

مواجهه مهندسی با بیوفولینگ در پروژه‌های دریایی

سیده حمیده طاهری

بخش محیط زیست شرکت مهندسين مشاور هندسه پارس

۱- مقدمه

بیوفولینگ یک پدیده زیستی است که شامل تجمع و رشد جانداران روی سطوح غوطه‌ور در آب دریا می‌شود (شکل ۱). شناخت این پدیده و مواجهه با آن در پروژه‌های مهندسی ضروری است. بی‌توجهی به تشکیل بیوفولینگ در پروژه‌های مهندسی باعث بروز مشکلاتی می‌شود که در اینجا مورد اشاره قرار می‌گیرد. همچنین بیوفولینگ می‌تواند موجب ایجاد شرایطی مطلوب در برخی پروژه‌ها شود که شناخت آنها برای مهندسين ضروری است. این مقاله حاوی اطلاعات مبنایی است که براساس آن می‌توان روش مواجهه مهندسی با بیوفولینگ در پروژه مورد نظر را طراحی و برنامه‌ریزی کرد.



شکل ۱: پدیده بیوفولینگ در محفظه مکش آب دریا (آبشیرین کن آب آسیا، ۱۴۰۲)

۲- بیوفولینگ و انواع آن

۲-۱- تعریف بیوفولینگ

بیوفولینگ یا رسوب زیستی دریایی طبق تعریف به معنی رسوب و رشد تدریجی میکروارگانیسم‌های زنده (باکتریها، جلبک‌ها، قارچ‌ها، پلانکتونها، و موجودات دریایی بزرگتر مانند کشتی چسب‌ها Barnacles) است این موجودات بر روی سطوح طبیعی (سنگ، چوب و صخره‌های مرجانی) یا سازه‌های مصنوعی مانند کشتی‌ها، سکوها، اسکله‌ها، خطوط لوله و تاسیسات دریایی که در معرض محیط دریایی هستند، چسبیده و رشد می‌کنند. بیوفولینگ می‌تواند اثرات مضر و فرسایشی زیادی بر روی سطوح مختلف، به ویژه در کشتی‌ها و تاسیسات دریایی داشته باشد.

۲-۲- اسامی مختلف بیوفولینگ

پدیده بیوفولینگ (Biofouling) تحت عنوان رسوبات زیستی، گرفتگی زیستی، چسبندگی زیستی، زیست مزاحم دریایی و گاهی روینده-های دریایی (marine growth) نیز خوانده می‌شود زیرا همچون گیاهان بتدریج رشد می‌کنند. بیوفولینگ در حمل و نقل دریایی به کشتی چسب شهرت دارد زیرا به بدنه کشتی‌ها می‌چسبند و اصطکاک کشتی را با آب در هنگام حرکت زیاد می‌کند.

۲-۳- انواع بیوفولینگ

آب دریا ترکیبی از نمک‌های مختلف، مواد آلی، جلبک‌ها، باکتری‌ها و ذرات ریز موجود در آب است. گرفتگی (Fouling) به تجمع موادی مانند خاک، رسوب، رشد بیولوژیکی و مواد آلی بر سطوح اشاره دارد. گرفتگی نیز مانند رسوب با ایجاد یک لایه عایق بر روی سطح، راندمان و سرعت انتقال را کاهش می‌دهد.

رسوب زیستی از مخلوطی از لایه زیستی میکروبی و مواد پلیمری خارج سلولی آنها، مواد جامد معلق، محصولات خوردگی و موجودات ماکرو که در نهایت به سطح چسبیده و رشد می‌کنند، حاصل می‌شود. لایه رسوب با چسبندگی حیوانات دریایی مانند سخت‌پوستان و نرم‌تنان به حداکثر توسعه خود می‌رسد. صدف‌ها به عنوان مشخص‌ترین گونه‌های رسوب‌گذار ماکرو در نظر گرفته می‌شوند و عامل اصلی مسئول گرفتگی لوله‌های صنعتی هستند. از بین بردن و جدا کردن پوسته‌های صدف از دیواره‌های لوله به دلیل چسبندگی قوی آنها بسیار دشوار است. رسوبات زیستی به اشکال مختلفی بروز می‌کنند و سطوح و محیط‌های مختلف را تحت تأثیر قرار می‌دهند. دو نوع رسوب زیستی به شرح زیر وجود دارد:

۲-۳-۱- ریزرسوب (microfouling)

ریزرسوب به تشکیل بیوفیلمی اشاره دارد که به سطح می‌چسبد. بایوفیلم به عنوان یک اجتماع ساختار یافته از میکروارگانیسم‌هایی مانند باکتریهای دریایی، ریزجلبک‌ها و دیاتومه‌ها ایجاد می‌شود که به یک سطح زنده یا بی‌اثر چسبیده‌اند. میکروارگانیسم‌ها در نزدیکی همه سیستم‌های تصفیه آب هستند. آنها تمایل دارند به سطح ممبران‌ها یا غشاءها بچسبند و با انباشته شدن بیش تر رسوبات رشد کنند (شکل ۲).



شکل ۲: نمایی از تشکیل ریز رسوب ها روی ممبران آب شیرین کن RO

۲-۳-۲- درشت رسوب (macrofouling)

درشت رسوب به اتصال موجوداتی مانند بارناکل ها، صدف ها، مرجان های نرم و جلبک های دریایی، اسفنج ها، شقایق های دریایی، تونیکات ها، هیدروئیدها، بی مهرگان دریایی، کشتی چسب ها، بریوزوآها و کرم های لوله ای برای تولید یک اجتماع رسوبی اشاره دارد (شکل ۳).



شکل ۳: نمایی از تشکیل درشت رسوب ها روی بدنه کشتی

۴-۲- مراحل تشکیل بیوفولینگ

رسوب زیستی عموماً در درجه اول با استقرار باکتری‌های پیشگام روی یک لایه آغاز می‌شود و به دنبال آن درشت رسوب (چسبیدن موجودات بزرگتر مانند بارناکل‌ها، جلبک‌ها و صدف‌ها) ایجاد می‌شود. پنج مرحله کلیدی برای تشکیل رسوب زیستی وجود دارد (شکل ۴).

۱- ابتدا، سازه یا سطح در آب فرو می‌رود. در این فرآیند، مولکول‌های آلی محلول (مانند پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آمینه) شروع به جذب شدن بر روی سطح می‌کنند. این لایه نازک آلی، که به آن لایه لجنی (conditioning film) گفته می‌شود، سطح را برای جذب ارگانیسم‌های بعدی آماده می‌کند. باکتری‌ها اولین ارگانیسم‌های زنده‌ای هستند که معمولاً به این لایه لجنی جذب می‌شوند.

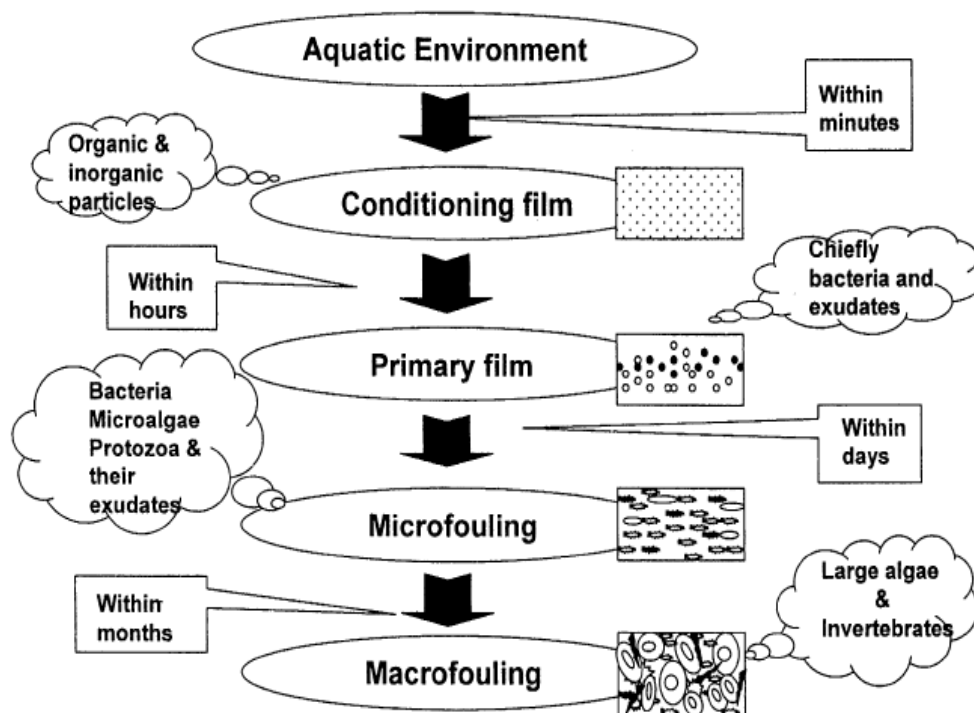
۲- تشکیل بیوفیلم مرحله دوم است باکتری‌های چسبیده به سطح شروع به تکثیر شدن و تولید مقدار زیادی پلی‌ساکارید خارج سلولی (EPS) می‌کنند. این ماده چسبنده، ساختاری سه‌بعدی را تشکیل می‌دهد که باکتری‌ها و دیگر میکروارگانیسم‌ها را در خود جای داده و از آن‌ها محافظت می‌کند.

۳- پس از تشکیل بیوفیلم میکروبی، سطوح برای جذب ارگانیسم‌های بزرگ‌تر و پیچیده‌تر مانند دیاتوم‌ها (جلبک‌های تک‌سلولی)، جلبک‌های ماکرو (مانند جلبک‌های سبز، قهوه‌ای و قرمز)، و سپس موجودات زنده‌ی چندسلولی مانند لارو صدف‌ها، کرم‌های لوله‌ای، و دیگر بی‌مهرگان دریایی مناسب می‌شود.

۴- ارگانیسم‌های چسبیده شروع به رشد و تکثیر می‌کنند و لایه‌های ضخیم‌تری از بیوفولینگ را تشکیل می‌دهند. این لایه‌ها می‌توانند شامل انواع مختلفی از جلبک‌ها، صدف‌ها، موسل‌ها، و موجودات دیگر باشند.

۵- بیوفولینگ بالغ فرصتی برای تکثیر فراهم می‌کند و تولید مثل ارگانیسم‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن، گسترش گونه‌ها را در محیط اطراف تسهیل می‌کند. اسپرم‌ها، تخم‌ها، یا لاروهای آزاد شده می‌توانند به سطوح دیگر منتقل شده و چرخه بیوفولینگ را دوباره آغاز کنند.

کل این فرآیند می‌تواند تنها سه هفته تا یکماه طول بکشد. گاهی به نظر بی‌ضرر می‌رسد اما در برخی شرایط می‌تواند مشکلات بزرگی را برای سازه‌ها و فناوری‌های دریایی ایجاد کند. شکل ۴ مراحل تشکیل بیوفولینگ را نشان می‌دهد.



شکل ۴: مراحل مختلف توسعه رسوبات زیستی (Kanavillil.N, Tetsuo.Y, 2003)

۵-۲- عوامل مؤثر بر فرآیند تشکیل بیوفولینگ

۵-۲-۱- شرایط محیطی (دمای آب، فصل، شوری، عمق آب، آلودگی و کدورت)

برخی شرایط محیطی مهم که در فرآیند تشکیل بیوفولینگ مؤثر هستند در اینجا تشریح می‌شوند.

- دمای آب دریا، تحت تأثیر عرض جغرافیایی و تغییرات فصلی، نقش کلیدی در شکل‌گیری جوامع دریایی، از جمله ترکیب رسوبات زیستی، ایفا می‌کند. این دما بر زمان تخم‌ریزی، استقرار، رشد و تولید مثل موجودات زنده تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، نرخ رشد رسوبات زیستی با افزایش دما افزایش می‌یابد.

- تغییرات روزانه و فصلی در شوری و دما، به ویژه شوری کم و نوسانات سریع دما، بر شدت رسوب‌گذاری تأثیر منفی دارد.

- رویدادهایی مانند ال‌نینو و روندهای اقلیمی گسترده‌تر (مثلاً گرم شدن و اسیدی شدن اقیانوس) ممکن است به طور قابل توجهی بر الگوهای رسوب زیستی تأثیر بگذارند.

- عمق آب دریا و نور موجود به طور قابل توجهی بر ترکیب و رشد ارگانیسم‌های بیوفولینگ تأثیر می‌گذارد. ماکروفلورهای فتوسنتزی، مانند ماکرو جلبک‌ها، معمولاً در عمق (۰ تا ۴۰ متر) که شرایط گرم‌تر، سطح نور بالاتر و پلانکتون‌ها بیشتر است، فراوان‌تر هستند.

- آلودگی و کدورت آب می‌تواند تابش خورشیدی را کاهش دهد و در نتیجه تعداد گیاهان، مواد مغذی و گونه‌ها را در محیط کاهش دهد. همچنین آلودگی می‌تواند تعداد گونه‌های غیربومی را در جوامع بستر سخت دریایی افزایش دهد و سرعت رسوب زیستی را افزایش دهد.

- غلظت مواد مغذی در آب، مانند نیتروژن و فسفر، بر رشد بیوفولینگ تأثیر دارد.

۲-۵-۲- عوامل هیدرودینامیکی

ترکیب و میزان رسوب زیستی روی یک بستر قابل سکونت تحت تأثیر جریان‌ها و نزدیکی به ساحل قرار دارد. موجوداتی مانند صدف‌ها، بارناکل‌ها و کرم‌های لوله‌ای با تغذیه از ذرات معلق در آب یا مواد مغذی محلول در آن از جریان‌ها سود می‌برند. جریان‌ها همچنین لاروهای متحرک بسیاری از بی‌مهرگان و هاگ‌های جلبک را منتقل می‌کنند و احتمال موفقیت کلونیزاسیون را برای بسترهایی که نزدیک‌تر به ساحل قرار دارند، به ویژه برای سازه‌های ثابت مانند سکوها بیشتر می‌کنند. غنای گونه‌ای به طور کلی در مناطق دور از ساحل کاهش می‌یابد.

۲-۵-۳- جنس سطحی سازه های دریایی

موادی که برای زیرسازی سطوح دریایی استفاده می‌شوند، واکنش‌پذیری و سمی بودن آنها بر حساسیت آنها به رسوب زیستی تأثیر می‌گذارند. خواص فیزیکوشیمیایی این مواد می‌تواند شیمی آب و سطح مشترک آب دریا و زیرلایه را تغییر دهد و بر تشکیل و محتوای لایه ماکرومولکولی تأثیر بگذارد. این خواص همچنین بر جوامع باکتریایی روی زیرلایه تأثیر می‌گذارند، به طوری که مواد بیولوژیکی و شیمیایی بی‌اثر که پایدارتر هستند، معمولاً از تنوع باکتریایی بیشتری پشتیبانی می‌کنند. این پایداری، آماده‌سازی سریع‌تر ماکرومولکول‌ها و متعاقباً تشکیل بیوفیلم را تسهیل می‌کند که به طور بالقوه بر ته‌نشینی و رشد موجودات ماکروفولینگ تأثیر می‌گذارد. تحقیقات نشان داده است که موادی مانند آلومینیوم، فولاد کربنی و برنز عموماً بیشتر از مواد غیرفلزی مانند الیاف شیشه، پلی‌اتیلن، پلی‌آمید و لاستیک مستعد رسوب زیستی هستند. در میان مواد فلزی، زیرلایه‌های آلومینیومی در مقایسه با مواد برنزی، رسوب زیستی کمتری را تجربه می‌کنند. با این حال، واکنش رسوب‌های زیستی به مواد در همه گونه‌ها یکسان نیست. گروه‌های مختلف رسوب زیستی، یا حتی گونه‌های درون یک گروه، بسته به عواملی مانند دما و عمق، ممکن است واکنش متفاوتی به یک ماده نشان دهند. مواد پلیمری خارج سلولی میکروبی قادر به شرکت در واکنش‌های اکسیداسیون هستند. که اغلب منجر به خوردگی موضعی می‌شود. چنین فرآیندهای خوردگی، سطح را زبرتر می‌کنند و سطوح فلزی را نسبت به مواد غیرفلزی در برابر رسوب زیستی آسیب‌پذیرتر می‌سازد.

۲-۵-۴- توپوگرافی و ترشوندگی سطح زیرین بیوفولینگ

توپوگرافی و ناهمگونی بیشتر لایه‌های زیرین با افزایش مساحت سطح، افزایش تنوع گونه‌ای و کاهش رقابت بین گونه‌ای، ریززیستگاه‌های متنوع‌تری ایجاد می‌کند. ویژگی زبری و وجود بافت در سطح می‌توانند بر توانایی یک موجود زنده برای اتصال به سطح تأثیر بگذارد و در نتیجه بر تشکیل بیوفیلم و میزان رسوب زیستی موثر است. میکروتوپوگرافی سطح بر ترشوندگی آن تأثیر می‌گذارد. ترشوندگی، سطح تماس و نیروهای برهمکنش بین ماده چسبنده موجودات زنده رسوبزا و سطح زیرین را تعیین می‌کند.

۲-۵-۵- رنگ سطح زیرین بیوفولینگ

رنگ یک زیرلایه بر میزان انرژی منعکس شده و جذب شده توسط آن و همچنین دمای آن تأثیر می‌گذارد که می‌تواند بر نشست رسوبات زیستی تأثیر بگذارد. رنگ زیرلایه در مراحل اولیه رسوب زیستی تأثیر بیشتری دارد. بسیاری از لاروها و هاگ‌ها نورگرایی منفی نشان

می‌دهند و سطوح تیره‌تر و کم‌بازتاب‌تر را برای نشست ترجیح می‌دهند.

۳- برخی از پروژه‌های دریایی که با بیوفولینگ مواجهه می‌شوند

در زیر به تعدادی از پروژه‌های دریایی که در معرض بیوفولینگ هستند اشاره می‌شود.

۳-۱- لوله‌های برداشت آب از دریا

زیرساخت‌ها، به ویژه سازه‌های آبگیر، به طور ویژه در برابر رسوب زیستی آسیب‌پذیر هستند. موجودات ماکروبتیک مانند بارناکل‌ها و صدف‌ها در سیستم‌های تحویل خوراک آب دریا منجر به کاهش قابل توجه راندمان در عملیات می‌شود (شکل ۵).



شکل ۵: تشکیل رسوبات زیستی در ابتدای خطوط آبگیری و چسبیدن جلبک‌ها روی لوله‌های آبگیری (غواصی اردیبهشت ۱۴۰۴)

۳-۲- بدنه کشتی‌ها

رسوبات زیستی دریایی یک مشکل جهانی است که به دلیل سفرهای طولانی در اکوسیستم‌های مختلف، صنعت کشتیرانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۶). در این میان، بدنه‌های آلوده باعث افزایش مصرف سوخت، انتشار گازهای گلخانه‌ای و گسترش گونه‌های آبرزی مهاجم می‌شوند.



شکل ۶: ایجاد بیوفولینگ روی بدنه کشتی ها

۳-۳- پایه اسکله ها و موج شکن ها

اتصال و رشد موجودات آبی بر روی پایه اسکله ها عموماً مشاهده می شود (شکل ۷). این یک رشد نامطلوب است که باعث ایجاد مشکلاتی برای سطوح می شود. گسترش بیوفولینگ عمدتاً "تحت تاثیر فصل و مدت غوطه وری در آب است.



شکل ۷: ایجاد بیوفولینگ بر روی پایه اسکله های قدیمی بندر شهید حقانی بندرعباس (۱۴۰۱)

۳-۴- سکوهای دریایی

در سکوهای دریایی بسته به مدت شناوری افزایش تجمع جلبک ها، باکتری ها، صدف ها، خزها و دیگر موجودات دریایی مشاهده می شود (شکل ۸). این تجمع باعث خوردگی زیستی، افزایش وزن، افت عملکرد تجهیزات متحرک و افت جریان در لوله های نفتی می شود.



شکل ۸: نمایی از بیوفولینگ در پایه سکوی دریایی

۳-۵- تورهای پرورش ماهی در دریا

تجمع موجودات زنده مانند باکتری ها، میکرو و ماکرو جلبک ها، سخت پوستان و سایر توده های زنده روی تور پرورش ماهی در قفس باعث ایجاد رسوبات زیستی شده و مشکلات فراوانی از جمله تخریب فیزیکی، مشکلات مکانیکی، رقابت زیستی و تغییرات محیطی را برای آبرزی هدف، بروز بیماری، ساختار قفس و اقتصاد تولید بوجود خواهد آورد (شکل ۹).



شکل ۹: پدیده بیوفولینگ در تورهای قفس پرورش ماهی

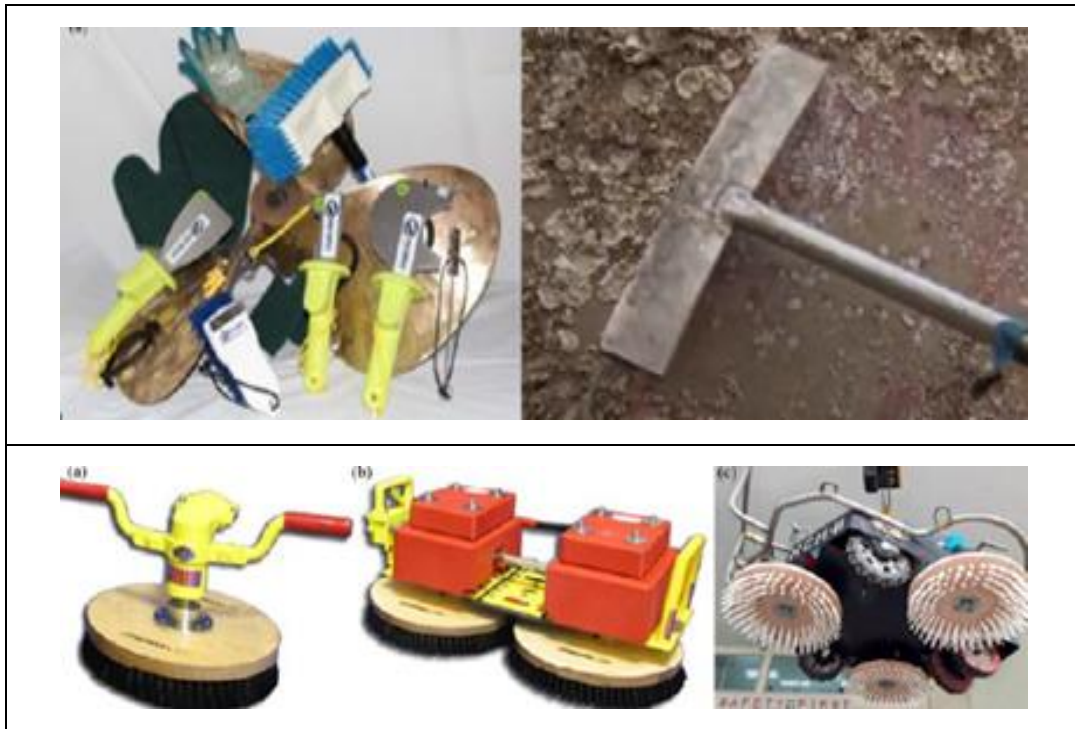
۴- برخی از روش های تجربه شده در تمیز کردن بیوفولینگ

جلوگیری از تشکیل بیوفولینگ بسیار مشکل است. بنابراین اغلب لازم میشود سطوح در معرض بیوفولینگ تمیز شود. یکی از ملاحظات مهم در بهره برداری از تجهیزات در معرض رسوب زیستی، کاهش آن با تمیز کردن است. به پاره ای از این تکنیک های تجربه شده در زیر اشاره می شود.

۴-۱- کاردک

رایج ترین روش فیزیکی مورد استفاده برای حذف رسوب، تمیز کردن دستی سطوح با استفاده از خراشنده ها توسط غواصان است (شکل

۱۰). با این حال، تمیز کردن دستی وقت گیر، پرهزینه و ممکن است به سطوح آسیب برساند.



شکل ۱۰: نمونه هایی از برس و کاردک برای پاکسازی بیوفولینگ

۴-۲- استفاده از واتر جت

فناوری جت آب به عنوان یک روش مؤثر و قابل کنترل و سازگار با محیط زیست برای کاهش رسوبات زیستی در سازه های دریایی به شمار می رود (شکل ۱۱). همچنین می توان با آن لایروبی خطوط لوله و پاکسازی رسوبات سخت در لوله های نفت، گاز و آب را انجام داد. در این روش فشار جت آب ۱۶ مگاپاسکال، فاصله توقف ۲۵ میلی متر و زاویه برخورد ۹۰ درجه، تمیز کردن بهینه با حداقل فرسایش را فراهم می کند.



شکل ۱۱: استفاده از واتر جت برای پاکسازی بیوفولینگ

۳-۴- پیگ زنی

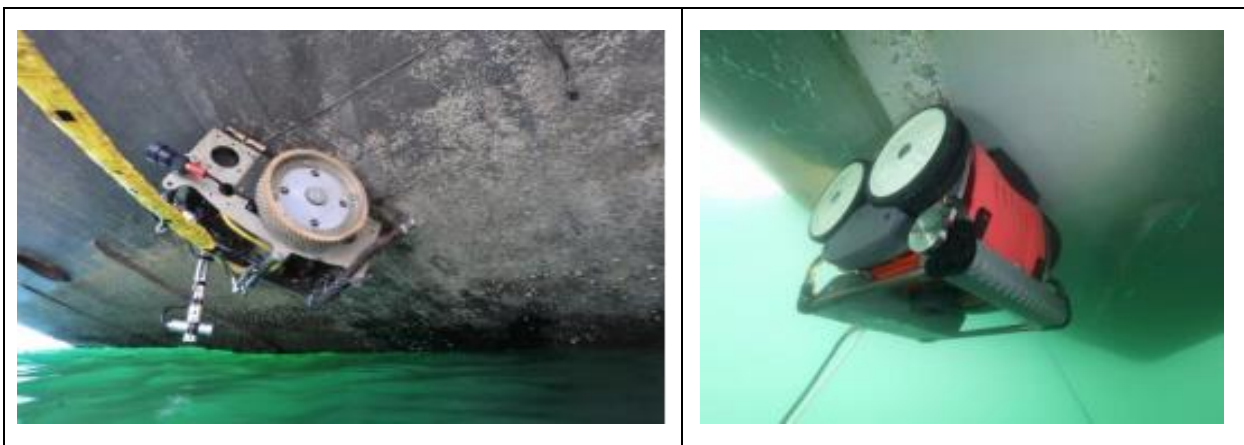
عملیاتی است که شامل عبور ابزاری به عنوان پیگ/اسکرپر داخل خط لوله اعمال می شود (شکل ۱۲). راه حل ایمن و اثبات شده بدون استفاده از مواد شیمیایی و در نتیجه تأثیر کم بر جانوران دریایی است. این ابزارها می توانند به طور سیستماتیک زباله ها، رسوبات سخت/رشته های آلی را حذف کرده و از تجمع آنها جلوگیری کنند.



شکل ۱۲: نمایی از پیگ زنی بمنظور پاکسازی لوله ها

۴-۴- ربات های زیر آبی

ماشین های کنترل از راه دور یا خود کاری هستند که مجهز به ابزارهای تخصصی مانند برس یا جت های آب فشار بالا می باشند (شکل ۱۳). اجرای راه حل های رباتیک منجر به کاهش قابل توجه هزینه و بهبود ایمنی است.



شکل ۱۳: ربات های زیر آبی برای تمیزکاری و خز زدایی، کارهای مربوط به بازرسی و پایش سلامت بدنه کشتی

۵-۴- کنترل بیولوژیکی

کنترل بیولوژیکی استفاده از دشمنان طبیعی بومی، به عنوان ابزاری برای مدیریت رسوبات زیستی روی سازه های مصنوعی غوطه ور می باشد. بعنوان مثال استفاده از ستاره دریایی و شکم پایان و چرندگان کفزی بومی برای کاهش و پیشگیری از رسوبات زیستی روی سازه های دریایی مصنوعی مؤثرند. امروزه از بعضی ماهیان گیاهخوار به عنوان کنترل بیولوژیکی جلبکها در قفس های پرورش ماهی کوچک استفاده شده است.

۵- روش های کاهش ایجاد بیوفولینگ

با توجه به هزینه های اقتصادی مربوط به عواقب مضر زیست رسوب، استراتژی های مختلفی برای محدود کردن تجمع زیست رسوب ها روی سطوح بکار گرفته شده است.

۵-۱- پیش کلرزی

کلر زنی از روش های شناخته شده برای ضد عفونی آب دریا در آبشیرین کن ها است. افزودن اکسیدان های شیمیایی مانند کلر، برم، ید یا ازن می تواند قبل از فرآیندهای غشایی، ضد عفونی بیولوژیکی را فراهم کند. کلر زنی برای جلوگیری از بیوفولینگ ممبران های اسمز معکوس RO دارای اهمیت زیادی هستند.

۵-۲- پوشش های زیست کش

پوشش های ضد رسوب زیست کش از طریق آزادسازی مواد شیمیایی سمی خاصی (زیست کش ها) عمل می کنند تا از رسوب گذاری و رشد موجودات زنده جلوگیری کنند. پوشش های زیست کش باید یا در تمام طول عمر سازه دوام بیاورند یا در فواصل زمانی مناسب برای حفظ اثربخشی خود مجدداً اعمال شوند. پوشش های ضد خزه زیست کش با استفاده از مواد متنوعی فرموله می شوند که برای مقابله فعال با رسوب و رشد موجودات دریایی روی سطوح غوطه ور و کشتی ها طراحی شده اند.

۵-۳- جریانه های حبابی

پرده های حباب هوا روشی غیرسمی برای کاهش رسوب زیستی روی سازه های دریایی ثابت می باشد. آن ها با آزاد کردن مداوم حباب ها در امتداد سطوح غوطه ور، از رسوب گذاری موجودات زنده جلوگیری می کنند.

۵-۴- امواج فراصوت

امواج فراصوت یک روش غیرشیمیایی برای کنترل رسوبات زیستی روی بدنه کشتی ها و سطوح غوطه ور می باشد. فناوری فراصوت، یک رویکرد نوآورانه برای کاهش ماکرو فولینگ، مختل کردن و کنترل رشد موجودات رسوب گذار است. امواج صوتی تأثیر مهمی بر گونه های مختلف باکتری ها و بارناکل ها با مرگ و میر و مهار رشد آنها در فرکانس های مختلف دارد.

۵-۵- ضد عفونی با اشعه فرا بنفش (UV)

نور ماوراء بنفش به دیواره سلولی میکروب نفوذ می کند و به اطلاعات ژنتیکی موجود در DNA و RNA آسیب می رساند و بنابراین مانع از تولید مثل آن می شود. این روش برای آب های کدر حاوی درصد بالایی از مواد جامد، مواد معلق یا مواد آلی محلول، مناسب نیست. برای راندمان بهینه ضد رسوب زیستی، به ویژه برای سازه های آبگیر نزدیک ساحل، نیاز به دوزهای بالایی است. و به دلیل خطرات زیست محیطی و بهداشتی، کاربرد در مقیاس بزرگ را محدود می کند.

۵-۶- استفاده از سطوح پیشرفته

سطوح فوق آبگریز مصنوعی نانومهندسی شده، به مواد پیشرفته برای کاربردهای صنعتی تبدیل شده اند. همچنین پوشش های ضد رسوب

زیستی بدون زیست کش، به ویژه انواع فوق آبگریز و نانو بافت، فناوری های امیدوار کننده ای را ارائه می دهند. استفاده از ورقه های فولادی پوشش داده شده با نانوذرات پنتواکسید و انادیوم می توانند مانع رشد باکتری ها و جلبک ها روی سطح در تماس با آب مانند بدنه کشتی یا اسکله ها شوند. پوشش های آبگریز مبتنی بر پلیمر در مقایسه با نانو پوشش ها، کنترل ماکرو فولینگ موفق تری را روی زیرلایه های فلزی نشان داده اند.

۶- تأثیرات رسوبات زیستی بر سازه های فراساحلی

بیوفولینگ مشکلات عمده زیستی و اقتصادی را برای واحدهای عملیاتی به وجود می آورند. از جمله این مشکلات می توان به موارد زیر اشاره کرد.

۱- تجمع این جانداران بر بدنه کشتیها موجب ایجاد مقاومت اصطکاکی، کاهش سرعت، افزایش وزن و افزایش مصرف سوخت می شود.

۲- رسوب بدنه کشتیها می تواند منجر به انتقال گونه های مهاجم شود که می تواند به شیلات، آبی پروری، زیرساخت های دریایی و بندری آسیب برساند و تهدیدی بالقوه برای اکوسیستم های محلی و سلامت انسان باشد.

۳- ظرفیت حمل و سرعت جریان خطوط لوله های آبگیر در اثر رشد جوامع بیوفولینگ کاهش می یابد.

۴- صنعت کشتیرانی سالانه برای مبارزه با مسائل مربوط به رسوب زیستی و افزایش مصرف سوخت هزینه زیادی می کند. رسوب زیستی در سیستم های اسمز معکوس (RO) نفوذپذیری و دفع نمک را کاهش می دهد و به تمیز کردن مکرر و تحمل هزینه های بالای نگهداری نیاز دارد.

۵- خوردگی مواد مهم ترین چالش برای زیرساخت ها و تجهیزاتی است که در محیط های دریایی فعالیت می کنند.

۶- رشد رسوبات زیستی روی سازه های فراساحلی مخصوصا سازه های ثابت در آب های عمیق تر به دلیل افزایش هزینه های بهره برداری و نگهداری، از جمله استفاده از غواصان جهت نظارت و استفاده مکرر از وسایل پاکسازی و تجهیزات قابل توجه است.

۷- به طور غیرمستقیم، زیست رسوب دریایی در آلودگی هوا و انتشار گازهای گلخانه ای که توسط افزایش نیروی کشش هیدرودینامیکی و اصطکاک کشتی ها و شناورها ایجاد می شود، به تغییرات آب و هوایی، آلودگی محیط زیست و گرمایش جهانی کمک می کند. افزایش مصرف سوخت منجر به آلودگی جوی از طریق انتشار مواد مضر مانند دی اکسید کربن (CO_2) که به گرمایش جهانی کمک می کند، اکسیدهای گوگرد (SO_x) که باعث باران اسیدی در مناطق ساحلی می شوند، اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و سایر گازهای گلخانه ای و همچنین ذرات معلق ریز می شود.

۸- تأثیرات بر زیرساخت های آبی پروری شامل افزایش خطر بیماری در موجودات آبی و تأثیر بر سلامت انسان، هیدرودینامیک تغییر یافته در داخل و اطراف قفس که بر سطح اکسیژن، کیفیت آب و حجم و پایداری قفس، افزایش وزن و آسیب فیزیکی است. که منجر به کاهش قابل توجه بهره وری می شود.

۷- اثرات مثبت ایجاد بایوفولینگ

از نظر زیست محیطی می توان به جنبه های مثبت بیوفولینگ اشاره کرد.

۱- نقش بیوفولینگ در چرخه های زیست محیطی

- ✓ ارگانسیم‌های بیوفولینگ، مواد آلی محلول در آب را جذب و در قالب بیومس تثبیت می‌کنند. پس از تجزیه، مواد مغذی مثل نیتروژن، فسفر و کربن دوباره وارد چرخه می‌شوند.
- ✓ جلبک‌ها و دیاتوم‌های بیوفولینگ عمل فتوسنتز انجام می‌دهند. و به تثبیت کربن و تولید اکسیژن در اکوسیستم‌های دریایی کمک می‌کنند.
- ۲- ایجاد و حفظ زیستگاه‌های طبیعی
- ✓ ساختار بیوفولینگ بعنوان یک زیستگاه برای بی‌مهرگان کوچک عمل می‌کند و باعث افزایش تنوع زیستی در محیط‌های آبی مصنوعی مانند اسکله‌ها و سکوها می‌شوند.
- ✓ لایه‌های بیوفولینگ می‌توانند به عنوان پیش‌ساز برای کاشت مرجان یا جلبک‌های بزرگ در پروژه‌های بازسازی اکوسیستم دریایی به کار روند.
- ۳- استفاده بیوفولینگ در سامانه‌های فیلتراسیون و پالایش طبیعی
- ✓ با کنترل رشد بیوفولینگ در فیلترهای تصفیه آب، می‌توان از فعالیت باکتری‌ها و جلبک‌ها برای حذف مواد آلی، اکسیداسیون آمونیاک، جذب فلزات سنگین استفاده کرد.
- ✓ بیوفولینگ حاوی میکروارگانسیم‌های مفید، به تخریب آلاینده‌ها و مواد سمی در پساب‌های صنعتی و فاضلاب کمک می‌کند.
- ۴- استخراج ترکیبات زیست‌فعال و زیست‌سوخت‌ها از بیوفولینگ
- ✓ از میکروب‌های و جلبک‌های بیوفولینگ ترکیباتی مانند آنزیم‌ها، پلی‌ساکاریدها، آنتی‌بیوتیک‌های طبیعی، رنگدانه‌ها، مواد ضدباکتری استخراج می‌شوند. که این مواد در صنایع دارویی، آرایشی و غذایی کاربرد دارند.
- ✓ برخی جلبک‌های بیوفولینگ می‌توانند لیپیدهای قابل استفاده برای تولید بیودیزل یا بیوگاز فراهم کنند.
- ۵- کنترل زیستی و اکولوژیک
- ✓ از گونه‌های بیوفولینگ خاص برای کنترل رشد گونه‌های مهاجم در محیط‌های آبی می‌توان استفاده کرد. از طریق رقابت زیستی، از رشد گونه‌های ناخواسته جلوگیری می‌شود.

۸- مدیریت بیوفولینگ:

مدیریت بیوفولینگ در یک پروژه شامل موارد زیر است:

- پایش مداوم: نصب سنسورهای اختلاف فشار در مسیرهای آبی جهت تشخیص به موقع گرفتگی لوله‌ها.
- زمان‌بندی دوره‌ای: تعیین یک برنامه منظم برای بازرسی (بازرسی چشمی غواصان یا دوربین‌های مداربسته زیرآبی).
- تجزیه و تحلیل هزینه‌های پاکسازی: گاهی اوقات پاکسازی دستی ارزان‌تر از هزینه‌های طولانی مدت پوشش‌های گران‌قیمت است.
- رعایت الزامات زیست‌محیطی: همواره اطمینان حاصل شود که مواد شیمیایی استفاده شده در منطقه مورد نظر مجاز هستند و اثرات سمی شدیدی بر محیط زیست دریایی ندارند.

۹- سابقه تدوین دستورالعمل‌های مواجهه با بیوفولینگ

در سطح جهانی، مهمترین ابزار قانونی برای مواجهه با بیوفولینگ متکی بر کنوانسیون حقوق دریاهای سازمان ملل متحد (UNCLOS)، سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) و کمیته دائمی حفاظت از محیط زیست دریایی (MEPC) می‌باشد.

➤ رسوبات زیستی می‌توانند عامل مهمی برای انتقال گونه‌های آبرزی مهاجم باشند. کنوانسیون سازمان ملل متحد در مورد حقوق دریاهای (UNCLOS) با الزام کشورها به همکاری با یکدیگر «برای جلوگیری، کاهش و کنترل آلودگی محیط زیست دریایی ناشی از فعالیت‌های انسانی، از جمله ورود عمدی یا تصادفی گونه‌های مضر یا بیگانه به بخش خاصی از محیط زیست دریایی»، چارچوب جهانی را فراهم می‌کند.

➤ سازمان بین‌المللی دریانوردی (IMO) با پیشگامی در مقابله با انتقال گونه‌های آبرزی مهاجم از طریق کشتیرانی، در خط مقدم تلاش‌های بین‌المللی بوده است. با تصویب کنوانسیون بین‌المللی BWM (کنترل و مدیریت آب توازن و رسوبات کشتی‌ها، ۲۰۰۴)، کشورهای عضو IMO تعهد آشکاری برای به حداقل رساندن انتقال گونه‌های آبرزی مهاجم از طریق کشتیرانی، به ویژه از طریق آب توازن، اعلام کردند.

➤ کنوانسیون بین‌المللی AFS (کنترل سیستم‌های مضر ضد خزه در کشتی‌ها، ۲۰۰۱) تمرکز آن بر پیشگیری از اثرات نامطلوب استفاده از سیستم‌های ضد خزه و زیست‌کش‌هایی است که ممکن است حاوی آنها باشند.

➤ دستورالعمل MEPC.1/Circ.792، ۲۰۱۲ "راهنمای به حداقل رساندن انتقال گونه‌های آبرزی مهاجم به عنوان رسوبات زیستی (رسوب بدنه) برای شناورهای تفریحی" منتشر شد.

➤ دستورالعمل MEPC.378(80)، ۲۰۲۳ برای کنترل و مدیریت خزه‌های زیستی کشتی‌ها به منظور به حداقل رساندن انتقال گونه‌های آبرزی مهاجم منتشر شد.

➤ دستورالعمل MEPC.1/Circ.918، ۲۰۲۳ برای حمایت از دسترسی جهانی به خدمات تمیز کردن درون آب ایمن و سازگار با محیط زیست منتشر شد.

➤ دستورالعمل MEPC.395(82)، ۲۰۲۴ برای توسعه طرح مدیریت بهره‌وری انرژی کشتی (مدیریت رسوبات زیستی می‌تواند ابزاری مؤثر در افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از کشتی‌ها باشد) منتشر شد.

➤ دستورالعمل MEPC.1/Circ.918، ۲۰۲۵ راهنمایی در مورد پاکسازی رسوبات زیستی کشتی‌ها در آب منتشر شد.

➤ در سطح اروپا، آیین‌نامه (EC) در مورد ثبت، ارزیابی، مجوز و محدودیت مواد شیمیایی محصولات زیست‌کش به عنوان عوامل ضدخزه می‌باشد و همیشه تضمین می‌کند که "آنها به اندازه کافی مؤثر هستند و هیچ اثر غیرقابل قبولی بر ارگانیسم‌ها ندارند.

➤ مقررات داخلی در کشورهای مختلف برای فهرست مواد غیرمجاز بعنوان زیست‌کش می‌تواند متفاوت باشد. بعنوان مثال آژانس حفاظت از محیط زیست دانمارک، کالیفرنیا، لس‌آنجلس، واشنگتن، آژانس حفاظت از محیط زیست ایالات متحده (US EPA) در حال ترویج جایگزین‌های ایمن‌تری است که استفاده از مس را در پوشش‌های زیست‌کش حذف می‌کنند.

➤ آیین‌نامه پارلمان اروپا (EU) یا قانون امنیت زیستی نیوزیلند در جهت پیشگیری و مدیریت ورود و گسترش گونه‌های مهاجم بیگانه می‌باشد.

➤ IMO در طول دو دهه گذشته، موضوع ورود گونه‌های مهاجم مربوط به کشتیرانی را ابتدا با کنوانسیون مدیریت آب توازن (BWM) و پس از آن با دستورالعمل‌های متمرکز بر رسوبات زیستی به عنوان ناقل ورود (کنوانسیون CBD، WCN)، مورد توجه ویژه قرار داده است.

- تدوین استاندارد مدیریت ریسک شناورها برای «رسوب زیستی در شناورهای ورودی به نیوزیلند» (CRMS-BIOFOUL) انجام شد. تمام کشتی‌هایی که به نیوزیلند می‌رسند باید قبل از ورود، مدارکی دال بر «مدیریت زیست‌رسوب» ارائه دهند.
- الزامات مدیریت زیست‌رسوب استرالیا، "راهنمایی‌هایی را برای اپراتورهای کشتی در مورد بهترین شیوه مدیریت زیست‌رسوب ارائه می‌دهد."
- مقررات مربوط به مدیریت زیست‌رسوب بدنه نروژ، هدف از این مقررات «جلوگیری از ورود گونه‌های مهاجم خطرناک به نروژ از طریق زیست‌رسوب بدنه ناشی از حمل و نقل بین‌المللی و جلوگیری از گسترش بیشتر گونه‌های غیربومی خطرناک در آب‌های نروژ» است.
- کنوانسیون بین‌المللی جلوگیری از آلودگی ناشی از کشتی‌ها (کنوانسیون MARPOL) معاهده اصلی برای تنظیم آلودگی دریایی ناشی از کشتی‌ها است.

۱۰- نتیجه گیری

بیوفولینگ دریایی به تجمع و رشد جانداران روی سطوح غوطه‌ور در آب دریا مانند کشتی‌ها، سکوها، خطوط لوله، تورهای پرورش ماهی و بدنه تجهیزات دریایی گفته می‌شود. این پدیده معمولاً با تشکیل لایه زیستی اولیه از باکتری‌ها و مواد آلی شروع می‌شود و سپس به تدریج موجودات بزرگ‌تر مانند جلبک‌ها، بارناکل‌ها، صدف‌ها و سایر ارگانیسم‌ها روی آن رشد می‌کنند. بیوفولینگ دریایی یک چالش مهم فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در صنایع دریایی است. این پدیده اگر کنترل نشود، باعث افزایش قابل توجه هزینه‌ها و کاهش بهره‌وری می‌شود. بنابراین، استفاده از روش‌های پیشگیرانه، پوشش‌های مناسب و برنامه‌های نگهداری منظم برای کاهش اثرات آن ضروری است. در عین حال، رویکردهای جدید باید تا حد امکان سازگار با محیط زیست باشند تا از آسیب به اکوسیستم‌های دریایی جلوگیری شود. در یک پروژه با توجه به عوامل موثر و نوع بیوفولینگ و تأثیر آن بر پروژه باید برنامه مواجهه و مدیریت بیوفولینگ را تصمیم‌گیری کرد.

مراجع:

- 1- Maria João Romeu, Filipe Mergulhão, (2023) "Development of Antifouling Strategies for Marine Applications" *Microorganisms* 2023, 11, 1568
- 2- Kanavillil Nandakumar, Tetsuo Yano, (2003) "Biofouling and Its Prevention: A Comprehensive Overview" *Biocontrol Science*, 2003, Vol.8, No. 4, 133-144.
- 3- Gorkem Gizer, Umur Önal, Manoj Ram, Nurettin Sahiner, (2023) "Biofouling and Mitigation Methods: A Review" *Biointerface research in applied chemistry*, Volume 13, Issue 2, 2023, 185
- 4- Kailey Nicole Richard, Kelli Z. Hunsucker, Travis Hunsucker, Geoffrey Swain, (2024) "The Benefits of Biofouling – Promoting the Growth of Benthic Organisms to Enhance Ecosystem Services" *Journal of Ecological Engineering* 2024, 25(9), 133–155
- 5-Santos-Simón et al. (2025) Past, present and (possible) future of biofouling regulatory instruments within the international marine environmental protection framework, *Environmental Sciences Europe*, 37:127

- ۶- گیلان عطاران فریمان، سیما ابیر ، (۱۳۹۸) "بررسی راهکارهای کنترل رشد فولینگ زیستی در تاسیسات دریایی" نخستین همایش ملی علوم، صنایع دریایی و توسعه پایدار سواحل مکران.
- ۷- فرهود آذر سینا (۱۳۹۸) "ربات های زیرآبی تمیزکاری خزه از شناورها: طراحی و ارزیابی سیستم" نشریه علمی اندیشه آماد / شماره ۷۰ پاییز (۱۳۹۸) / سال هجدهم.
- ۸- ملکه سلیمی پور (۱۳۹۲) "موجودات مزاحم (Bio-fouling) در اکوسیستم های دریایی: با تاکید بر اثرات مخرب آن در کشت های دریایی" پانزدهمین همایش صنایع دریایی (MIC ۲۰۱۳).
- ۹- فاطمه دارابی تبار ، سید علی اکبر هدایتی (۱۳۹۵) "ارائه راهکار کنترل و جلوگیری از رشد رسوبات زیستی و بارناکله در بدنه کشتیها و تأسیسات دریایی" فصلنامه علوم و فناوری دریا شماره ۷۸، ص ۱۹-۲۶.
- ۱۰- سارا جمشیدی زاده، نرگس امراللهی بیوکی، (۱۳۹۶) "اثر پوششهای آنتی فولینگ بر پدیده بیوفولینگ و ویژگی آنها" نوزدهمین همایش صنایع دریایی (MIC ۲۰۱۷).