش ۵۰ درصدی سرعت خوردگی را نشان دادند. این‌گونه پتیدهای بازدارنده می‌توانند از طریق اتصال شیمیایی یا از طریق باکتری‌های تشکیل‌دهنده‌ی بیوفیلیم روی فلزات، بی‌تحرك گردند و در نتیجه، پایداری پوشش را افزایش دهند. چندین عامل مانند نوع فلز و شرایط محیطی بر خواص پوشش با پایه پتید تأثیر گذارند [۱۵].

۳-۴- مهار خوردگی به‌وسیله باکتریوفازها

تورث اولین بار در سال ۱۹۱۵، عفونت ویروسی را در باکتری میکروکوکوس شناسایی نمود. در سال ۱۹۱۷ دانشمندی فرانسوی آن را باکتریوفاز نامید. یک روش بیولوژیکی مهار خوردگی که توجه بسیاری را به خود معطوف ساخته است، کاربرد باکتریوفازهای لیتیک به‌عنوان یک ماده‌ی باکتری‌کش است. باکتریوفازها، ویروس‌هایی هستند که تنها سلول‌های باکتریایی را آلوده می‌کنند. آنها از مکانیسم تکثیر سلول میزبان برای تهیه‌ی نسخه‌های بسیار و آلوده نمودن سایر سلول‌های میزبان استفاده می‌کنند. پس از آلوده نمودن میزبان باکتریایی، سرنوشت فازها تغییر می‌کند. برخی فازها از چرخه‌ی لیتیک و برخی دیگر از چرخه‌ی لیزوژنی پیروی می‌کنند. در چرخه‌ی لیتیک، فازهای فرزند، سلول میزبان را تجزیه نموده و باکتری‌های بیشتری را آلوده می‌سازند. درحالی‌که در چرخه‌ی لیزوژنی، فازها در سلول میزبان در حالت پروفاژ باقی‌مانده و تا زمانی که از طریق یک روش فیزیکی یا شیمیایی تجزیه شوند، در آنجا تکثیر می‌شوند [۱۶]. چرخه‌ی فاز لیتیک، جایگزین خوبی برای استفاده از یک آفت‌کش است. یکی از محاسن فازها نسبت به آفت‌کش‌ها، قابلیت خود تکثیرشوندگی آنها است که دوز فاز موجود در

[5] Potekhina, J. S., Sherisheva, N. G., Povetkina, L. P., Pospelov, A. P., Rakitina, T. A., Warnecke, F., and Gottschalk, G., "Role of microorganisms in corrosion inhibition of metals in aquatic habitats," *Appl. Microbiol Biotechnol*, Vol. 52, pp. 639-646, 1999.

[6] O'Toole, G., Kaplan, H. B., and Kolter, R., "Biofilm formation as microbial development" *Annu. Rev. Microbiol*, Vol. 54, pp. 49-79, 2000.

[7] <http://www.dnvusa.com>

[8] Marcus, P., "Corrosion mechanisms in theory and practice," CRC Press (Tylor and Francis), 2011.

[9] Grigoryan, A. A., Cornish, S. L., Buziak, B., Lin, S., Cavallaro, A., Arensdorf, J. J., and Voordouw, G., "Competitive oxidation of volatile fatty acids by sulfate- and nitrate-reducing bacteria from an oil field in Argentina," *Appl. Environ. Microbiol*, Vol. 74, pp. 4324-4335, 2008.

[10] Probert, H. M., and Gibson, G. R., "Bacterial biofilms in the human gastrointestinal tract," *Curr. Issues Intest. Microbiol*, Vol. 3, pp. 23-27, 2002.

[11] Mansfeld, F., Hsu, H., Ornek, D., Wood, T. K., Syrett, B. C., "Corrosion control using regenerative biofilms on aluminum 2024 and brass in different media," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 149, pp. 130-138, 2002.

[12] Chongdar, S., Gunasekaran, G., and Kumar, P., "Corrosion inhibition of mild steel by aerobic biofilm," *Electrochim. Acta*, Vol. 50, pp. 4655-4665, 2005.

[13] Arap, M. A., "Phage display technology, applications and innovations," *Genetics and Molecular Biology*, Vol. 28, pp. 1-9, 2005.

[14] Zuo, R., Ornek, D., and Wood, T. K., "Aluminum and mild steel binding peptides from phage display," *Appl. Microbiol. Biotechnol*, Vol. 68, pp. 505-509, 2005.

[15] Hluchan, V., Wheeler, B. L., and Hackerman, N., "Amino acids as corrosion inhibitors in hydrochloric acid solutions," *Mat. Corrosion*, Vol. 39, pp. 512-517, 1988.

[16] Veiga-Crespo, P., Barros-Velázquez, J., and Villa, T. G., "What can bacteriophages do for us?," *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology/Ed: A Mendez Vilas*, pp. 885-893, 2007.

روند تیمار را افزایش می‌دهد. آلودگی باکتریایی از طریق اتصال باکتروفاژ به گیرنده‌های خاصی بر روی سطح باکتری‌ها آغاز می‌گردد. فاژ دارای گیرنده خاصی است که میزبان فاژ را تعیین می‌کند. برخی از فاژهای دارای طیف محدود می‌باشند درحالی‌که برخی دیگر از طیف گسترده‌ی میزبان برخوردار بود و می‌توانند بسیاری از سویه‌های باکتریایی یک یا چندگونه را آلوده کنند. از شناسایی عوامل تأثیرگذار بر رفتار فاژ می‌توان برای حذف موفق باکتری‌های ایجادکننده‌ی خوردگی استفاده نمود. البته، در کاربرد باکتروفاژها در کنترل خوردگی مطالعات محدودی انجام گرفته است [۴].

۵- نتیجه‌گیری

مدت‌ها باکتری‌ها به دلیل تغییر شیمیایی که بر روی سطح فلز ایجاد می‌کردند، عامل ایجادکننده‌ی خوردگی تلقی می‌شدند. اگرچه، تحقیقات اخیر شواهدی را فراهم نموده است که نشان می‌دهد مکانیسم‌های دخیل در خوردگی میکروبی نیز می‌توانند در سرکوبی خوردگی نقش داشته باشند. اگرچه، مکانیسم‌های خوردگی و مهار آن از طریق میکروپها تا حدی شناخته شده است؛ اما به دلیل تغییرپذیری فعالیت میکروبی، هنوز باید اطلاعات بسیاری در رابطه با آن به دست آید. تحقیقات بیشتر به‌منظور شناخت بهتر زندگی میکروبی و واکنش آن با محیط پیرامون به بررسی مشکلات خوردگی کمک خواهد نمود.

منابع:

[1] Palou, R. M., Olivares-Xomelt, O., and Likhanova, N. V., "Environmentally friendly corrosion inhibitors," *In Tech.*, 2014.

[2] Zuo, R., "Biofilms: strategies for metal corrosion inhibition employing microorganisms," *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol. 76, pp. 1245-1253, 2007.

[3] Kakooei, S., Ismail, M., and Ariwahjoedi, B., "Mechanisms of microbiologically influenced corrosion: A review," *World Applied Sciences Journal*, Vol. 17, No. 4, pp. 524-531, 2012.

[4] Zarasvand, K. A., and Rai, V. R., "Microorganisms: induction and inhibition of corrosion in metals," *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol. 87, pp. 66-74, 2014.