

روش‌شناسی و مدل عملیاتی مبتنی بر فناوری زیستی در مهار

خوردگی شناورها و سازه‌های دریایی

رضا کاظمی درسنگی^۱، علیرضا حبیبی^{۲*}

^۱ و ^۲ گروه علوم پایه، دانشکده علوم، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه‌السلام)، زیباکنار، رشت، ایران

*نویسنده مسئول: Alirh110@gmail.com

چکیده:

خوردگی در محیط آب از سه منظر خوردگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی قابل بررسی است. حدود ۴۵ درصد خوردگی‌ها توسط میکروارگانیسم‌های زنده، جلبک‌ها، لارو بارناکل‌ها و سایر آبزیان زنده اتفاق می‌افتد. بیوفولینگ یا انباشت رسوبات زیستی با تشکیل یک لایه چسبنده بر روی شناورها و سازه‌های دریایی به نام بیوفیلم آغاز می‌شود. مشکلات اقتصادی، اجتماعی و بهداشتی از مهمترین اثرات نامطلوب خوردگی است. در این مقاله مروری، با استفاده از کلمات کلیدی مرتبط، از پایگاه‌های علمی معتبر مانند Science Direct، Springer و Google Scholar با قالب "Narrative Review article(s)" و "Review of the literature." و "article(s)" review جستجو انجام شده و مطالب مورد بررسی قرار گرفته است. برای مهار خوردگی روش‌های مختلف شیمیایی و فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته است، اما از منظر زیستی توجه چندانی به آن نشده است. از مهم‌ترین روش‌های مهار خوردگی زیستی می‌توان استفاده از باکتری‌های احیاکننده نیتрат، تکنیک فاژنمایی، استفاده از باکتریوفاژ و نیز استفاده از برخی میکروارگانیسم‌ها اشاره نمود. در این تحقیق با استفاده از تکنیک‌های تخصصی و به کمک علوم شیمی، مهندسی ژنتیک، سلولی مولکولی و بیوتکنولوژی نقشه راه کنترل بیوفولینگ که منجر به مهار خوردگی می‌شود، پیشنهاد شده است. در صورت انجام عملی این تحقیق، با هزینه‌ای بسیار کمتر از روش‌های سنتی، خوردگی کنترل خواهد شد.

کلمات کلیدی:

بیوفولینگ، بیوفیلم، خوردگی، کنترل خوردگی و آنتی بیوفولینگ

Methodology and operational model based on biotechnology in corrosion control of vessels and offshore structures

Reza Kazemi Darsanki¹, Alireza Habibi^{* 2}

^{1,2} Department of Basic Sciences, Faculty of Science, Imam Hussein (As) Officer and Guard Training University, Zibakenar, Rasht, Iran

* Corresponding author: Alirh110@gmail.com

Abstract:

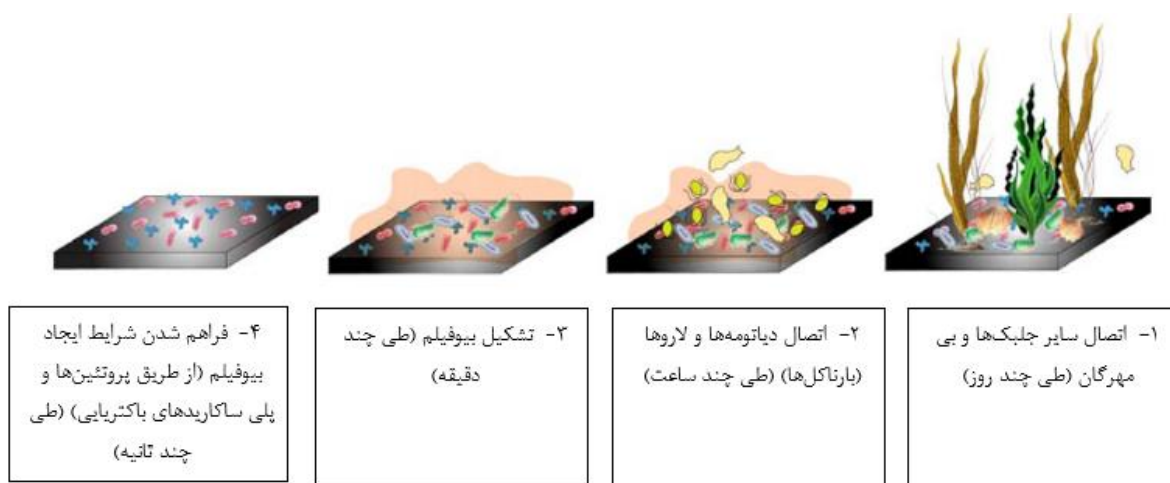
Corrosion in the water environment can be examined from three perspectives, Physical, chemical and biological corrosion. 45% of corrosion occurs by living microorganisms, algae, barnacles' larvae and other live aquatic animals. Biofouling or accumulation of biological sediments, begins by forming a sticky layer on vessels and offshore structures called biofilms. Economic, social and health problems are the most important adverse effects of corrosion. In this review, using related keywords from scientific databases such as Science Direct, Springer and Google Scholar in the style of "Narrative Review article (s)", "Review of the literature and article (s)" review" the search was done and the content is reviewed. Different chemical and physical methods have been investigated to prevent corrosion. However, based on biological perspective, little attention has been paid to it. The most important methods of bio-corrosion inhibition are nitrate-reducing bacteria, phage display technique, use of bacteriophage and some microorganisms. In this study, using specialized techniques via chemistry, genetic engineering, molecular cellular and biotechnology, biofouling control roadmap that leads to corrosion inhibition has been proposed. By doing this research practically, the corrosion will be controlled at a much lower cost than traditional methods.

Keyword: Biofouling, biofilm, corrosion, corrosion control and anti-biofouling

۱- مقدمه

در علم شیمی، خوردگی عبارت از تغییر ویژگی‌های فلزات است که در اثر واکنش آن‌ها با محیط اتفاق می‌افتد. نکته قابل توجه این است که در طبیعت همه مواد با گذشت زمان دستخوش خوردگی می‌شوند. از منظر علم شیمی، علت اصلی خوردگی پایین آمدن انرژی گیبس است که منجر به انجام واکنش شیمیایی دو یا چند ماده با هم می‌شود. علت اولیه خوردگی در محیط‌های دریایی از منظر زیستی وجود جلبک‌ها و باکتری‌های مختلف است. در محیط‌های آبی، به‌طور کلی دو نوع زندگی برای باکتری‌ها متصور است: پلانکتونیک یا شناور و چسبنده. باکتری‌ها می‌توانند بسته به شرایط محیط و با ایجاد تغییرات ژنتیکی از حالت شناور به حالت چسبنده تغییر ماهیت بدهند. این تبدیل ماهیت با ایجاد یک لایه چسبنده به نام بیوفیلم انجام می‌شود و باکتری در زیر آن

به ادامه حیات می‌پردازد. در واقع آغاز تشکیل بیوفیلم با ترشح برخی پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدهای چسبنده آغاز می‌شود. همزمان ارتباطات محیط داخل بیوفیلم و خارج آن از طریق یک سیستم ژنتیکی به نام Quorum sensing انجام می‌شود. QS طیف وسیعی از فرایندها را کنترل می‌کند که در نهایت منجر به مقاومت باکتری در برابر تغییرات شدید محیطی می‌شود [۱]. بیوفیلم سپس توسط جلبک‌هایی مثل دیاتومه‌ها، بارناکل‌ها و پروتوزوآها و همچنین دیگر جانداران مهره‌دار و بی‌مهره ضخیم می‌شود و تشکیل ساختاری به نام Biofouling یا انباشت رسوبات زیستی را می‌دهند. به‌طور کلی تشکیل انباشت رسوبات زیستی بر روی شناورها و سازه‌های دریایی کمتر از یک ماه انجام می‌شود (شکل ۱). علت ۴۵ درصد غشاهای رسوبی سازه‌های دریایی، بیوفولینگ ناشی از موجودات زنده است [۲].



شکل ۱- پروسه تشکیل انباشت رسوبات زیستی بر روی شناورها و سازه‌های دریایی [۳].

انباشت رسوبات زیستی بر بدنه شناورها و سازه‌های دریایی امکانی را فراهم می‌کند که انرژی و نیازهای غذایی آن‌ها تأمین شود. ماهیت غیر یکنواخت بیوفیلم بر روی سطوح، منجر به ایجاد سلول‌های غنی از اکسیژن می‌شود و این آغاز خوردگی زیستی است. علاوه بر این، فرآورده‌های متابولیک اسیدی بیوفیلم که توسط باکتری‌های احیاء کننده سولفات تولید می‌شوند، نیز می‌توانند به آغاز فرآیند خوردگی کمک کنند [۴].

باکتری‌های متعددی در آب در ایجاد خوردگی نقش دارند: باکتری‌های احیاء کننده سولفات (SRB^1)، باکتری‌های احیاء کننده آهن، باکتری‌های تولید کننده اسید و باکتری‌های اکسید کننده منگنز/آهن مهم‌ترین این باکتری‌ها هستند. این باکتری‌ها معمولاً در اشکال بیوفیلم وجود دارند و با فعالیت متابولیک خود بر فرآیند الکتروشیمیایی تأثیر می‌گذارند [۵]. خوردگی ناشی از میکروپها در چهار گام انجام می‌گیرد، مصرف اکسیژن

¹ Sulfate Reducing Bacteria

محلول در طول تکثیر اولیه میکروبی توسط باکتری‌های هوازی و بی‌هوازی اختیاری‌ها. بنابراین با تولید مواد شیمیایی آلی نسبتاً اسیدی و آندی شدن منطقه نزدیک رشد میکروبیها، خوردگی یکنواخت تسریع می‌شود. در گام بعدی که بیشتر مواقع رخ می‌دهد، برخی از باکتری‌ها مانند گونه‌های بی‌هوازی و باکتری‌های احیاء کننده سولفات از مواد شیمیایی اسیدی تغذیه می‌نمایند. در گام سوم در صورتی که اکسیژن در محیط وجود داشته باشد، باکتری‌های اکسیدکننده گوگرد اقدام به تولید اسیدهای قوی مانند اسید سولفوریک می‌نمایند. این اسیدها می‌توانند به فرآیند خوردگی شتاب بیشتری بدهند [۶، ۷].

۲- روش کار

برای یافتن مطالب مرتبط با کلمات کلیدی مرتبط با این مقاله شامل بیوفولینگ، بیوفیلم، خوردگی، کنترل خوردگی و آنتی بیوفولینگ، از پایگاه‌های علمی معتبر مانند Science Direct، Springer و Google Scholar استفاده شد. برای این کار مقالاتی با قالب "Narrative article(s)" "Review of the literature" جستجو شد. همچنین با توجه به ساختار علمی تحقیق، از نشریات تخصصی در حوزه بیوفولینگ در محیط دریا، با کلمات تخصصی نیز تحقیق انجام شد. در جستجوی مطالب، علاوه بر توجه به اعتبار علمی متون، سعی شده تا به آخرین و جدیدترین یافته‌ها و روش‌های کنترل خوردگی از منظر زیستی نیز پرداخته شود. در ادامه به‌منظور تأیید اعتبار یافته‌ها، نشریاتی که مقالات از آن‌ها استخراج شدند با آخرین سیاهه نشریات مورد تأیید وزارت علوم مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. درنهایت با توجه به یافته‌های دیگر پژوهشگران، مدل عملیاتی و پیشنهادی محققین این تحقیق ارائه شد.

۳- نتایج

دانشمندان علم شیمی بهترین و ساده‌ترین روش برای کنترل خوردگی را ایجاد پوشش‌های مختلف بر روی سطوح مورد نظر ذکر نموده‌اند [۸]. به موازات این روش، استراتژی‌های دیگری نیز در کنترل خوردگی مورد تحقیق واقع شده‌اند. این روش‌ها شامل حفاظت کاتدی، کنترل

فرآیندهای خوردگی، کاهش مقدار ناخالصی فلز، پلیمرها و آلیاژهای مقاوم، روش‌های تیمار سطح و گدازاندن آلیاژهای مناسب در برابر خوردگی است [۹].

۸۹/۵ درصد از کل هزینه‌های حفاظت خوردگی مربوط به پوشش‌های حفاظتی است (۵). این پوشش‌ها دو دسته‌اند پوشش‌های آلی و غیرآلی. در صورت مؤثر نبودن پوشش‌های حفاظتی از آلیاژهای مقاوم مانند فولاد ضدزنگ، آلیاژهای نیکل و آلیاژهای تیتانیوم برای مهار خوردگی استفاده می‌کنند. [۱۰]. امروزه استفاده از ترکیبات موسوم به Nonbiocidal با ویژگی سازگاری زیست‌محیطی، در جلوگیری از خوردگی مرسوم شده است. روش دیگر استفاده از فرایند سل-ژل است که امروزه در بیشتر سازه‌های دریایی توصیه می‌گردد. در این سیستم با ایجاد یک لایه رسوبی بسیار نازک، از چسبیدن میکروب‌ها و ایجاد بیوفولینگ جلوگیری می‌شود. سیستم سل-ژل قادر است به سطوح فولادی، پشم شیشه، آلومینیوم و چوب متصل شود. این سیستم علاوه بر مهار بیوفولینگ، ویژگی‌های هیدرودینامیکی قایق‌ها و بدنه کشتی‌ها را نیز افزایش می‌دهد. این سیستم در صنایع دریایی برای جلوگیری از مهار خوردگی در حال استفاده است [۱۱].

دانشمندان در تحقیقات خود از گونه‌های باکتری جنس *Pseudoalteromonas* ترکیباتی جدا کرده‌اند که قادرند از اجتماع و رسوب انواع موجودات زنده تشکیل‌دهنده بیوفیلم بر سطح سازه‌های دریایی ممانعت کند [۱۲]. در تحقیق دیگر از نوعی شقایق دریایی بنام *Anthothoe albocincta* به‌عنوان یک عامل کنترل‌کننده رسوبات زیستی، استفاده شده است. این گونه مرجانی به بی‌مهرگانی که به تولید و افزایش رسوبات زیستی کمک می‌کند، تهاجم نموده، آن‌ها را از بین می‌برند. توده رسوبی زیستی نسبت به شقایق دریایی واکنش منفی از خود نشان می‌دهد؛ بنابراین اگر بتوان شرایط زیستی مناسب را برای رشد شقایق دریایی در کنار سازه‌های دریایی فراهم نمود، بیوفولینگ در آن منطقه کنترل می‌شود. تحقیقات مختلف کارایی این موجودات را در کنترل بیوفیلم سه برابر بیشتر از مواد شیمیایی ذکر نموده‌اند [۱۳].

برخی از باکتری‌های موجود در بیوفیلم با جذب پوشش‌های اسفنجی زنده می‌توانند بیوفولینگ را از بین

ببرند. یکی از راه‌های شناخته‌شده در این پروسه، مهار تشکیل شبکه Quorum sensing است [۱۴].

یکی از روش‌های کنترل خوردگی میکروبی، استفاده از باکتری‌های احیاکننده نیترات است. در این روش باکتری‌های احیاکننده سولفات را می‌توان از طریق تزریق نیترات به محیط، کنترل نمود. نیترات، رشد باکتری‌های هتروتروف احیاءکننده نیترات (hNRB) و باکتری‌های اکسیدکننده سولفید و احیاءکننده نیترات (NRB-SO) را تشدید می‌کند. این باکتری‌ها برای استفاده از منبع کربن با گونه‌های SRB رقابت می‌کند. با حذف باکتری‌های SRB، تولید هیدروژن متوقف شده و خوردگی مهار می‌شود. از آنجایی که نیتريت به‌عنوان یک بازدارنده آندی قابل استفاده است، بنابراین با پایش مداوم غلظت نیتريت، روند مهار خوردگی کنترل می‌شود [۵، ۷، ۱۰].

تکنیک دیگری که در مهار خوردگی می‌توان از آن استفاده نمود، استفاده از فاژنمایی است. در این تکنیک ابتدا پپتیدهای سطح شناورها و سازه‌ها با استفاده از روش‌های مولکولی پیشرفته شناسایی و سنتز می‌شوند. سپس واحدهای تشکیل دهنده این پپتیدها به محل خاصی در ژنوم پروتئین پوششی نوع خاصی از ویروس‌ها به نام فاژ متصل می‌شوند. فاژها در محیطی که سازه یا شناور در آن قرار دارند، تزریق می‌شوند؛ بنابراین پپتیدهای اگزوزن در سطح فاژ به‌صورت یک محصول ترکیب شده با پروتئین‌های پوششی فاژ بیان می‌شوند [۱۵]. در واقع تکنیک فاژنمایی سبب شناسایی پپتیدهای سطح سازه یا شناور شده و با هم‌جوشی با یکی از پروتئین‌های سطح فاژ، بیان می‌شوند و سپس پپتیدهای دلخواه که منجر به مهار خوردگی می‌شوند، بر اساس پیوند به مولکول هدف (سطح سازه یا شناور) انتخاب می‌گردند و باعث مهار خوردگی می‌شوند. از اسیدهای آمینه محلول در آب نیز به عنوان بازدارنده‌های خوردگی استفاده می‌شود. این مولکول‌ها از طریق تکنیک فاژنمایی انتخاب قابل انتخاب هستند [۵، ۱۰].

روش دیگری برای مهار خوردگی بیولوژیک استفاده از باکتریوفاژهاست. در این روش باکتریوفاژهای خاص را که ویروس‌های باکتری‌خوار هستند، به محل غوطه‌وری سازه یا شناور وارد می‌کنند. این فاژها بعد از خوردن باکتری‌های تولیدکننده بیوفیلیم، ضمن اینکه از خوردگی جلوگیری می‌کنند، خود در نبود این باکتری‌ها یا کشته می‌شوند یا

به حالت پروفاژ و غیرفعال باقی می‌مانند تا اینکه از طریق یک روش فیزیکی یا شیمیایی تجزیه شوند. البته باکتریوفاژها تا زمانی که باکتری‌های هدف آن‌ها وجود داشته باشد، ویژگی خود تکثیر شوندگی دارند. [۵].

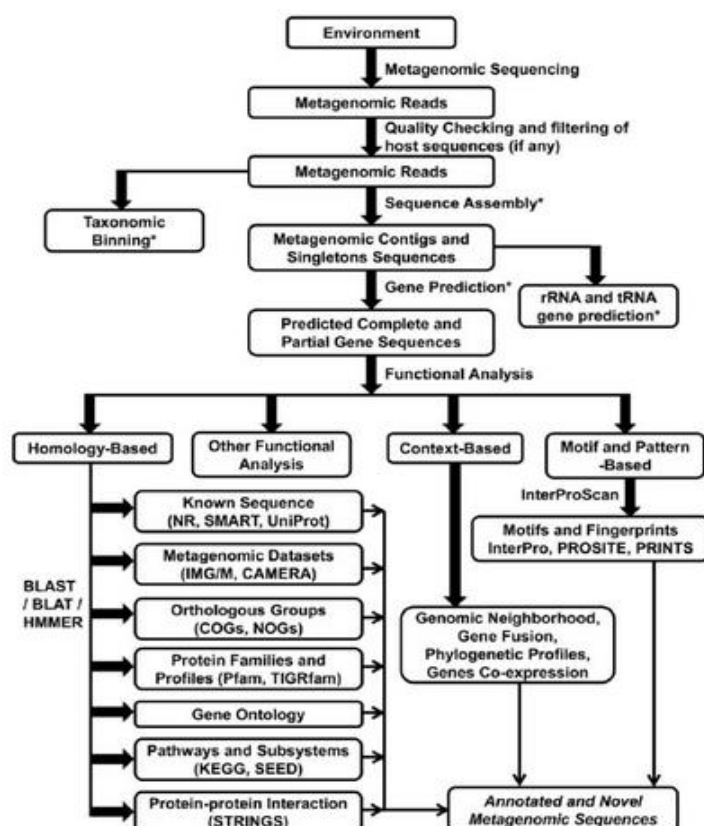
با وجود اینکه در سطح شیمیایی و مولکولی این پیشرفت‌ها انجام شده است، این روش‌ها تا کنون موفقیت یا استقبال خاصی را در مهار خوردگی کسب نکرده‌اند؛ بنابراین مهارکننده‌های اصطلاح «سبز» به دلیل عدم آسیب به محیط زیست از موضوعاتی مهم برای تحقیقات هستند که علاقه بسیاری از محققان را در زمینه کنترل خوردگی به خود جلب کرده است [۹]. با توجه به اینکه خوردگی هم در اتمسفر زمین و هم در محیط آبی اتفاق می‌افتد، به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های مهار ی یکسان در هر دو محیط، علت اصلی عدم موفقیت محققین در مهار خوردگی باشد. تحقیقات نشان داده است که بر روی کالبد برخی صدف‌ها، با وجود زندگی طولانی در دریا، هیچ‌گونه رسوبی تشکیل نمی‌شود. از این ویژگی می‌توان به عنوان یک مدل و نقشه راه در کنترل بیوفولینگ و مهار خوردگی مبتنی بر فناوری زیستی استفاده کرد [۱۶]؛ که در این مقاله به تشریح آن پرداخته می‌شود.

۴- نقشه راه و مدل مفهومی کنترل بیوفولینگ و خوردگی

این مدل بر پایه دو ویژگی استوار است: اول اینکه چون در محیط دریا ایجاد بیوفولینگ و رسوبات زیستی و متعاقب آن خوردگی، توسط موجودات دریایی انجام می‌شود، بنابراین کنترل نیز باید بر اساس محیط دریا و متابولیت‌های تولیدشده توسط موجودات دریایی انجام شود. دوم اینکه به دلیل پیچیدگی ترکیبات تولید شده توسط موجودات دریایی، سنتز آن‌ها به روش شیمیایی کار بسیار دشوار و هزینه‌بردار است؛ بنابراین باید سیستمی طراحی شود تا ضمن اینکه سنتز متابولیت‌های مؤثر در کنترل خوردگی توسط خود این موجودات انجام شود بلکه روشی ارزان برای تولید آن‌ها فراهم شود. در روشی که ارائه می‌شود مراحل زیر قابل انجام است: در روش اول ابتدا از بافت موجودات دریایی، میکروب‌هایی که تولید ترکیبات ضد بیوفولینگ می‌کنند، به روش سنتی و به کمک پروتکل رقیق‌سازی متوالی محیط (Serial

استفاده می‌شود. این که متازنومیکس نام دارد، بسیار دقیق است. در تکنیک متازنومیکس، شناخت عملکرد ژن‌های میکروبی به‌طور مستقیم از نمونه‌های محیطی امکان‌پذیر می‌شود [۱۸]. در این تکنیک با استفاده از روش‌های بیوانفورماتیک و درخت فیلوژنی، نقش ژن‌های میکروبی تعیین می‌شود. در متازنومیکس عملکردی یا (Functional metagenomics) که از طریق روش توالی‌یابی شاتگان متازنومیکس انجام می‌شود به موارد زیر می‌توان دست پیدا کرد، پروفایلینگ جامعه میکروبی، توالی و فراوانی ژن‌های عملکردی مثل آنزیم‌های صنعتی و بهره‌برداری از آن‌ها و کشف آنزیم‌ها و متابولیک‌های جدید، تشکیل کتابخانه ژنومی؛ یافتن مسیرهای متابولیکی شناخته شده در باکتری‌های نا شناخته و در نهایت تولید محصولات بیوتکنولوژیک و کاربردی کردن آن‌ها در حوزه‌های مختلف بیوتکنولوژی [۱۹].

(dilution) و گسترش استاندارد (Standard spread) بر روی محیط کشت Zobell's آگار جداسازی می‌شوند. مراحل بعدی شامل Subculture کردن نمونه‌ها، غربالگری، رنگ‌آمیزی و مشاهده زیر میکروسکوپ است که بر اساس پروتکل‌های مربوطه انجام خواهد شد [۱۷]. همچنین برای شناسایی دقیق نمونه‌های ضد بیوفولینگ از متدهای مولکولی مثل PCR یا وسترن بلات استفاده می‌شود. در نهایت به کمک مقایسه توالی‌های شناسایی شده ژنتیکی و توالی‌های استاندارد، نمونه موردنظر شناسایی خواهد شد. از آنجایی که بیش از ۹۹ درصد میکروارگانیسم‌های موجود در هر محیط و قابل مشاهده توسط میکروسکوپ توسط تکنیک‌های استاندارد کشت، قابل کشت نمی‌باشند، بنابراین امروزه برای شناسایی پروفایل جوامع میکروبی از یک سو و شناسایی پتانسیل ژنتیکی و بیولوژیک این جوامع از سوی دیگر از روشی کارآمد و قدرتمند که مستقل از کشت است



شکل ۲- روش شاتگان متازنومیکس، DNA محیطی استخراج و توالی یابی شده و آنالیز بیوانفورماتیکی بر روی نتایج خام حاصل از توالی یابی انجام می‌گیرد [۲۰].

و عملکرد آن و باکتری دخیل در بیوفولینگ مرحله بعدی مدل عملیاتی آغاز می‌شود (شکل ۲). امروزه ترکیبات ضد

در مدل عملیاتی ما روش متازنومیک مورد توجه قرار خواهد گرفت؛ بنابراین با شناسایی مستقیم ژن مورد نظر

بیوفولینگ به ده گروه مختلف دسته‌بندی می‌شوند. این ده گروه عبارت‌اند از اسیدهای چرب، لاکتون‌ها، تریپ‌ها، استروئیدها، بنزنوئیدها، فذیل‌اترها، پلی‌کتیدها، آلکالوئیدها، نوکلئوزیدها و پپتیدها [۲۱]. در جدول ۱

مهم‌ترین موجودات آبی و میکروب‌هایی که از آن‌ها جدا شده‌اند و می‌توانند تولید ترکیبات ضد فولینگ کنند، سیاهه شده‌اند.

جدول ۱- مهم‌ترین موجودات آبی و میکروب‌هایی که از آن‌ها جدا شده‌اند و می‌توانند تولید ترکیبات ضد فولینگ کنند

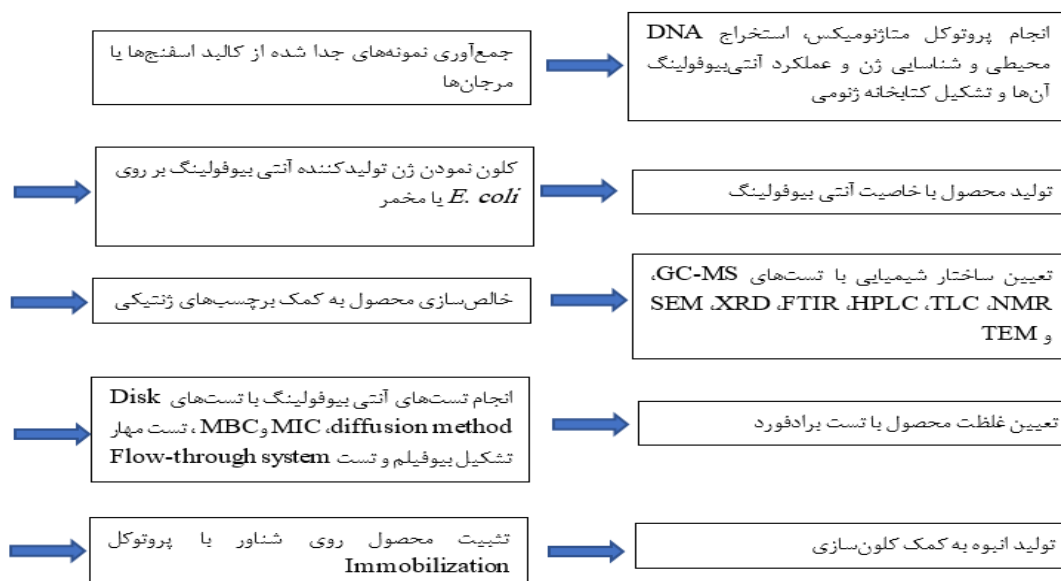
ارگانیزم میزبان	باکتری	رفرنس
اسفنج	گونه‌های آتروموناس	[۲۱]
اسفنج	باسیلوس پومیلیس	[۲۲]
اختاپوس	سودوموناس پوتیدا	[۲۳]
مرجان	باسیلوس لیچنیفورمیس	[۲۴]
Seagrass	باسیلوس سابتیلیس	[۲۵]
ماکرو جلبک کالریا راسه موزا	گونه‌های سودوآتروموناس	[۲۶]

از کتابخانه ژنومی به دست آمده، ژن‌های مورد نظر را در باکتری‌هایی مثل E.coli یا برخی مخمرها مثل ساکارومیسس سرویسیه کلون می‌کنیم تا محصول مورد نظر را تولید کنیم [۲۷]. بعد از تولید محصول، برای خالص‌سازی محصول که در این تحقیق از جنس پروتئین می‌باشد، از روش‌های سنتی مثل کروماتوگرافی فیلتر ژنی که بر اساس اندازه ذرات سبب جداسازی می‌شود، کروماتوگرافی تعویض یونی، بر اساس بار، کروماتوگرافی برهمکنش‌های آب‌گریزی که بر اساس میزان آب‌گریزی عمل تخلیص را انجام می‌دهد، استفاده می‌شود؛ اما مشکل این روش‌ها عدم توانایی آن‌ها در جداسازی پروتئین‌های مشابه است؛ بنابراین امروزه از برج‌سب‌های مختلف مثل برج‌سب‌های هیستیدینی (his-tag)، برج‌سب GST، برج‌سب MBP، برج‌سب IMPACT و برج‌سب TAP می‌شود. این برج‌سب‌ها بر اساس توالی اسیدهای آمینه و ژن‌های کدکننده آن‌ها اقدام به جداکردن ترکیبات مختلف می‌نمایند. در مدل ما بسته به نوع ژن و پروتئین از یکی از برج‌سب‌ها استفاده خواهد شد [۲۷]. در ادامه بعد از خالص‌سازی، برای شناسایی و تعیین ساختار شیمیایی و مولکولی پروتئین از تست‌های GC-MS، TLC، NMR، FTIR، XRD، SEM و TEM استفاده می‌شود. به منظور تعیین غلظت ماده به دست آمده از تست برادفورد استفاده می‌شود. بعد از خالص‌سازی ترکیبات مختلف، به منظور اینکه کدام یک از این ترکیبات استخراج شده می‌تواند از بیوفیلم باکتریایی و نیز اتصال دیاتومه‌ها و لارو بارناکل‌ها جلوگیری کنند، از تست‌های آنتی بیوفولینگ

استفاده می‌شود. مکانیسم اصلی ضد بیوفیلمی ترکیبات به دست آمده از میکروارگانیزم‌های دریایی در مهار بیوفولینگ، عبارت است از فعالیت آنتی‌بیوتیکی، ویژگی ضد چسبندگی و نیز مهار تولید محصولات پلیمری خارج سلولی که در تشکیل بیوفیلم ضروری است [۲۸]. برای تعیین ویژگی آنتی بیوفولینگ ماده استخراج شده از روش‌های Disk diffusion method، MIC and MBC، تست مهار تشکیل بیوفیلم و تست Flow-through system که خاص مهار بیوفولینگ است استفاده می‌شود [۲۹]. بعد از انجام این تست‌ها، به منظور تثبیت ماده سنتز شده بر روی سازه یا شناور از پروتوکل Surface immobilization استفاده می‌شود [۳۰]. وقتی ماده مورد نظر بر روی شناور یا سازه تثبیت شد، در محیط دریا به مدت سه تا شش ماه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در نهایت بعد از موفقیت تثبیت ماده، با استفاده از مهندسی ژنتیک و کلون‌سازی، ماده مورد نظر به تولید انبوه خواهد رسید. خلاصه این مدل در شکل ۳ نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق تعیین الگو و نقشه راه کنترل خوردگی از منظر فناوری‌های نوظهور زیستی بود. مرور تحقیقات نشان داد که بیش از ۴۵ درصد خوردگی در محیط آب توسط انباشت عوامل زنده ایجاد می‌شود. این عوامل برای هر محیطی و منطقه‌ای اختصاصی هستند.



شکل ۳- نقشه راه و مدل عملیاتی تولید و تثبیت ترکیبات مهار رسوبات زیستی از شناورها و سازه‌های دریایی

ضد خوردگی، به مهار خوردگی پرداخت. انجام عملی این تحقیق توسط متخصصین میکروبی‌شناسی، سلولی مولکولی، مهندسی ژنتیک و متخصص شیمی در یک آزمایشگاه پیشرفته قابل انجام خواهد بود.

از طرفی عوامل ضد رسوب نیز برای هر منطقه اختصاصی هستند؛ بنابراین با استفاده از یک مدل و نقشه راه پیشرفته در منطقه ساحلی ایران می‌توان موجوداتی را که از رسوبات زیستی جلوگیری می‌کنند، ایزوله نموده و در محیط آزمایشگاه با تولید انبوه متابولیت‌های زیستی

منابع

[۶] Marcus P, Corrosion mechanisms in theory and practice: CRC press, 2011.

[۷] Grigoryan AA, S. Cornish, Buziak B, Lin S, Cavallaro A, Arensdorf JJ, et al., "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.

[۸] Shaw BA and K. RG, "What is corrosion?," Interface-Electrochemical Society, vol. 15, pp. 24-27, 2006.

[۹] Raja PB, Ismail M, Ghoreishiamiri S, Mirza J, Ismail MC, Kakooei S, et al., "Reviews on corrosion inhibitors: a short view," Chemical Engineering Communications, vol. 203, pp. 1145-1156, 2016.

[۱۰] R. K. Darsanaki and A. Habibi, "Role of microorganisms in corrosion inhibition of metals."

[۱۱] Detty MR, Ciriminna R, Bright FV, and P. M, "Environmentally benign sol-gel antifouling and foul-releasing coatings," Accounts of chemical research, vol. 47, pp. 678-687, 2014.

[۱] Salta M, Wharton JA, Blache Y, Stokes KR, and B. J-F, "Marine biofilms on artificial surfaces: structure and dynamics," Environmental microbiology, vol. 15, pp. 2879-2893, 2013.

[۲] Nguyen T, Roddick F, and F. L, "Biofouling of water treatment membranes: a review of the underlying causes, monitoring techniques and control measures," Membranes, vol. 2, pp. 804-840, 2012.

[۳] Li Y and N. C, "Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling," Bioactive materials, vol. 4, pp. 189-195, 2019.

[۴] Nandakumar k and Y. T, "Biofouling and its prevention: A comprehensive overview," Biocontrol science, vol. 8, pp. 133-144, 2003.

[۵] Zarasvand KA and R. VR, "Microorganisms: induction and inhibition of corrosion in metals," International Biodeterioration & Biodegradation, vol. 87, pp. 66-74, 2014.

- synthetic analogs, "Marine drugs, vol. 15, p. 266, 2017.
- [۲۲] Xin X, Huang G, Zhou X, Sun W, Jin C, Jiang W, et al., "Potential antifouling compounds with antidiatom adhesion activities from the sponge-associated bacteria, *Bacillus pumilus*," Journal of adhesion science and Technology, vol. 31, pp. 1028-1043, 2017.
- [۲۳] Viju N, Satheesh S, and P. SM, "Antifouling activities of antagonistic marine bacterium *Pseudomonas putida* Associated with an Octopus," Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, vol. 87, pp. 1113-1124, 2017.
- [۲۴] Spanò A, Laganà P, Visalli G, Maugeri TL, and G. C, "In vitro antibiofilm activity of an exopolysaccharide from the marine thermophilic *Bacillus licheniformis* T14," Current microbiology, vol. 72, pp. 518-۲۰۱۶, ۵۲۸
- [۲۵] Ramasubburayan R, Prakash S, Iyapparaj P, Sumathi S, Titus S, Immanuel G, et al., "Isolation, screening and evaluation of antifouling activity of mangrove associated bacterium, *Bacillus subtilis* subsp. *subtilis* RG," Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, vol. 87, pp. 1015-1024, 2017.
- [۲۶] Supardy NA, Ibrahim D, N. SRM, and N. WNMD, "Bioactive Compounds of *Pseudoalteromonas* sp. IBRL PD4. 8 Inhibit Growth of Fouling Bacteria and Attenuate Biofilms of *Vibrio alginolyticus* FB3," Polish journal of microbiology, vol. 68, pp. 21-33, 2019.
- [۲۷] Reece RJ, Analysis of genes and genomes: John Wiley & Sons Hoboken, NJ, 2004.
- [۲۸] Satheesh S, Soniamby AR, Shankar CVS, and P. SMJ, "Antifouling activities of marine bacteria associated with sponge (*Sigmadocia* sp.)," Journal of Ocean University of China, vol. 11, pp. 354-360, 2012.
- [۲۹] Hamayeli H, Hassanshahian M, and H. MA, "The antibacterial and antibiofilm activity of sea anemone (*Stichodactyla haddoni*) against antibiotic-resistant bacteria and characterization of bioactive metabolites," International Aquatic Research, vol. 11, pp. 85-97, 2019.
- [۳۰] Gatenholm P, Holmström C, Maki JS, and K. S, "Toward biological antifouling surface coatings: marine bacteria immobilized in hydrogel inhibit barnacle larvae," Biofouling, vol. 8, pp. 293-301, 1995.
- [۱۲] Holmström C, Egan S, Franks A, McCloy S, and Kjelleberg S, "Antifouling activities expressed by marine surface associated *Pseudoalteromonas* species," FEMS microbiology ecology, vol. 41, pp. 47-58, 2002.
- [۱۳] Atalah J, Bennett H, Hopkins GA, and F. BM, "Evaluation of the sea anemone *Anthothoe albocincta* as an augmentative biocontrol agent for biofouling on artificial structures," Biofouling, vol. 29, pp. 559-571, 2013.
- [۱۴] Müller WEG, Wang X, Proksch P, Perry CC, Osinga R, Gardères J, et al., "Principles of biofouling protection in marine sponges: a model for the design of novel biomimetic and bio-inspired coatings in the marine environment?," Marine biotechnology, vol. 15, pp. 375-398, 2013.
- [۱۵] Arap MA, "Phage display technology: applications and innovations," Genetics and Molecular Biology, vol. 28, pp. 1-9, 2005.
- [۱۶] Bai XQ, Xie GT, Fan Hui, Peng ZX, Yuan CQ, and Y. XP, "Study on biomimetic preparation of shell surface microstructure for ship antifouling," Wear, vol. 306, pp. 285-295, 2013.
- [۱۷] Thiyagarajan S, Bavya M, and J. A, "Isolation of marine fungi *Aspergillus* sp. and its in vitro antifouling activity against marine bacteria," Journal of environmental biology, vol. 37, p. 895, 2016.
- [۱۸] Kennedy J, Flemer B, Jackson SA, Lejon DPH, Morrissey JP, O'gara F, et al., "Marine metagenomics: new tools for the study and exploitation of marine microbial metabolism," Marine drugs, vol. 8, pp. 608-628, 2010.
- [۱۹] Ortiz-Estrada ÁM, Gollas-Galván T, Martínez-Córdova LR, and M. P. M, "Predictive functional profiles using metagenomic 16S rRNA data: a novel approach to understanding the microbial ecology of aquaculture systems," Reviews in Aquaculture, vol. 11, pp. 234-245, 2019.
- [۲۰] Comeau AM, Douglas GM, and L. MGI, "Microbiome helper: a custom and streamlined workflow for microbiome research," MSystems, vol. 2, pp. e00127-16, 2017.
- [۲۱] Wang Kg, Wu ZH, Wang Y, Wang CY, and X. Ying, "Mini-review: antifouling natural products from marine microorganisms and their