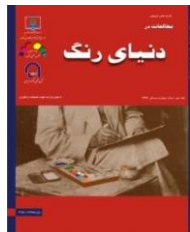


مقاله پذیرفته شده



پوشش های آنتی فولینگ (ضدخزه) تقویت شده با نانومواد: سازوکارها، عملکرد و راهبردهای طراحی

مهران رستمی*، مریم السادات قرشی*

مقاله پژوهشی

JSCW-2512-1271

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۹-۲۲

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۵-۰۳-۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵-۰۳-۲۰

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

م.رستمی، م. قرشی " پوشش های آنتی فولینگ (ضدخزه) تقویت شده با نانومواد: سازوکارها، عملکرد و راهبردهای طراحی"، نشریه علمی

مطالعات در دنیای رنگ JSCW-2512-1271 این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. ماکت مقاله

توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می شود.

مقاله پذیرفته شده

پوشش‌های آنتی‌فولینگ (ضد‌خزه) تقویت‌شده با نانومواد: سازوکارها، عملکرد و راهبردهای

طراحی

مهران رستمی^{*}، مریم السادات قرشی^{*}

۱. دانشیار، گروه پژوهشی نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۶۵۴

۲. استادیار گروه پژوهشی نانوفناوری رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۶۵۴

* rostami-m@icrc.ac.ir

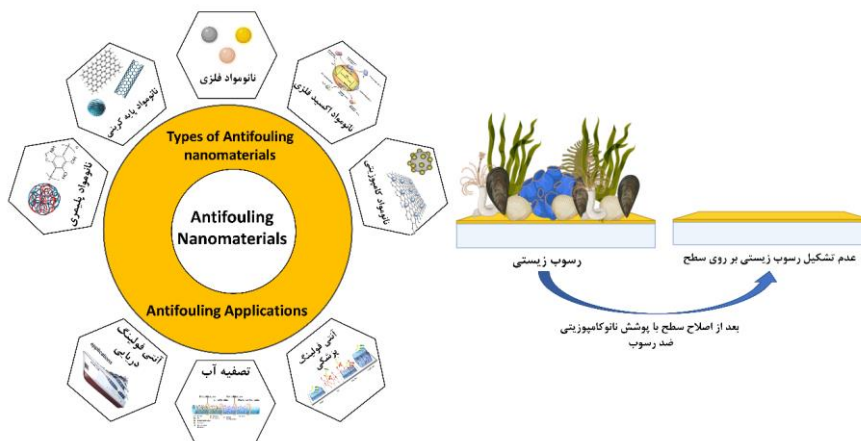
* ghorashi-ms@icrc.ac.ir

چکیده

رسوب زیستی تهدید قابل توجهی است که منجر به خطرات سلامتی و پیامدهای مالی در محیط‌های مختلف، از جمله سازه‌های دریایی، دستگاه‌های پزشکی و تأسیسات تصفیه آب می‌شود. این وضعیت، نیاز فوری به توسعه پوشش‌های ضد رسوب نوآورانه و چند منظوره را برجسته می‌کند. فناوری‌های متعددی معرفی شده‌اند که از زیست‌کش‌های سمی، پوشش‌های ضد رسوب ناسازگار با محیط زیست و کلر برای کاهش رسوب زیستی استفاده می‌کنند. با این وجود، استفاده از آنها با مسائل مربوط به خطرات زیست‌محیطی و سلامتی همراه است. پوشش‌های ضد رسوب پلیمری به عنوان یک راه حل مناسب ظاهر شده‌اند که به طور موثر عملکرد را حفظ می‌کنند و در عین حال از طریق ایجاد لایه سدکننده مبتنی بر آب پوشی سطح، رسوب زیستی را به حداقل می‌رسانند. مطالعات اخیر در پوشش‌های ضد رسوب پلیمری، نانومواد غیرسمی و ایمن برای محیط زیست را با ویژگی‌های ضد میکروبی و مهار کننده زیست لایه برجسته به عنوان پرکننده مورد بررسی قرار داده‌اند. این پوشش‌های نانوکامپوزیتی، به دلیل خواص ضد میکروبی ذاتی خود، در برابر میکروارگانیسم‌های مختلف آبرزی و توسعه زیست لایه‌های باکتریایی، اثربخشی نشان داده‌اند. این مقاله مروری بر عوامل ضد رسوب بر پایه فناوری نانو از جمله فلزات (مانند نقره)، اکسیدهای فلزی (مانند اکسید روی، اکسید تیتانیوم)، کربن (از جمله گرافن، نانولوله‌های کربنی و نقاط کوانتومی کربنی)، پلیمری و کامپوزیتی می‌پردازد. علاوه بر این، مکانیسم‌های مختلفی را که زمینه‌ساز مهار تکثیر سلول‌های باکتریایی و تشکیل زیست لایه توسط پوشش‌های نانوکامپوزیتی ضد رسوب هستند، مورد بحث قرار می‌دهد. این مقاله همچنین به چالش‌های مربوط به سنتز نانومواد ضد رسوب، محدودیت‌های عملی آنها و چشم‌اندازهای آینده می‌پردازد.

کلمات کلیدی: رسوب زیستی، پوشش‌های ضد خزه پلیمری، نانومواد، نانوکامپوزیت

چکیده تصویری:



Nanomaterial-Enhanced Antifouling Coatings: Mechanisms, Performance, and Design Strategies

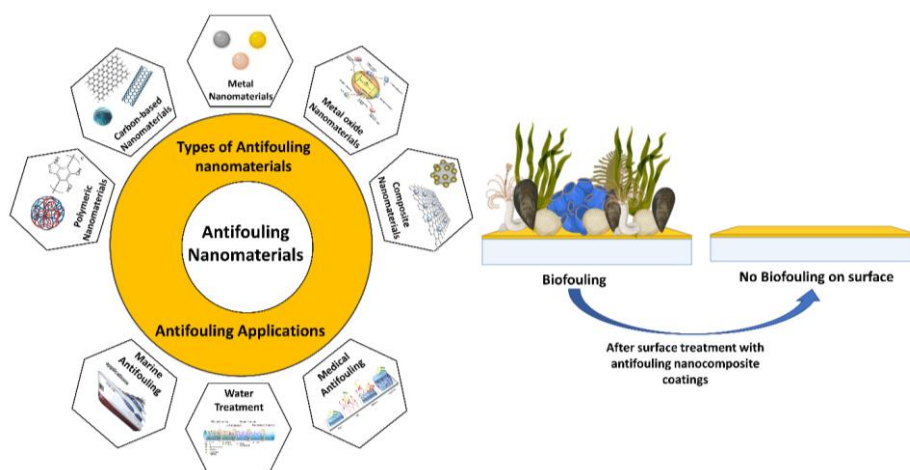
Mehran Rostami*, Maryam Sadat Ghorashi*

1. Department of Nanomaterials and Nanocoatings, Institute for Color Science and Technology, P.O. Box 16765-654, Tehran, Iran

Abstract:

Biofouling represents a major challenge, contributing to health risks and considerable economic burdens in marine infrastructure, medical applications, and water treatment systems. This situation underscores the urgent need for the development of innovative antifouling coatings. Numerous technologies have been introduced that utilize toxic biocides, ecologically-harmful antifouling coatings, and chlorine to mitigate biofouling through hydration barrier. Nevertheless, their use is accompanied by environmental and health risk. Polymeric antifouling coatings have surfaced as a viable solution, effectively maintaining performance while minimizing biofouling. Recent studies in polymeric antifouling coatings have incorporated environmentally safe, non-toxic nanomaterials with outstanding antimicrobial characteristics as fillers, which have demonstrated efficacy against various waterborne microorganisms and the development of bacterial biofilms. This article offers a review of nanotechnology-driven antifouling agents including metals, metal oxides, carbon, polymeric, and composite nanostructures. Additionally, it discusses the various mechanisms that underlie the inhibition of bacterial cell proliferation and biofilm formation by antifouling nanocomposite coatings. The article also addresses the obstacles related to the synthesis of antifouling nanomaterials, their practical constraints, and future prospects.

Keywords: Biofouling, Polymeric antifouling coatings, nanomaterials, nanocomposite



مقاله پذیرفته شده

۱. مقدمه

پدیده رسوب دریایی^۱ به رسوب و تجمع موجودات دریایی مانند باکتری‌ها، جلبک‌ها، سخت‌پوستان و نرم‌تنان بر سطوح غوطه‌ور در آب‌های دریا گفته می‌شود. این پدیده یک چالش جدی برای صنایع دریایی، حمل‌ونقل، سازه‌های فراساحل و آبی‌پروری به شمار می‌رود، زیرا موجب افزایش مقاومت هیدرودینامیکی کشتی‌ها، افزایش مصرف سوخت، کاهش سرعت، افزایش خوردگی و تخریب سازه‌ها و رشد ارگانیسم‌های مهاجم می‌گردد (۱). مطالعات نشان داده است که رسوب زیستی می‌تواند مصرف سوخت سازه‌های شناور متحرک را تا بیش از ۴۰ درصد افزایش دهد که پیامد آن افزایش هزینه‌های عملیاتی و انتشار گازهای گلخانه‌ای است (۲).

برای کنترل این پدیده، از دیرباز تلاش برای ایجاد و توسعه پوشش‌های آنتی‌فولینگ^۲ بوده و تا به امروز با فناوری‌های جدید ادامه دارد. این پوشش‌ها با هدف جلوگیری از چسبندگی اولیه میکروارگانیسم‌ها، ممانعت از رشد کلونی‌ها و کاهش تشکیل زیست لایه بر روی سطح سازه‌های غوطه‌ور در آب، مورد استفاده قرار می‌گیرند. نسل‌های اولیه این پوشش‌ها عمدتاً بر پایه ترکیبات فلزی سمی مانند سرب، مس و ترکیبات آلی قلع (TBT تری‌بوتیل‌تین) بودند که اگرچه عملکرد آنتی‌فولینگ بسیار مؤثری داشتند، اما به دلیل اثرات منفی زیست‌محیطی شدید و ایجاد اختلالات هورمونی در موجودات دریایی، از سال ۲۰۰۸ توسط سازمان بین‌المللی دریانوردی ممنوع شدند (۳).

با ممنوعیت استفاده از پوشش‌های حاوی ترکیبات قلع، تحقیقات به سمت توسعه پوشش‌های سازگار با محیط‌زیست تغییر یافت. در این راستا چند رویکرد اصلی مطرح شد:

- پوشش‌های خود صیقل‌شونده^۳ یا پوشش‌های مبتنی بر آزادسازی کنترل‌شده زیست‌کش‌هایی^۴ که از نظر زیست‌محیطی کم‌خطرتر هستند: پوشش‌های خودصیقل‌شونده یکی از کارآمدترین نسل‌های رنگ‌های ضد رسوب هستند. عملکرد آن‌ها بر پایه ی یک مکانیسم کنترل‌شده ی هیدرولیز سطح پلیمر است که باعث می‌شود سطح رنگ به‌طور پیوسته و یکنواخت ساییده و تجدید شود. این رفتار نقش مهمی در جلوگیری از رسوب زیستی دارد (۴،۵).

پوشش‌های خودصیقل‌شونده عموماً دارای اسکلت پلیمری با زنجیره‌های جانبی هستند که می‌توانند در محیط قلیایی هیدرولیز شوند تا خاصیت ضد رسوبی ایجاد کنند، به این معنی که لایه سطحی با ضخامت مشخص به طور مداوم جدا می‌شود و سطح جدیدی نمایان می‌شود. به خصوص، ترکیبات عاملی حاوی استرها و نمک فلزی (آکریلات قلع، آکریلات روی و غیره) مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (۶-۸). این نوع پوشش بدون شک توانایی خودنوسازی قوی دارد و همچنین می‌تواند بر نقص‌هایی که با انحلال ماتریس پوشش، موجب تسریع تخریب و فروپاشی خود می‌شوند، غلبه کنند (۹). هر نوع از این رزین‌ها، نرخ صیقل شدن خاص خود را دارد. پوشش‌های آزادسازی کنترل‌شده بیوسایدها (مانند ترکیبات مسی) در عین کارایی، هنوز دغدغه‌های زیست‌محیطی دارند (۴). با وجود پیشرفت‌ها، پوشش‌های ضد رسوب خود صیقل‌شونده بدون قلع با چالش‌هایی در حفظ اثربخشی در هر دو محیط آب دریا و آب شیرین روبرو هستند. در آب دریا، سرعت آزادسازی مس با افزایش شوری افزایش می‌یابد و منجر به تخلیه بیشتر مس از عوامل ضد رسوب با محتوای بالای اکسید مس می‌شود. برعکس، عوامل ضد رسوب مبتنی بر مس در آب شیرین اثربخشی

¹ Marine fouling

² Antifouling coatings

³ Self-Polishing

⁴ biocides

مقاله پذیرفته شده

محدودی نشان می‌دهند و در نتیجه استفاده از آن‌ها عملاً بی‌فایده/غیرضروری می‌شود (۱۰). این مسئله نشان می‌دهد که زیست‌کش‌ها در محیط‌های آب شیرین ممکن است منجر به آزادسازی غیرضروری مس شوند که به آلودگی آب منجر می‌شود و اثرات زیست‌محیطی را تشدید می‌کند. در نتیجه، تحقیقات بیشتری برای رسیدگی به این مسائل با کاهش سرعت آزادسازی مس در آب دریا و به حداقل رساندن استفاده از زیست‌کش در محیط‌های آب شیرین مورد نیاز است.

- پوشش‌های رسوب رها^۱ با انرژی آزاد سطحی بسیار پایین، معمولاً کمتر از ۲۵ ژول بر متر مربع، مشخص می‌شوند. ساختار مولکولی سطح پوشش باعث می‌شود نیروهای واندروالس، پیوند هیدروژنی و سایر برهمکنش‌های فیزیکوشیمیایی بین موجودات رسوب‌گذار (مانند باکتری‌ها، جلبک‌ها و نرم‌تنان) و پوشش به طور قابل توجهی کاهش یابد. در نتیجه استحکام چسبندگی آنها به طور مؤثری کاهش می‌یابد و از رسوب زیستی جلوگیری می‌شود و تمیزی سطح افزایش می‌یابد (۵).

پوشش‌های بر پایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان^۲ (PDMS) و فلوئوروپلیمرها انرژی سطحی بسیار پایینی دارند و اجازه چسبندگی پایدار به ارگانیسم‌ها را نمی‌دهند و یا جدایش آنها را تسهیل می‌کنند (۱۱).

مواد ضد رسوب آلی بر پایه فلوئوروپلیمرها دارای چندین ویژگی قابل توجه هستند، از جمله الکترون‌گاتیویته بالا، شعاع کوچک، پیوند C-F کوتاه و انرژی پیوند بالا. اتم‌های فلورین با اشغال فضاهای بیابینی به طور مؤثر از پیوندهای C-C محافظت کرده و در نتیجه یکپارچگی آن را حفظ می‌کند. این امر موجب می‌شود که رزین‌های فلورین‌دار از پایداری شیمیایی فوق‌العاده، مقاومت حرارتی بالا و آب‌گریزی چشمگیری برخوردار باشند. ویژگی آب‌گریزی آنها باعث می‌شود که این مواد به عنوان یکی از مکانیسم‌های آزادسازی رسوب عمل کنند. مکانیسم‌های بر پایه سیلیکون و بر پایه فلوئور دارای تفاوت‌هایی به این شرح هستند. (۱) انرژی آزاد سطحی فلوئوروپلیمر آلی کمتر از پلیمر ارگانوسیلیکون است. (۲) سفتی زنجیره فلوئورو-کربن، انعطاف‌پذیری زنجیره مولکولی فلوئوروپلیمر آلی را محدود می‌کند و در نتیجه مدول بالاتری در مقایسه با پلیمر ارگانوسیلیکون ایجاد می‌کند. در نتیجه، برای حذف موجودات رسوب دریایی از سطح فلوئوروپلیمر آلی، به انرژی بیشتری نیاز است. (۳) هزینه فراوری پلیمر فلوئوردار از پلیمر سیلیکون بیشتر است و فرآیند آماده‌سازی آن پیچیده است. (۴) مقاومت بالای ترکیبات هالوتان^۳ در برابر تجزیه، چالش‌هایی را در فرآیندهای طبیعی ایجاد می‌کند و در عین حال منجر به تجمع آنها در زنجیره غذایی می‌شود (۱۲).

- پوشش‌های الهام‌گرفته از طبیعت که با تقلید از ساختارهای زیستی مانند پوست کوسه یا سازوکارهای شیمیایی جلبک‌ها، به دنبال ایجاد سطوحی مقاوم به چسبندگی فراهم می‌کنند (۱۳).

مکانیسم‌های ضد رسوب زیست تقلید، میکرومورفولوژی سطح، قابلیت آزادسازی رسوب و پتانسیل «اثر لوتوس^۴» را نشان می‌دهند و آنها را به کاندیداهای امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای ضد رسوب دریایی تبدیل می‌کنند. با این وجود، مکانیسم‌های آنها هنوز کاملاً مشخص نیستند. علاوه بر این، برخی از محققان با استناد به کلونیزاسیون ارگانیسم‌های رسوب‌گذار روی پوست موجودات دریایی خاص، در مورد اثر ضد رسوبی مکانیسم‌های ضد رسوب ریزساختاری زیست تقلید تردید دارند. تأکید اصلی در تحقیقات اخیر بر تکثیر^۵ ریزساختارهای سطحی بوده است. با این حال، این رویکردها با موانع قابل توجهی از جمله هزینه‌های بالا و پیچیدگی‌ها در تولید و کاربرد در مقیاس بزرگ مواجه هستند (۱۴).

¹ Fouling release

² Polydimethylsiloxane

³ halothane

⁴ Lotus effect

⁵ replication

مقاله پذیرفته شده

• پوشش‌های هوشمند و فعال شونده که در مواجهه با تغییرات محیطی (مانند نور، دما یا تحریک شیمیایی) عملکرد آنتی‌فولینگ از خود نشان می‌دهند (۱۵).

به عنوان مثال از این نوع پوشش‌های هوشمند می‌توان به کار چن^۱ و همکارانش (۱۶) اشاره کرد که پوشش‌های ضد رسوب دوگانه دوست^۲ حساس به pH (PDHM)^۳ را که از طریق واکنش‌های تراکمی بین پلیمرهای آمین نوع سوم پروتونه شده و PDMS سنتز شده‌اند، توسعه دادند. این پوشش‌های دوگانه دوست، انتقال بار سطحی حساس به pH را نشان می‌دهند که توسط تعادل پروتوناسیون کنترل می‌شود. در شرایط آب دریا (pH ~ 8.3)، سطح PDHM افزایش بار منفی را نشان می‌دهد که با یک لایه سطحی هیدراته شده برای جلوگیری از چسبندگی رسوبات زیستی هم‌افزایی می‌کند. متعاقباً اسیدی شدن سطح ناشی از ارگانیسم‌های تشکیل دهنده کولونی، پروتونه شدن آمین‌های نوع سوم را تحریک می‌کند و بار سطحی را به مثبت تبدیل می‌کند. این انتقال، زنده ماندن ارگانیسم‌های رسوب‌گذار را مختل می‌کند و رهایش آنها را تحت نیروهای برشی هیدرودینامیکی افزایش می‌دهد.

در کنار پیشرفت‌های فنی، یکی از چالش‌های اساسی در توسعه پوشش‌های آنتی‌فولینگ، ایجاد تعادل میان کارایی، پایداری در محیط‌های خورنده دریایی، طول عمر عملیاتی و سازگاری محیط‌زیستی است. به همین دلیل، امروزه بسیاری از رویکردهای پژوهشی به سمت فناوری‌های نانومقیاس، مواد هیبریدی، و طراحی پوشش‌هایی با انرژی سطحی قابل کنترل سوق پیدا کرده‌اند (۱۷).

با توجه به افزایش مقررات زیست‌محیطی، فشار برای کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و نیاز به بهره‌وری بیشتر در صنایع دریایی، انتظار می‌رود پوشش‌های آنتی‌فولینگ نسل جدید نقش مهمی در آینده صنعت کشتیرانی و حفاظت از سازه‌های ساحلی ایفا کنند (۱۸).

با توجه به محدودیت‌های عملی و مقرون‌به‌صرفه بودن راه‌حل‌های ضد رسوب موجود، نیاز مبرمی به توسعه عوامل زیست‌کش کارآمدتر وجود دارد که بتوانند با سرعت بالایی با رسوب عوامل زیستی مقابله کنند. نانوفناوری در زمینه علوم زیستی، به‌ویژه در جهت توسعه دارورسانی کارآمد، تشخیص، بیان ژنی سلولی^۴ در سیستم‌های گیاهی و جانوری، استفاده از فناوری نانوآرایه برای تشخیص آلودگی مواد غذایی، استفاده از پوشش‌های فیلم نانوکامپوزیتی برای بسته‌بندی مواد غذایی و غیره، شتاب زیادی به خود گرفته است (۱۹،۲۰) با پیشرفت‌های اخیر در فناوری نانو و بینش‌های روزافزون در طراحی مواد الهام گرفته از زیست‌شناسی، نانوپوشش‌های ضد رسوب پایدار برای مقابله با رسوب زیستی، تشکیل زیست لایه و خوردگی زیستی توسعه یافته‌اند. نانوذرات در دو دهه اخیر به‌طور گسترده در پوشش‌های آنتی‌فولینگ برای جلوگیری از رسوب‌گذاری زیستی^۵ به کار گرفته شده‌اند. کاربرد دسته‌های مختلفی از مواد نانوساختار شامل نانومواد و نانوکامپوزیت‌های بر پایه کربن، فلز و پلیمر برای تهیه پوشش‌های ضد خزه گزارش شده است. در این بررسی، راه‌حل‌های ضد خزه مرتبط با فناوری نانو که برای غلبه بر مشکل رسوب زیستی توسعه یافته‌اند، ارائه شده است. علاوه بر این، عملکرد ضد خزه این عوامل ضد رسوب بر پایه نانوذرات در کشتی‌ها، دستگاه‌ها مورد بحث قرار گرفته است. علاوه بر این، مکانیسم عمل نانوپوشش‌های ضد خزه در جهت مهار رشد سلول‌های باکتریایی، چسبندگی و تشکیل زیست لایه با مثال‌های مناسب ارائه شده است.

پوشش‌های دریایی ضدخزه حاوی نانومواد، آگریزی فوق‌العاده، دوام بالا، جلوگیری از چسبندگی میکروارگانیسم‌ها، مقاومت میکروبی، خاصیت الاستومری و خواص ضد خوردگی ارائه می‌دهند (۲۱)، که این ویژگی‌ها راه‌حل‌های جدیدی برای رشد پایدار صنایع دریایی هستند. نانوذرات می‌توانند به طور مؤثر در فرمولاسیون پوشش‌های ضدخزه استفاده شوند که منجر به بهبود خواص آن می‌شود (۲۲). نانوذرات نقره، نانوساختارهای

¹ Chen

² amphiphilic

³ pH-responsive amphiphilic antifouling coatings

⁴ Cellular gene expression

⁵ biofouling

مقاله پذیرفته شده

کربنی مانند نانولوله کربنی (CNT) (۲۳) و گرافن (۲۴) معمولاً برای کاربرد ضدخزه استفاده می‌شوند. علاوه بر این، چندین نیمه‌رسانای اکسید فلزی مانند دی‌اکسید تیتانیوم نوع آناتاز (TiO₂) (۲۵) و اکسید روی (ZnO) (۲۶) برای فرمولاسیون‌های نانوکامپوزیت استفاده شده‌اند که فعالیت‌های ضد رسوبی را نشان می‌دهند.

در این مرور، راهکارهای ضد رسوب مبتنی بر نانوفناوری که برای مقابله با رسوب زیستی توسعه یافته‌اند، ارائه می‌شوند. همچنین، مکانیسم عملکرد نانوپوشش‌های ضد رسوب در مهار رشد باکتری‌ها، چسبندگی آن‌ها و تشکیل زیست‌لایه تشریح شده است. در ادامه، چالش‌ها و موانع موجود در مسیر تجاری‌سازی عوامل ضد رسوب نانویی و چشم‌اندازهای آینده این حوزه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲. کاربرد نانوذرات در پوشش‌های ضد رسوب زیستی

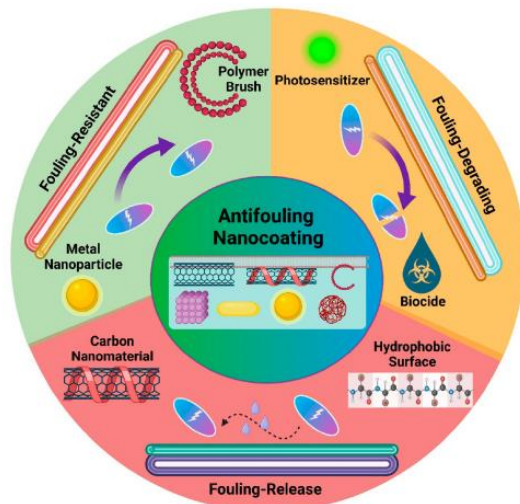
بی‌تردید فناوری نانو به عنوان یکی از فناوری‌های نوظهور، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای عملکرد و نوآوری در صنایع مختلف ایفا کرده است. پوشش‌های ضد رسوب نانوکامپوزیتی در حوزه‌های کشاورزی، شیلات، پزشکی و مهندسی کاربردهای گسترده‌ای یافته‌اند و از اهمیت زیادی برخوردار هستند. نانومواد به دلیل نسبت سطح به حجم (مساحت سطح ویژه) بالا که به معنای برهمکنش بیشتر با میکروارگانیسم‌های ایجادکننده رسوب است، اندازه ذرات کوچکتر و مساحت سطح بیشتر، برهمکنش با زیست‌لایه‌ها و حذف رسوبات زیستی در مقیاس میکرو و ماکرو را تسهیل می‌کنند و کارایی قابل توجهی را در کنترل رسوب زیستی نشان می‌دهند. برخورداری از مکانیسم‌های عملکرد چندگانه در مهار تکثیر میکروارگانیسم‌ها و تخریب زیست‌لایه سبب شده است این مواد نسبت به زیست‌کش‌های مرسوم به عنوان عامل ضد میکروبی مؤثرتر و ترجیحی مطرح شوند (۲۷).

به دلیل مکانیسم عملکرد چندگانه، نانومواد می‌توانند به راحتی مقاومت میکروبی در برابر آنتی‌بیوتیک‌ها را دور زده و به طور مؤثر میکروب‌ها را هدف قرار دهند، در حالی که آنتی‌بیوتیک‌های مرسوم در این مرحله اغلب ناکارآمد بوده و نمی‌توانند از رشد میکروبی جلوگیری کنند (۲۸). در کل، سه استراتژی برای توسعه نانوپوشش‌های ضد رسوب وجود دارد، که عبارتند از: ۱. مقاومت در برابر تشکیل رسوب ۲. تخریب‌کننده رسوب ۳. رهاکننده رسوب (شکل ۱) (۲۹).

Commented [G1]: به شکل ۱ ارجاع داده شده است.

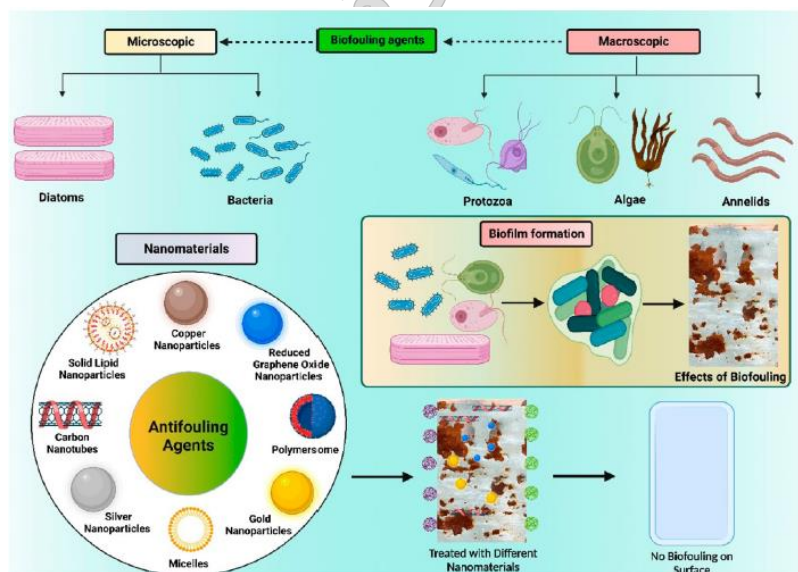
سطوح پوشش داده شده باید غیر چسبنده یا مقاوم در برابر رشد ارگانیسم‌های رسوب‌گذار باشند، یا پوشش باید به گونه‌ای با ارگانیسم رسوب‌گذار برهمکنش داشته باشد که با آنها را از سطح آزاد کند یا گونه‌های ایجادکننده رسوب را ریشه‌کن کند.

خواص سطحی نانومواد بدلیل دانسیته اتمی سطحی بالا مهم‌ترین جنبه برای فعالیت ضد رسوب است. افزودن نانومواد با ویژگی خاص در پوشش‌ها از رسوب میکروبی جلوگیری می‌کند، خودترمیمی سطوح آسیب‌دیده را افزایش می‌دهد و با خوردگی مبارزه می‌کند (۳۰). اخیراً مشخص شده است که استفاده از برخی نانوذرات در پوشش‌های ضد رسوب، آگریزی، دوام و مقاومت میکروبی آنها را افزایش می‌دهد و خواص الاستومری، آب‌گریزی و ضد خوردگی آنها را تقویت می‌کند (۳۱). بررسی‌ها نشان داده شده که افزودن نانومواد با خواص ضد میکروبی به پوشش‌های معمولی هم، خواص ضد میکروبی را روی سطوح پوشش داده شده ایجاد می‌کند. بخش بعدی انواع مختلف مواد/کامپوزیت‌های نانوساختار تهیه‌شده و ارزیابی‌شده برای فعالیت ضد رسوب زیستی را مورد بحث قرار می‌دهد (شکل ۲).



شکل ۱. استراتژی‌ها در طراحی نانوپوشش‌های ضدخزه (۳۲).

Figure 1. Strategies for designing antifouling coatings (32).



شکل ۲. شماتیک کاربرد نانومواد در مبارزه با رسوبات زیستی (۳۲).

Figure 2. Schematic illustration of nanomaterials application in the fight against biofouling (32).

مقاله پذیرفته شده

۲-۱- نانومواد بر پایه کربن

۲-۱-۱- گرافن

گرافن یک ماده بر پایه کربن است که به صورت یک لایه واحد از اتم‌های کربن با پیوند sp^2 در یک ساختار شبکه‌ای شش ضلعی قرار می‌گیرد. این ماده دارای مساحت سطح زیاد، استحکام مکانیکی بالا، رسانایی الکتریکی، پایداری حرارتی و قابلیت تجزیه پذیری زیاد است که آن را به ماده فعال نوری و سازگار با محیط زیست تبدیل می‌کند (۳۳). با توجه به این خواص قابل توجه، گرافن همچنان یکی از گزینه‌های اصلی محققان برای سنتز نانومواد و نانوکامپوزیت‌ها با عملکرد بالا است. در حال حاضر، سه مشتق از گرافن، یعنی اکسید گرافن (GO)، اکسید گرافن احیا شده (RGO) و نقاط کوانتومی گرافن (GQDs)، به عنوان نانوذرات مناسب و کارآمد در ساخت نانوکامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند. این نوع پوشش‌های نانوکامپوزیتی، مقاومت ضد میکروبی مشاهده شده در گونه‌های باکتریایی تولیدکننده زیست لایه، یعنی کلبسیلا پنومونیه^۱، سودوموناس آئروژینوزا^۲، اشیرشیا کلی^۳ و باسیلوس سوبتیلیس^۴ را کاهش می‌دهند (۳۳-۳۵).

طبق گزارش‌ها، مشتقات گرافن به عنوان عوامل ضد رسوب هم استفاده می‌شوند و این ویژگی کاربردهای زیادی در صنایع مختلف دارند (۳۶). علاوه بر خواص ضد میکروبی آنها برای مبارزه با پاتوژن‌های مقاوم به دارو، نانومواد بر پایه گرافن در طراحی سیستم‌های دارورسانی، دستگاه‌های پزشکی، ابزارهای حسگر زیستی و تصویربرداری زیستی، درمان نوری-حرارتی^۵، بهبود زخم، غشاهای تصفیه آب و کاربردهای نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳۷-۴۰). هنگامی که نانوذرات گرافن در پوشش‌های ضد رسوب و ضد خوردگی استفاده می‌شوند، ضخامت زیست لایه و زیست‌توده گونه‌های باسیلوس و سودوموناس را کاهش می‌دهند (۳۵). اثر سمی گرافن بر میکروارگانیسم‌ها و لاروها احتمالاً به واسطه کاهش چسبندگی لاروهای سیپرید^۶ به سطوح پوشش داده شده ایجاد می‌شود که مانع تثبیت و رشد آنها می‌گردد (۴۱).

۲-۱-۲- نانولوله‌های کربنی

نانولوله‌های کربنی (CNTs) ساختارهای استوانه‌ای توخالی متحدالمرکز با قطرهای کوچک (چند نانومتر) و طول‌های متغیر (چند نانومتر تا میلی‌متر) هستند. بر اساس تعداد لایه‌های موجود در استوانه، CNTs ممکن است تک دیواره (SWCNTs)، دو دیواره یا چند دیواره (MWCNTs) باشند. CNTs و گرافن خواص ضد باکتریایی قوی در برابر باکتری‌های گرم مثبت و گرم منفی، از جمله هاگ‌های باکتریایی، از خود نشان می‌دهند (۴۲). CNTs همچنین در برابر ارگانیسم‌های رسوب‌گذار در مقیاس ماکرو در محیط‌های دریایی مؤثر هستند. کربن سیاه در اندازه نانو از رسوب بارناکل‌ها^۷، مانند لاروهای آمفیبالانوس آمفیتريت^۸، بر روی سطوح جلوگیری می‌کند. CNTs با غلظت ۰.۵٪ برای افزایش جمعیت پروتئوباکتری‌ها^۹ در زیست لایه‌های باکتریایی و در عین حال کاهش جمعیت باکتریودت‌ها^{۱۰} و کاهش رسوب صدف کوروسکوس^{۱۱} مناسب بود. نانولوله‌های کربنی

¹ Klebsiella pneumoniae

² Pseudomonas aeruginosa

³ Escherichia coli

⁴ Bacillus subtilis

⁵ Photothermal

⁶ Cyprid larvae

⁷ Barnacles

⁸ Amphibalanus amphitrite

⁹ Proteobacteria

¹⁰ Bacteriodes

¹¹ Mytilus coruscus

مقاله پذیرفته شده

همچنین به طور گسترده در پوشش‌های دریایی مقاوم در برابر رسوب و خوردگی در صنایع نفت و گاز استفاده می‌شوند. این نانوذرات معمولاً در ماتریس‌های پلیمری قرار می‌گیرند که رایج‌ترین نمونه آنها رزین‌های مهندسی بر پایه اپوکسی است.

افزایش ظرفیت جذب نانولوله‌های کربنی به دلیل وجود الکترون‌های π غیرهمبسته^۱ روی سطح است که برهمکنش با مواد جذب شده را تسهیل می‌کند. نانولوله‌های کربنی علاوه بر خواص ضد رسوبی، خواص مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی را نیز افزایش می‌دهند. نانولوله‌های کربنی به دلیل القای استرس اکسیداتیو^۲، التهاب و آپوپتوز^۳ در سلول‌های زنده شناخته شده و می‌توانند منجر به مرگ سلولی شوند (۴۱).

۳-۱-۲- نقاط کوانتومی کربنی

انواع خاصی از نانوذرات کربنی، از جمله نقاط کوانتومی کربنی، پتانسیل بالایی برای کاهش تشکیل رسوبات زیستی دارند (۴۴،۴۳). در میان این نانوذرات، نقاط کربنی، از جمله نقاط کوانتومی کربنی، نقاط کوانتومی گرافنی و نانوالماس‌ها، به دلیل خواص ضد باکتریایی استثنایی و قابلیت‌های حسگری زیستی خود، که ناشی از اثرات حبس کوانتومی، خواص نوری ذاتی و زیست‌تخریب‌پذیری است، برجسته هستند (۴۴،۴۵). کنترل بر ترکیب، اندازه، شکل و اصلاحات سطحی این نانوذرات، خواص متمایز، زیست‌سازگاری و غیر سمی بودن را به آنها می‌بخشد و آنها را برای کاربردهای زیستی متنوع بسیار مؤثر می‌کند (۴۶).

تحقیقات نشان داده است که بار سطحی نقاط کربنی، به ویژه آنهایی که بارهای منفی زیادی دارند، فعالیت باکتریایی را از طریق برهمکنش‌های الکترواستاتیک مختل کرده و تولید موضعی گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن^۴ (ROS) را افزایش می‌دهند که منجر به آسیب به ساختارهای سلولی باکتریایی می‌شوند. به عنوان مثال، ژو^۵ و همکارانش (۴۷) یک پوشش بر پایه نقاط کربنی با بار منفی با استفاده از اسکوربیک اسید به عنوان پیش‌ماده توسعه دادند. این پوشش به دلیل ترکیب نقاط کوانتومی، پتانسیل سطحی $-30 \sim -40$ mV را نشان داد. دافعه الکترواستاتیکی ایجاد شده توسط نقاط کربنی، چسبندگی باکتری‌ها را مهار کرد، در حالی که تولید ROS از نقاط کربنی، آسیب بیشتری به دیواره‌های سلولی باکتریایی باکتری‌های ضعیف چسبیده رساند و عملکرد ضد باکتریایی مؤثر را تضمین کرد. بارگذاری بهینه نقاط کوانتومی کربنی، پایدارترین ماتریس الکترونیکی و کمترین رسانایی یونی را ایجاد کرد، ورود آب اکسیژن را مسدود کرد و محافظت طولانی مدت ضد باکتریایی را ارائه داد. علاوه بر این، نقاط کربنی می‌توانند به عنوان مراکز جذب الکترون کارآمد در هنگام ترکیب با گروه‌های عاملی دهنده الکترون تحت تابش نور عمل کنند. این تعامل می‌تواند از طریق افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی و تولید ROS، اثرات ضد باکتریایی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

۲-۲- نانوذرات فلزی

نانومواد فلزی شامل Ag، Au، Cu و سایر موارد، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند، زیرا نه تنها ویژگی‌های ضد رسوب خوبی مانند آب‌دوستی بالا، خواص ضد جذب پروتئین^۶ و خواص ضد باکتری دارند، بلکه سمیت نسبتاً کمی نیز برای انسان و حیوانات نشان می‌دهند (۴۸). در میان آنها، خواص آب‌دوستی و سمیت نقش مهمی در خاصیت ضد باکتری و ضد رسوب دارند. بنابراین، مطالعه سمیت نانومواد فلزی، برای تضمین کاربرد آنها در سنتز غشا^۷ یا بهبود خواص ضد رسوب غشا و تحقیقات زیست پزشکی ضروری است.

^۱ Delocalized

^۲ Oxidative stress

^۳ Apoptosis

^۴ Reactive oxygen species

^۵ Zhu

^۶ Anti-protein absorption

^۷ Membrane

مقاله پذیرفته شده

نقره به عنوان ماده‌ای شناخته می‌شود که اثرات ضد میکروبی قوی علیه میکروارگانیسم‌ها اعمال می‌کند. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد آن، مانند نسبت سطح به حجم بالا و افزایش واکنش‌پذیری سطح، نانوذرات نقره و کامپوزیت‌های آنها به طور گسترده در تولید محصولات پزشکی و مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. نانوذرات نقره اثرات مهاری علیه باکتری‌ها، قارچ‌ها و ماکروفلورهای (جلبک‌ها و صدف‌ها) ایجادکننده ریزرسوب نشان داده‌اند. نانوذرات نقره به عنوان یکی از قوی‌ترین عوامل ضد رسوب دریایی شناخته شده‌اند. اخیراً، مطالعات نشان داده‌اند که نانوذرات نقره با غلظت ۰.۱٪، قادر به اعمال اثر باکتری کشی ۱۰۰٪ هستند. پوشش‌های بر پایه نانوذرات نقره و پلیمرهای آلی اثرات مهاری مطلوبی در برابر باکتری‌ها و ریزجلبک‌ها دارند (۴۹).

یون‌های نقره از طریق مکانیسم‌های متعدد، از جمله مهار نیروی محرکه پروتون (PMF)^۱، اختلال در زنجیره انتقال الکترون تنفسی و تغییر نفوذپذیری غشای سلولی، فعالیت ضد میکروبی قوی از خود نشان می‌دهند و در نهایت منجر به مرگ سلول می‌شوند. نکته قابل توجه این است که اثر باکتری کشی نانوذرات نقره به طور قابل توجهی توسط اثرات سطحی آنها افزایش می‌یابد (۵۰). در پوشش‌های ضد رسوب نانوکامپوزیتی، نانوذرات نقره به عنوان جزء فعال اصلی عمل می‌کنند. این پوشش‌ها با پلیمرهای آلی به عنوان ماتریس، حلال‌های آلی برای تعدیل ویسکوزیته و پرکننده‌ها و افزودنی‌های مختلف فرموله می‌شوند. جوهرول^۲ و همکارانش (۵۱) نانوذرات نقره را با استفاده از عصاره برگ انار سنتز و خواص ضدباکتریایی آنها را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که این نانوذرات، که با سنتز با واسطه برگ گواوا^۳ تولید شده‌اند، فعالیت ضدباکتریایی قابل توجهی در برابر باکتری‌های گرم مثبت (استافیلوکوکوس اورئوس)^۴ و گرم منفی (اشرشیا کلی)^۵ نشان داده‌اند. در طول ناپیری کشتی، نانوذرات نقره آزاد شده از پوشش، باکتری‌های روی سطح بدنه را به طور موثری از بین بردند و در نتیجه از رسوب زیستی جلوگیری کرده و نقش محافظتی برای بدنه کشتی ایفا کردند (۵۲).

ادغام نانوذرات نقره در پوشش‌ها استراتژی امیدوارکننده‌ای برای کاربردهای ضد رسوب است. اما، چالش‌هایی مانند تجمع نانوذرات و رهاسازی کنترل نشده آنها از پوشش پلیمری برای اعمال خاصیت ضد میکروبی در حال حاضر کاربرد گسترده‌تر آنها را محدود می‌کند (۵۳).

۲-۳- اکسیدهای فلزی و نانوساختار هیبریدی فلز/اکسید فلز

نانوذرات اکسید فلزی، مانند ZnO، TiO₂، SnO₂، بسیار از نظر نوری فعال^۶ هستند و برای کاربردهای ضد میکروبی، خودتمیز شوندگی، خودترمیمی، ضد خوردگی و ضد رسوب زیستی استفاده می‌شوند. جدول ۱ اثرات ضد رسوبی نانوساختارهای اکسید فلزی فوتوکاتالیستی مختلف را بر روی پروکاریوت‌های آبی^۷ (سیانوباکتری‌ها) و یوکاریوت‌ها^۸ (ریزجلبک‌ها، بازناکل‌ها، حلقه زیان^۹ و غیره) خلاصه می‌کند. به طور کلی، محققان اثر ضد رسوبی نانوذرات اکسید فلزی، نانوسیم‌ها، نانومیل‌ها و نانوساختارهای هیبریدی را مطالعه کرده‌اند. ZnO، TiO₂ و اکسید فلزی هیبریدی و همچنین نانوساختارهای اکسید فلزی هیبریدی کربن-فلز، رایج‌ترین سیستم‌های مورد استفاده برای مهار رسوب زیستی بودند (جدول ۱). نانوذرات ZnO به دلیل هزینه کم و در دسترس بودن، در مقایسه با سایر اکسیدهای فلزی توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند (۵۴). طبق دستورالعمل‌های

¹Inhibition of proton motive force (PMF)

² Johurul

³ Psidium guajava

⁴ Staphylococcus aureus

⁵ Escherichia coli

⁶ Photoactive

⁷ Cyanobacteria

⁸ Eukaryote

⁹ Microalgae

¹⁰ Bryozoa

مقاله پذیرفته شده

FDA (سازمان غذا و داروی ایالات متحده)، ZnO به عنوان یک ماده ایمن برای کاربردهای مختلف ذکر شده است. نانوذرات ZnO به دلیل زیست سازگاری، سمیت کم و خواص ضد میکروبی، در فرآوری و بسته‌بندی مواد غذایی و همچنین در بخش کشاورزی استفاده می‌شوند (۵۵). تخریب فوتوکاتالیستی^۱ رنگ‌های آلی سمی مختلف و آلاینده‌های معدنی در فاضلاب صنعتی با استفاده از اکسیدهای نیمه‌هادی ZnO و TiO₂ تحت تابش نور انجام شده است. TiO₂ به طور گسترده در کاربردهای خود تمیز شونده استفاده می‌شود.

خواص ضد رسوبی و سمیت نانومواد اکسید فلزی به گونه‌های بیولوژیکی بستگی دارد، به طوری که برخی از گونه‌ها نسبت به سایرین حساس‌تر هستند (۵۶). علاوه بر این، خواص فیزیکوشیمیایی نانومواد مانند اندازه ذرات، شکل، بارهای سطحی و گروه‌های سطحی بر سمیت آنها تأثیر می‌گذارد. اندازه کوچکتر نانومواد می‌تواند به راحتی از طریق غشاهای سلولی و سایر موانع موجودات زنده وارد شود. میزان جذب نانومواد با افزایش اندازه ذرات کاهش می‌یابد (۵۷).

با این حال، اصل اساسی ضدعفونی فوتوکاتالیستی مبتنی بر اکسید فلزی شامل تولید ROS است و این گونه‌ها منجر به تخریب فوتوکاتالیستی موجودات جذب‌شده (مواد آلی، میکروارگانیسم‌ها و ماکروارگانیسم‌ها) می‌شوند. علاوه بر این، مکانیسم‌های ضد رسوب اکسیدهای فلزی نانوساختار بر اساس آزادسازی یون‌های فلزی مانند یون‌های Ag⁺ و Zn²⁺ از نانومواد مربوطه نیز می‌باشد.

بارهای سطحی و گروه‌های مختلف روی نانوساختارها، واکنش‌پذیری اکسیداسیون سطحی متفاوتی را نشان می‌دهند که منجر به تولید ROS در سطوح مختلف می‌شود. استفاده از TiO₂ نوع آناتاز یا ZnO به دلیل شکاف باند وسیع و نرخ بالای نوترکیبی بارهای تولید شده توسط نور، محدود به تابش نور UV است. بنابراین، تلاش‌ها بر دستیابی به راندمان فوتوکاتالیستی بالا با این مواد، به‌ویژه در زیر نور مرئی، متمرکز شده است. به منظور مناسب‌سازی ZnO، TiO₂، SnO₂ و سایر مواد نیمه‌هادی برای فوتوکاتالیز نور مرئی، تکنیک‌های متعددی توسعه یافته‌اند، مانند اصلاح سطح مواد نیمه‌هادی، ایجاد جای خالی اکسیژن، آرایش اتم‌های فلزی/غیرفلزی، رسوب فلزات نجیب و اتصال با سایر نیمه‌هادی‌ها با مواد کربنی (۵۸).

جدول ۱. خواص ضد رسوب نانوساختارهای اکسید فلزی متداول.

Table 1. Antibiofouling properties of some usual metal oxide nanostructures.

Nanomaterial	Organisms	Mechanisms	Applications	References
TiO ₂ Nps	Stenotrophomonas maltophilia	Photocatalytic effect	Marine underwater archaeological sites	(25)
TiO ₂ nanofibers	Micrococcus sp. Gram-positive bacterium, Bacillus sp.	Photo-degradation and inhibition of microbial growth	Antifouling effects under visible light	(59)
Ag-TiO ₂ hybrid	Halomonas pacifica	Reduced biofilm attachment by 98%	Antimicrofouling	(26)
Ag@TA-SiO ₂	Escherichia coli	Suppressing 98.6% of protein adsorption	Antimicrofouling	(60)
ZnO NPs	S. aureus	Photocatalytic and toxic effects	Anti-microfouling on glass surface	(61)
ZnO nanowires	Bacillus subtilis Escherichia coli	Cell membrane deterioration, and ROS generation	Photocatalysis, Antimicrobial agents	(62)
ZnO nanorods	Escherichia coli	ROS generation leading to oxidation of membrane lipids	Anti-biofouling	(63)
ZnO nanostructures	Pseudomonas aeruginosa	Generation of ROS	Enhanced biofouling resistance	(64)
MgO NPs	Escherichia coli Salmonella enterica	Cell membrane deterioration	Antifouling food surfaces	(65)

¹ Photocatalysis

مقاله پذیرفته شده

Al ₂ O ₃ NPs	Escherichia coli	Cell wall disruption because of tiny particle size and high surface energy	Antifouling coating having anti-adhesion capability	(66)
PDMS/GO-Al ₂ O ₃	Pseudomonas aeruginosa Micrococcus sp., Pseudomonas putida, and Aspergillus niger	Formation of micro-nano roughness, lower surface free energy	Superhydrophobic self-cleaning antifouling surface	(67)
CeO ₂ NPs	Pseudomonas aeruginosa Staphylococcus epidermidis	Cell stress leading to cell death	Anti-infection	(68)
GO NPs	Bacillus sp. Pseudomonas sp.	Significant reduction of biofilm and biomass thickness	Anti-biofouling and anticorrosion	(69)

۲-۴- نانومواد پلیمری

نانومواد پلیمری با نانومواد معدنی متفاوت هستند. آنها حاوی گروه‌های عاملی مختلف هستند که آنها را برای واکنش‌ها و اصلاح سطحی بیشتر مناسب می‌سازد. علاوه بر این، آنها غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر هستند و به راحتی در پلیمرهای دیگر برای ساخت مواد غشایی هیبریدی ترکیب می‌شوند (۴۸). آنها به دلیل گروه‌های آبدوست خود که می‌توانند خاصیت آبدوستی غشاهای را بهبود بخشند، به عنوان نانومواد ضد رسوب استفاده شدند. پلی پیرول، به عنوان یک پلیمر الکترواکتیو^۱، به دلیل زیست‌سازگاری خوب و پایداری محیطی و رسانایی الکتریکی بالا، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. علاوه بر این، از پلی پیرول به دلیل فراوانی گروه‌های عاملی برای اصلاح سطح زیست‌مولکول‌ها استفاده می‌شود (۷۰). نانوفیبرهای پلی آنیلین به عنوان نوعی افزودنی نانومواد برای تهیه غشاهای اولترافیلتراسیون پلی سولفون استفاده شدند. نتایج نشان داد که غشاهای نانوکامپوزیتی پلی سولفون/ پلی آنیلین خاصیت ضد رسوبی بالا، پایداری افزودنی خوب و مقاومت پارگی بالا را نشان می‌دهند. نانومواد حاوی پلی‌دوپامین برای کاربردهای مختلف توجه قابل توجهی را به خود جلب کرده‌اند (۷۱). چن و همکارانش (۷۲) نانومواد حاوی پلی‌دوپامین و کاربرد آنها در دارورسانی، حسگر زیستی، ضد رسوب و اهداف ضد میکروبی را بررسی کردند.

پلی‌زویتریون‌ها^۲ به عنوان پلیمرهای پوششی برای کاربرد ضد رسوب سطحی استفاده می‌شوند. یک پلی‌زویتریون دارای اسکلت پلی (آمینو اسید) با بخش اتیلن‌دی‌آمین و کربوکسیلات در زنجیره‌های جانبی (PGlu-(DET-Car)) می‌تواند به طور مؤثر نانومواد را پوشش دهد (۷۳). پلی (آمینو اسید)‌های زویتریونی با ساختار α -مارپیچ میله‌ای سفت و سخت می‌توانند به سرعت خودآرایی کنند و سطوح بدون رسوب بهبود یافته ایجاد کنند (۷۴). بنابراین، نانومواد اصلاح‌شده با پلیمرهای زویتریونی به دلیل زیست‌سازگاری عالی، پایداری و قابلیت تبادل لیگاند، چشم‌انداز کاربرد گسترده‌ای دارد (۷۵).

۲-۵- نانومواد کامپوزیتی

موادی که از یک فلز و یک غیرفلز (کربن یا سیلیکون) تشکیل شده‌اند، به عنوان نانوکامپوزیت‌های فلز-غیرفلز در نظر گرفته می‌شوند. به دلیل خواص آبدوستی فلز و غیرفلزات، نانوذرات بر پایه فلز/اکسید فلز (مانند Cu, Ag, Fe, TiO₂, ZnO, CuO) و نانومواد کربنی (GO, CNTs) در یک غشای پلیمری پراکنده می‌شوند تا خواص آن (ضد چسبندگی، ضد میکروبی و اکسایشی نوری) را تغییر دهند (۷۶). علاوه بر این، این نانومواد اغلب به پوشش‌ها نیز اضافه می‌شوند تا مقاومت در برابر رسوب را بهبود بخشند. محمودی و همکارانش (۷۷) گزارش دادند که نانوصفحات گرافن

¹ Electroactive polymer

² Polyzwitterions

مقاله پذیرفته شده

اکسید تزئین شده با نانوذرات نقره^۱ برای ترکیب در یک غشای ماتریس مختلط^۲ استفاده شدند. غشای سنتز شده بهبود قابل توجهی در مورد خواص ضد رسوب در برابر باکتری اشریشیا کلی نشان داد.

موادی که از مواد پایه فلزی و پلیمر تشکیل شده‌اند، به عنوان نانوکامپوزیت‌های مواد پایه فلزی-پلیمر در نظر گرفته می‌شوند. مکسین های^۳ دوبعدی به دلیل انعطاف پذیری عالی، قابلیت تنظیم شیمیایی، سطوح آبدوست و فعالیت ضدباکتریایی عالی، توجه گسترده‌ای را برای کاربردهای متنوع به خود جلب کرده‌اند. اگرچه بسیاری از گروه‌های عاملی (OH ، O^- و یا F^-) بر روی سطح $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ قرار دارند، اما مکسین $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ قادر به تشکیل فیلم‌های پایدار و مستقل نیست. بنابراین، غشاهای مبتنی بر مکسین معمولاً بر اساس یک پایه متخلخل پلیمری توسعه داده می‌شوند. پندی^۴ و همکارانش (۷۸) یک غشای کامپوزیتی $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ /استات سلولز با پیوند کووالانسی متقاطع^۵ با استفاده از اتصال عرضی فرمالدئید تهیه کردند. غشاها رودامین B (<۹۲٪) و متیل گرین^۶ (<۹۸٪) را به خوبی تخریب کردند و مهار رشد مناسبی برای اشریشیا کلی (<۹۸٪) و باسیلوس سیتیلیس^۷ (<۹۶٪) نشان دادند. مواد نانوکامپوزیتی با رشد درجای نانوذرات طلا (Au NPs) روی سطح مکسین و بارگذاری آن با متیلن بلو^۸ به عنوان یک مولکول داخلی الکتروشیمیایی ساخته شدند (۷۹). مواد نانوکامپوزیتی تشکیل شده رسانایی بسیار خوبی از خود نشان دادند و با آرایش با پتیده‌های چند منظوره، برای ساخت حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی مورد استفاده قرار گرفتند. این سیستم حسگر زیستی به عنوان یک استراتژی عمومی و کارآمد برای ارزیابی خاصیت ضد رسوب و شناسایی اهداف در نمونه‌های بیولوژیکی پیچیده شناخته شده است، زیرا پتیده‌های چندمنظوره طراحی شده عملکرد ضد رسوب بسیار مطلوبی از خود نشان داده‌اند.

پلیمرهای ارگانو-سیلیکون، به ویژه PDMS، می‌توانند بر محدودیت‌های فلوروپلیمر غلبه کنند. علاوه بر این، نانومگنتیت (Fe_3O_4) به دلیل وجود Fe(II) و Fe(III) در ساختار خود، دارای ویژگی‌های بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی برتر است. بر این اساس، سلیم^۹ و همکارانش (۸۰) از کامپوزیت‌های الاستومری پلیمر سیلوکسان/نانو-مگنتیت برای سنتز مجموعه‌ای از نانوکامپوزیت‌های فوق آبریز از طریق تغییر غلظت پرکننده‌های Fe_3O_4 برای رنگ‌های ضد رسوب دریایی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که توزیع یکنواخت نانوذرات Fe_3O_4 آب گریزی، صافی سطح، بی‌اثری حرارتی^{۱۰}، خواص بالک، دوام و خواص ضد خوردگی را بهبود می‌بخشد. غلامی و همکارانش (۸۱) در مورد نانوذرات TiO_2 عامل‌دار شده با گروه‌های آبدوست L-سیستین به عنوان اصلاح کننده غشا برای ساخت غشای کامپوزیتی گزارش دادند. غشاهای ماتریس مخلوط با نانومواد TiO_2 -cys عملکرد ضد رسوب و آبدوستی قابل توجهی از خود نشان دادند.

پلی دوپامین می‌تواند با خودپلیمریزاسیون اکسیداتیو^{۱۱} دوپامین تشکیل شود، که یک استراتژی تطبیق پذیر و کاربردی برای اصلاح آبدوستی سطح فراهم می‌کند (۸۲). بنابراین، پلی دوپامین به عنوان یک الگوی فعال برای عامل‌دار کردن نانومواد مختلف برای افزایش خواص آبدوستی آنها استفاده می‌شود. لیانگ^{۱۲} و همکارانش (۸۳) یک استراتژی مونتاژ سلسله مراتبی حاوی چهارچوب آلی کووالانسی-COOH/دوپامین با سازگاری

^۱ Ag nanoparticles decorated graphene oxide Nanoparticles

^۲ Mixed matrix membrane

^۳ Mxene

^۴ Pandey

^۵ Covalent Crosslink

^۶ Methyl green

^۷ Bacillus subtilis

^۸ Methylene blue

^۹ Selim

^{۱۰} Cal inertness

^{۱۱} Oxidative self-polymerization

^{۱۲} Liang

مقاله پذیرفته شده

بالا را برای ساخت یک غشای پلی وینیلیدین فلوراید^۱ (PVDF) فوق آبدوست اصلاح شده گزارش کردند. این غشا نسبت دفع بسیار بالا، قابلیت ضد رسوب مؤثر و پایداری نفوذناپذیری را نشان داد.

۳- مکانیسم عمل عوامل ضد رسوب بر پایه نانومواد

سیستم‌های باکتریایی را می‌توان بسته به ترکیب و ساختار دیواره سلولی به گرم مثبت و گرم منفی طبقه‌بندی کرد. دیواره سلولی باکتری‌های گرم مثبت دارای یک لایه پپتیدوگلیکان^۲ ضخیم است. از سوی دیگر، دیواره سلولی باکتری‌های گرم منفی دارای لیپوپلی ساکاریدها^۳، فضای پری پلاسمی^۴ و یک لایه پپتیدوگلیکان نازک است.

نانوذرات می‌توانند به راحتی به سلول باکتریایی نفوذ کرده و از بیش از یک طریق، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، باعث تخریب سلول شوند. در مجموع، مکانیسم‌های احتمالی عمل ضد باکتریایی نانوذرات به شرح زیر است: (i) هنگامی که نانوذرات به دیواره سلولی باکتری‌ها متصل می‌شوند، یکپارچگی غشای سلولی را مختل کرده و متعاقباً باعث نشت سیتوپلاسمی^۵ می‌شوند. (ii) هنگامی که گونه‌های باکتریایی با نانوذرات در تماس قرار می‌گیرند، گونه‌های فعال اکسیژن مانند پراکسید هیدروژن، رادیکال‌های هیدروکسیل و آنیون‌های سوپراکسید تولید می‌شوند. این رادیکال‌ها می‌توانند به مولکول‌های زیستی مانند لیپیدها و DNA آسیب بیشتری وارد کرده و باعث مرگ سلول شوند. (iii) یون‌های فلزی آزاد شده از نانوذرات فلزی، در ماشین‌های مولکولی^۶ مانند تولید آدنوزین تری فسفات (ATP)^۷ و تکثیر DNA اختلال ایجاد کرده و باعث مرگ سلول می‌شوند. (iv) آسیب فیزیکی به غشاهای سلولی باکتری‌ها زمانی رخ می‌دهد که لبه تیز وجوه کریستالی نانوذرات با گونه‌های میکروبی تماس پیدا کند (۸۴). علاوه بر این، ذرات فلزی آزاد شده از نانوذرات مستقیماً با لایه میکروبی تداخل کرده و زیست لایه را بی‌ثبات می‌کنند. پس از ورود نانوذرات به سلول، گونه‌های باکتریایی گرم مثبت و گرم منفی تمایل به نشت سیتوپلاسمی دارند. نانوذرات نقره تولید شده با رویکرد سبز به دلیل توانایی‌شان در نفوذ به دیواره سلولی باکتری‌ها و ترمیم آسیب‌های ساختاری ناشی از فعل و انفعالات بین نانوذرات و مولکول‌های زیستی حاوی گوگرد و فسفر، اثر ضد باکتریایی دارند. علاوه بر این، نانوذرات نقره رادیکال‌های آزادی تولید می‌کنند که با غشای باکتری‌ها واکنش می‌دهند و در نهایت به آن آسیب می‌رسانند (۸۵). تا به امروز، مکانیسم‌های ضدباکتریایی نانوذرات فلزی پیشنهاد شده‌اند که شامل استرس اکسیداتیو القا شده، آزادسازی یون فلزی یا اثرات خاص غیراکسیداتیو می‌باشند (۸۶، ۸۷).

¹ Polyvinylidene fluoride

² Peptidoglycan

³ Lipopolysaccharide

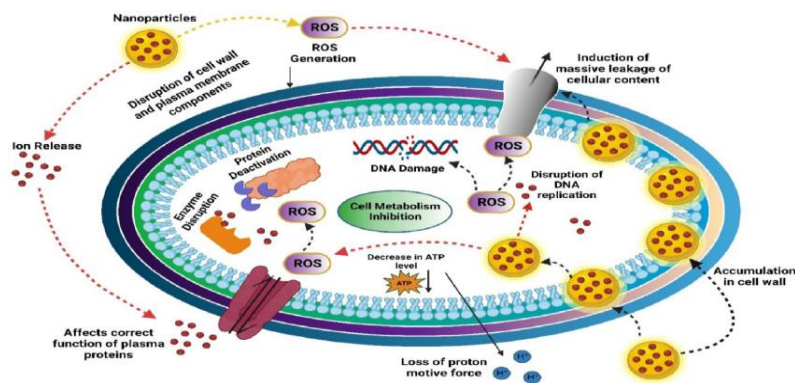
⁴ Periplasmic space

⁵ Cytoplasmic leakage

⁶ Molecular machines

⁷ Adenosine triphosphate

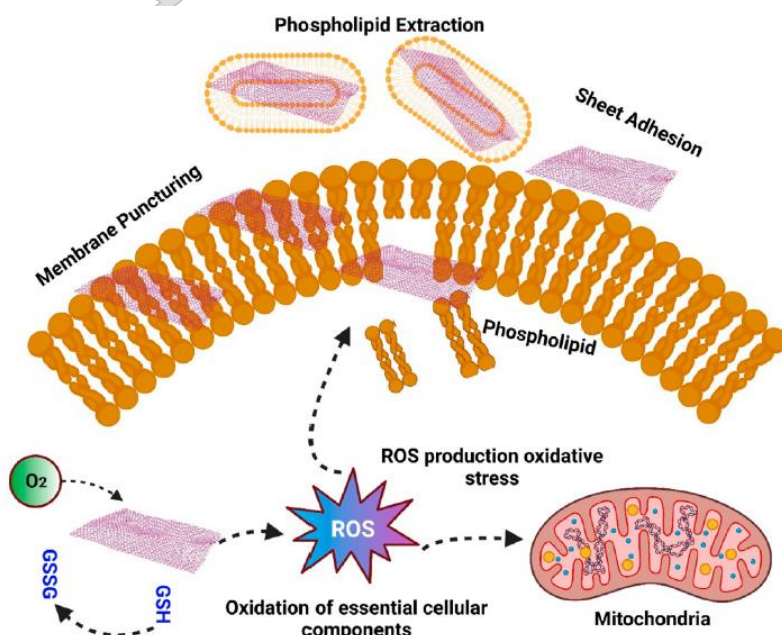
مقاله پذیرفته شده



شکل ۳. مکانیسم عملکرد پوشش‌های ضد خزه بر پایه نانوذرات فلزی و اکسید فلزی بر روی باکتری‌ها (۳۲).

Figure 3. Functional mechanisms of antifouling coatings based on metal and metal oxide nanoparticles on bacteria (32).

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، فعالیت ضد میکروبی نانومواد بر پایه کربن عمدتاً به سایش‌های فیزیکی که از طریق ویژگی‌های مورفولوژیکی نانومواد، مانند نوک‌ها و لبه‌های تیز، به میکروارگانیسم منتقل می‌شود، متکی است (۸۸). جهت‌گیری مناسب نانومواد و سطح تماس آن با میکروب برای آسیب مکانیکی و مرگ سلولی حیاتی است. تخریب میکروبی ناشی از ROS، مسیر رایج ضد عفونی توسط مواد کربنی است. در یک مطالعه خاص، نانوصفات GO به صورت عمودی تراز شده‌اند؛ از این رو، میکروارگانیسم در معرض حداکثر لبه‌های تیز نانوصفات قرار می‌گیرد (۸۹).



مقاله پذیرفته شده

شکل ۴. مکانیسم اثر ضد رسوبی نانومواد بر پایه گرافن بر روی سلول‌های باکتریایی (۳۲).

Figure 4. Antibiofouling mechanism of graphene based nanomaterials on bacterial cells (32).

نانومواد فوتوکاتالیستی فعالیت ضد میکروبی را از طریق واکنش‌های اکسایش-کاهش اعمال می‌کنند. به عنوان مثال، نانوذرات اکسید فلزی حساس به نور مانند TiO_2 و ZnO دارای فعالیت‌های ضدباکتریایی، ضد رسوب و ضد خوردگی عالی هستند. نانوذرات اکسید فلزی برای هر دو ارگانیزم میکرو و ماکروسوب‌کننده سمیت دارند. این نانومواد ROS با عمر کوتاه تولید می‌کنند و اثر موضعی دارند، بنابراین رشد میکروبی را روی زیرلایه‌ها مهار می‌کنند (۹۰). در عمل، استفاده از پوشش‌های خود تمیز شونده بر پایه TiO_2 افزایش یافته است. مکانیسم اثر ضد میکروبی این پوشش‌های خارجی بر پایه TiO_2 عمدتاً به فعال‌سازی آنها توسط نور UV بستگی دارد. توسعه یک نانوکامپوزیت شامل نانوکریستال‌های TiO_2 و Ag به دلیل افزایش سطح نانوذرات TiO_2 در یک ساختار و ایجاد هم‌افزایی میان دو جزء، فعالیت ضد میکروبی کلی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. مکانیسم این افزایش شامل تولید ROS توسط TiO_2 تحت نور، آزادسازی یون‌های نقره سمی برای میکروبه‌ها، و اثر فوتوترمال (تولید گرما)، فعالیت ضد میکروبی کلی را افزایش می‌دهد (۹۱).

تولید گونه‌های اکسیدکننده قوی توسط نانوذرات اکسید فلزی فوتوکاتالیستی می‌تواند رشد میکروارگانیزم‌های رسوب زیستی روی سطح را از بین ببرد یا غیرفعال کند. در مقایسه با زیست‌کش‌های خطرناک، ROS تولید شده توسط نانوذرات اکسید فلزی فوتوکاتالیستی طول عمر بسیار کوتاهی دارند. این ROS تنها در فواصل بسیار نزدیک عمل می‌کند و ایمنی نانوذرات اکسید فلزی را در سازه‌های دریایی بدون تأثیر بر اکوسیستم تضمین می‌کند (۹۲،۹۳).

علاوه بر این، این دسته از نانومواد حساس به نور، موادی ایمن و سازگار با محیط زیست برای کاربردهای دریایی در نظر گرفته می‌شوند. با این حال، نشان داده شده است که به دلیل تفاوت در چگالی بار این نانوذرات اکسید فلزی (TiO_2 و ZnO)، فعالیت متفاوتی در تولید ROS مشاهده می‌شود. به دلیل گاف انرژی بزرگ، این فعالیت فقط به فعال شدن در معرض نور UV محدود می‌شود. از این رو، نیاز به توسعه نانومواد فوتوکاتالیستی قوی‌تری وجود دارد که در حضور نور مرئی فعال می‌شوند. سمیت پوشش نانوسوب به نانومواد مورد بررسی بستگی دارد. در مجموع می‌توان گفت عملکرد ضد زیست نانوپوشش‌های ضد رسوب به ویژگی‌هایی مانند اندازه ذره، عامل دار شدن و خواص سطحی وابسته است؛ به‌طوری‌که نانوذرات کوچک‌تر با نفوذ و تجمع بیشتر در سلول، اثربخشی بالاتری دارند. این پوشش‌ها با تولید ROS از طریق فرآیندهای فوتوکاتالیستی، از رشد و استقرار میکروارگانیزم‌ها جلوگیری می‌کنند (۹۴،۹۵).

۵- چالش‌ها و تنگناها در تجاری‌سازی عوامل نانوسوب

نانومواد با یک یا چند بعد از یک میلیارد متر (10^{-9} متر) برای توسعه محلول‌های ضد رسوب نانوفعال به کار گرفته می‌شوند. چندین رویکرد بالا به پایین و پایین به بالا برای سنتز نانوساختارها در دسترس است. با این حال، هر روش مزایا و معایب خود را دارد. از دیدگاه تجاری‌سازی، تکرارپذیری و ثبات مواد، جنبه‌های کلیدی هستند که باید هنگام توسعه محلول‌های نانوسوب مورد توجه قرار گیرند. تعامل مؤثر بین زیست لایه و نانوذرات تحت تأثیر اندازه و بار روی سطح نانوذرات قرار می‌گیرد. تغییرات در اندازه نانوذرات، توانایی ذاتی آن را برای ورود به سلول‌های میکروبی تغییر می‌دهد و ممکن است فعالیت ضد رسوب را تا حدی محدود کند. برای درک امکان‌سنجی تجاری آنها، آزمایش دقیق نانومواد ضد رسوب مهم است. علاوه بر این، تنها چند مقاله در مورد مهار رسوب در مقیاس ماکرو وجود دارد که در شرایط میدانی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

مقاله پذیرفته شده

به طور خلاصه، اثرات تخریب محلول‌های ضد رسوب بر پایه نانو در شرایط بلاد رنگ و تولید انبوه این پوشش‌های سطحی بر پایه نانوتکنولوژی برای فرآیند تجاری‌سازی بسیار مهم است (۹۸-۹۶).

بیشتر گزارش‌های منتشر شده بر فعالیت ضد میکروبی نانومواد برای بررسی اثربخشی ضد رسوب بدون در نظر گرفتن تعاملات پیچیده بین میکروب‌ها و محیط انجام شده اند. تعاملات بین نانوذرات و ارگانسیم‌های رسوب‌گذار موجود یا ریزمحیط ذاتی ممکن است بر خواص مواد تأثیر بگذارد و بر عملکرد باقیمانده محلول ضد رسوب تأثیر بگذارد. مطالعات تجربی که تعاملات پیچیده نانو-بیو را تقلید یا شبیه‌سازی می‌کنند، برای درک خواص عملکردی محلول‌های ضد رسوب بر پایه نانومواد در ماتریس‌های مختلف مورد نیاز است. علاوه بر این، مکانیسم خوردگی زیستی میکروبیولوژیکی هنوز مشخص نیست. برای ارزیابی مؤثر مهار خوردگی زیستی، آنالیز الکتروشیمیایی محصولات حاصل از فرسایش و ویژگی‌های زیست لایه از عوامل مهمی هستند که باید بررسی شوند. برای استفاده طولانی مدت و ایمنی، سمیت باید در غلظت‌های مرتبط با محیط زیست ارزیابی شود تا تأثیر ناشی از نانومواد در محیط دریایی به طور دقیق اندازه‌گیری شود. این داده‌ها برای رسیدن به غلظت واقعی نانومواد آزاد شده در محیط زیست مطابق با استانداردهای نظارتی برای استفاده بهتر از نانومواد برای مبارزه با خوردگی میکروبی مفید خواهد بود (۱۰۳-۹۹).

۶- نتیجه‌گیری و چشم‌اندازهای آینده

بیشتر روش‌های سنتی که با رسوب زیستی مبارزه می‌کنند، به استفاده از عوامل زیست‌کش برای از بین بردن میکروارگانسیم‌ها متکی هستند. تا به امروز، هیچ رویکرد واحدی، یک محلول زیست‌کش مؤثر که بتواند در برابر طیف وسیعی از ارگانسیم‌های رسوب‌کننده عمل کند، ارائه نداده است. نانومواد فلزی به عنوان عوامل ضد میکروبی عمل می‌کنند و معمولاً برای کنترل رسوب زیستی به زیست‌کش‌های اضافی نیاز ندارند. بررسی حاضر، نقش‌های ضد رسوبی نانوذرات و نانوکامپوزیت‌های مختلف را برجسته می‌کند. نانوذرات وقتی به عنوان پوشش یا در سطوح مواد استفاده می‌شوند، فعالیت ضد میکروبی نشان می‌دهند و از چسبندگی میکروب‌ها به سطح جلوگیری می‌کنند. یک فرمولاسیون مؤثر از محلول‌های ضد رسوب مبتنی بر نانومواد، یا به شکل پوشش یا به عنوان زیست‌کش‌های مستقیم است که هم رسوب‌های میکرو و هم ماکرو را مهار می‌کند. مواد نانوساختار مانند Ag، نانولوله های کربنی، گرافن، TiO_2 و نانوذرات ZnO و نانوکامپوزیت‌های آنها معمولاً برای ساخت نانوفرمولاسیون‌های ضد رسوب استفاده می‌شوند. نانوذرات معدنی به دلیل آزادسازی یون فلزی و تولید ROS، خواص خودترمیمی، ضد میکروبی و ضد خوردگی از خود نشان می‌دهند. نانوذرات اکسید فلزی فعال نوری به دلیل زیست‌سازگاری و سمیت پایین، به طور گسترده در پوشش‌های دریایی فضای باز برای مقابله با میکروارگانسیم‌های مختلف، از جمله ریز جلبک‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. استراتژی‌های ضدخزه که بر اساس پوشش‌های نانوساختار اکسید فلزی توسعه یافته‌اند، در برابر ارگانسیم‌های دریایی بسیار مؤثر هستند. چندین فرمولاسیون نانورنگ نیز توسعه یافته‌اند که از طریق سبدهای پوشش، محافظت ضدانگل در برابر میکروارگانسیم‌های اعماق دریا ایجاد می‌کنند و در نتیجه از رشد میکروارگانسیم‌های بیماری‌زا به دلیل تغییرات در صافی سطح جلوگیری می‌کنند. علاوه بر این، مکانیسم عمل نانوفرمولاسیون‌های ضدخزه زیستی مبتنی بر فناوری نانو و کاربرد آنها در کشتی‌ها، تأسیسات توزیع زیر آب و دستگاه‌های پزشکی در این بررسی مورد بحث قرار گرفته است.

کاربرد نانومواد در توسعه پوشش‌های ضد رسوب برای مهار رشد میکروبی هنوز در مراحل ابتدایی است. علاوه بر این، درک ناکافی از خواص فیزیکوشیمیایی نانومواد و ناتوانی در پیش‌بینی غلظت، تبدیل‌ها و رفتار زیست‌محیطی آن‌ها همچنان به عنوان یک چالش اساسی باقی مانده است. از این رو، برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت تجاری‌سازی فناوری نانو در مقابله با رسوب و خوردگی میکروبی، انجام تحقیقات جامع و نظام‌مند ضروری

مقاله پذیرفته شده

است. هیچ راه حل ضد رسوب استثنایی برای مقابله با تمام مشکلات حل نشده ناشی از رسوب زیستی میکروبی در دسترس نیست. پوشش های کامپوزیتی پلیمری- معدنی با توجه به اثربخشی و هزینه آنها، انتخاب مناسبی در نظر گرفته می شوند. با این حال، هنوز دامنه وسیع تری برای توسعه کامپوزیت های پلیمری جدید با خواص ضد رسوب بهتر و دوام طولانی مدت وجود دارد.

در حالت ایده آل، یک پوشش ضد رسوب باید بادوام، ارزان و سازگار با محیط زیست باشد. کارآمدترین پوشش های ضد رسوب باید قابلیت عملکرد بهتر در هر دو شرایط رسوب استاتیک و دینامیک در زمان واقعی را داشته باشند. علاوه بر این، برای اثرات ضد رسوب هم افزایی، یک رویکرد عامل دارسازی مورد نیاز است. بنابراین، در آینده نزدیک، پوشش های چندمنظوره با فعالیت های هم افزایانه ضد باکتری، ضد چسبندگی و ضد خوردگی، احتمالاً به عنوان مطلوب ترین راهکارهای ضد رسوب شناخته خواهند شد. در هنگام توسعه چنین پوشش های ضد رسوبی باید از اتصال دهنده های عرضی¹ برای بهبود پایداری مکانیکی مخازن و لوله ها استفاده شود. علاوه بر این، درک دقیقی از اثرات زیست محیطی این نوع پوشش ها ضروری است. ترکیبات گیاهی به دلیل خواص ضد میکروبی و عملکرد مهاری زیست لایه به خوبی شناخته شده اند، که می توان از آنها برای توسعه نانوفرمولاسیون های ضد رسوب مؤثر نیز استفاده کرد. با این حال، توسعه پوشش های ضد رسوب مبتنی بر نانوذرات سازگار با محیط زیست به منظور مقابله با رسوب زیستی، هنوز به طور جامع بررسی نشده است. علاوه بر این، طراحی نانومواد هوشمندتر به عنوان حامل های بهتر زیست کش ها برای سیستم های رهایش کنترل شده ضروری است زیرا آنها بار سمیت کلی و خطرات زیست محیطی ناشی از زیست کش های مرسوم را کاهش می دهند.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

1. Schultz MP. Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*. 2007;23(5):331–41. <https://doi.org/10.1080/08927010701461974>
2. Townsin RL. The ship hull fouling penalty. *Biofouling*. 2003;19(S1):9–15. <https://doi.org/10.1080/0892701031000088535>
3. Organization IM. International convention on the control of harmful anti-fouling systems on ships. In: (AFS Convention) and associated Conference resolutions, as amended. 2001.
4. Yebra DM, Kiil S, Dam-Johansen K. Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings. *Prog Org coatings*. 2004;50(2):75–104. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2003.06.001>
5. Lejars M, Margaillan A, Bressy C. Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings. *Chem Rev*. 2012;112(8):4347–90. <https://doi.org/10.1021/cr200350v>
6. Chen R, Li Y, Tang L, Yang H, Lu Z, Wang J, et al. Synthesis of zinc-based acrylate copolymers and their marine antifouling application. *RSC Adv*. 2017;7(63):40020–7. <https://doi.org/10.1039/C7RA04840H>
7. Li Y, Chen R, Feng Y, Liu L, Sun X, Tang L, et al. Antifouling behavior of self-renewal acrylate boron polymers with pyridine-diphenylborane side chains. *New J Chem*. 2018;42(24):19908–16. <http://doi.org/10.1039/C8NJ04298E>
8. Bressy C, Hellio C, Nguyen MN, Tanguy B, Maréchal JP, Margaillan A. Optimized silyl ester diblock methacrylic

¹ Cross-linkers

- copolymers: A new class of binders for chemically active antifouling coatings. *Prog Org Coatings*. 2014;77(3):665–73. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2013.12.004>
9. Zhou X, Xie Q, Ma C, Chen Z, Zhang G. Inhibition of marine biofouling by use of degradable and hydrolyzable silyl acrylate copolymer. *Ind Eng Chem Res*. 2015 Oct 7;54(39):9559–65. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b01819>
10. Lagerström M, Ytreberg E, Wiklund AKE, Granhag L. Antifouling paints leach copper in excess – study of metal release rates and efficacy along a salinity gradient. *Water Res*. 2020;186:116383. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135420309180>
11. Brady Jr RF, Singer IL. Mechanical factors favoring release from fouling release coatings. *Biofouling*. 2000;15(1–3):73–81. <https://doi.org/10.1080/08927010009386299>
12. Wang P, He B, Wang B, Wang L, Yu H, Liu S, et al. Durable self-polishing antifouling coating based on fluorine-containing pyrrolidone amphiphilic copolymer-functionalized nanosilica. *Prog Org Coatings*. 2022;165:106706. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106706>
13. Ralston E, Swain G. Bioinspiration—the solution for biofouling control? *Bioinspir Biomim*. 2009;4(1):15007. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/4/1/015007>
14. Li S, Feng K, Li J, Li Y, Li Z, Yu L, et al. Marine antifouling strategies: Emerging opportunities for seawater resource utilization. *Chem Eng J*. 2024;486:149859. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149859>
15. Telegdi J, Trif L, Románszki L. 5 - Smart anti-biofouling composite coatings for naval applications. In: Montemor MFBTSCC and M, editor. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*. Woodhead Publishing; 2016. p. 123–55. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-283-9.00005-1>
16. Wei C, Zhang X, Deng Y, Wu B, Wu J. Antifouling behaviour of pH responsive amphiphilic smart coatings on the basis of charge conversion in the marine environments. *Prog Org Coatings*. 2026;210:109701. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109701>
17. Sun H, He X, Yuan C, Bai X. Research progress and performance enhancement strategies of marine antifouling hydrogel coatings. *Prog Org Coatings*. 2025;206:109365. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109365>
18. Qiu Q, Gu Y, Ren Y, Ding H, Hu C, Wu D, et al. Research progress on eco-friendly natural antifouling agents and their antifouling mechanisms. *Chem Eng J*. 2024;495:153638.
19. Krishnan S, Thirunavukarasu A, Jha NK, Gahtori R, Roy AS, Dholpuria S, et al. Nanotechnology-based therapeutic formulations in the battle against animal coronaviruses: An update. *J Nanoparticle Res*. 2021;23(10):229. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.153638>
20. Nile SH, Baskar V, Selvaraj D, Nile A, Xiao J, Kai G. Nanotechnologies in food science: applications, recent trends, and future perspectives. *Nano-micro Lett*. 2020;12(1):45. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0383-9>
21. Yebra DM, Kiil S, Weinell CE, Dam-Johansen K. Effects of marine microbial biofilms on the biocide release rate from antifouling paints—A model-based analysis. *Prog Org Coatings*. 2006;57(1):56–66. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.06.003>
22. Lakhotia SR, Mukhopadhyay M, Kumari P. Surface-Modified Nanocomposite Membranes. *Sep Purif Rev*. 2018 Oct 2;47(4):288–305. <https://doi.org/10.1080/15422119.2017.1386681>
23. Dasgupta A, Rajukumar LP, Rotella C, Lei Y, Terrones M. Covalent three-dimensional networks of graphene and carbon nanotubes: synthesis and environmental applications. *Nano Today*. 2017;12:116–35. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2016.12.011>
24. Bystrov VS, Bdiin IK, Silibin M V, Karpinsky D V, Kopyl SA, Goncalves G, et al. Graphene/graphene oxide and polyvinylidene fluoride polymer ferroelectric composites for multifunctional applications. *Ferroelectrics*. 2017 Mar 12;509(1):124–42. <https://doi.org/10.1080/00150193.2017.1295745>
25. Ruffolo SA, Macchia A, La Russa MF, Mazza L, Urzi C, De Leo F, et al. Marine Antifouling for Underwater Archaeological Sites: TiO₂ and Ag-Doped TiO₂. *Int J Photoenergy*. 2013 Jan 1;2013(1):251647. <https://doi.org/10.1155/2013/251647>
26. Al-Naamani L, Dobretsov S, Dutta J, Burgess JG. Chitosan-zinc oxide nanocomposite coatings for the prevention of marine biofouling. *Chemosphere*. 2017;168:408–17. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.033>
27. Li X, Yu Z, Wang J, Zhang J, Zhao W, Wang L, et al. Nanomaterials Reinforced Antifouling Coatings: From Strategic

- Design to Potential Applications. *Adv Mater.* 2026 Jan;38(5):e14795. doi.org/10.1002/adma.202514795
28. Thakur A, Ganesan R, Ray Dutta J. Nanomaterials against antimicrobial resistance and beyond: toward mitigating bacterial resuscitation. *Total Environ Microbiol.* 2026;2(1):100052. https://doi.org/10.1016/j.temcr.2025.100052
29. Maan AMC, Hofman AH, de Vos WM, Kamperman M. Recent Developments and Practical Feasibility of Polymer-Based Antifouling Coatings. *Adv Funct Mater.* 2020;30(32):2000936. https://doi.org/10.1002/adfm.202000936
30. Idumah CI, Obele CM, Emmanuel EO, Hassan A. Recently emerging nanotechnological advancements in polymer nanocomposite coatings for anti-corrosion, anti-fouling and self-healing. *Surfaces and Interfaces.* 2020;21:100734. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100734
31. Kumar S, Ye F, Dobretsov S, Dutta J. Nanocoating is a new way for biofouling prevention. *Front Nanotechnol.* 2021;3:771098. https://doi.org/10.3389/fnano.2021.771098
32. Sinha S, Kumar R, Anand J, Gupta R, Gupta A, Pant K, et al. Nanotechnology-based solutions for antibiofouling applications: an overview. *ACS Appl Nano Mater.* 2023;6(14):12828–48. https://doi.org/10.1021/acsanm.3c01539
33. Song C, Yang CM, Sun XF, Xia PF, Qin J, Guo BB, et al. Influences of graphene oxide on biofilm formation of gram-negative and gram-positive bacteria. *Environ Sci Pollut Res.* 2018;25(3):2853–60. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0616-8
34. Choudhary P, Das SK. Bio-reduced graphene oxide as a nanoscale antimicrobial coating for medical devices. *Acs Omega.* 2019;4(1):387–97. https://doi.org/10.1021/acsomega.8b02787
35. Staneva AD, Dimitrov DK, Gospodinova DN, Vladkova TG. Antibiofouling Activity of Graphene Materials and Graphene-Based Antimicrobial Coatings. Vol. 9, *Microorganisms.* 2021. p. 1839. https://doi.org/10.3390/microorganisms9091839
36. Syama S, Mohanan P V. Comprehensive Application of Graphene: Emphasis on Biomedical Concerns. *Nano-Micro Lett.* 2019;11(1):6. https://doi.org/10.1007/s40820-019-0237-5
37. Di Giulio M, Zappacosta R, Di Lodovico S, Di Campli E, Siani G, Fontana A, et al. Antimicrobial and antibiofilm efficacy of graphene oxide against chronic wound microorganisms. *Antimicrob Agents Chemother.* 2018;62(7):10–1128. https://doi.org/10.1128/AAC.00547-18
38. Cheng W, Lu X, Kaneda M, Zhang W, Bernstein R, Ma J, et al. Graphene oxide-functionalized membranes: the importance of nanosheet surface exposure for biofouling resistance. *Environ Sci Technol.* 2019;54(1):517–26.
39. Wu J, Li Z, Li Y, Pettitt A, Zhou F. Photothermal effects of reduced graphene oxide on pancreatic cancer. *Technol Cancer Res Treat.* 2018;17:1533034618768637. https://doi.org/10.1177/1533034618768637
40. Wei Y, Zhang Y, Gao X, Ma Z, Wang X, Gao C. Multilayered graphene oxide membranes for water treatment: A review. *Carbon N Y.* 2018;139:964–81. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.07.040
41. Aldred N, Clare AS. The adhesive strategies of cyprids and development of barnacle-resistant marine coatings. *Biofouling.* 2008 Oct 21;24(5):351–63. https://doi.org/10.1080/08927010802256117
42. Ardehana BA, Jani UB, Patel AM, Joshi AY. Analyzing the Dynamic Characteristics of Double-Walled Carbon Nanotube Reinforced Polymer Nanocomposites BT - *Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology.* In: Hussain CM, Thomas S, editors. Cham: Springer International Publishing; 2021. p. 429–63. https://doi.org/10.1007/978-3-030-40513-7_54
43. Zhao DL, Chung TS. Applications of carbon quantum dots (CQDs) in membrane technologies: A review. *Water Res.* 2018;147:43–9. https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.040
44. Kim YK, Sharker SM, In I, Park SY. Surface coated fluorescent carbon nanoparticles/TiO₂ as visible-light sensitive photocatalytic complexes for antifouling activity. *Carbon N Y.* 2016;103:412–20. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.03.036
45. Guo Y, Fan Y, Li G, Wang Z, Shi X, Shen M. "Cluster bomb" based on redox-responsive carbon dot nanoclusters coated with cell membranes for enhanced tumor theranostics. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2021;13(47):55815–26. https://doi.org/10.1021/acsami.1c15282
46. Liu Y, Zhang L, Cai H, Qu X, Chang J, Waterhouse GIN, et al. Biomass-derived carbon dots with pharmacological activity for biomedicine: Recent advances and future perspectives. *Sci Bull.* 2024;69(19):3127–49. https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.08.011

47. Zhu C, Li H, Wang H, Yao B, Huang H, Liu Y, et al. Negatively charged carbon nanodots with bacteria resistance ability for high-performance antibiofilm formation and anticorrosion coating design. *Small*. 2019;15(23):1900007. <https://doi.org/10.1002/sml.201900007>
48. Yang Q, Mi B. Nanomaterials for Membrane Fouling Control: Accomplishments and Challenges. *Adv Chronic Kidney Dis*. 2013;20(6):536–55. <https://doi.org/10.1053/j.ackd.2013.08.005>
49. Bruna T, Maldonado-Bravo F, Jara P, Caro N. Silver nanoparticles and their antibacterial applications. *Int J Mol Sci*. 2021;22(13):7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>
50. Haider MS, Shao GN, Imran SM, Park SS, Abbas N, Tahir MS, et al. Aminated polyethersulfone-silver nanoparticles (AgNPs-APES) composite membranes with controlled silver ion release for antibacterial and water treatment applications. *Mater Sci Eng C*. 2016;62:732–45. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.02.025>
51. Islam MJ, Khatun N, Bhuiyan RH, Sultana S, Shaikh MAA, Bitu MNA, et al. Psidium guajava leaf extract mediated green synthesis of silver nanoparticles and its application in antibacterial coatings. *RSC Adv*. 2023;13(28):19164–72. <https://doi.org/10.1039/D3RA03381C>
52. Liu Y, Li M, Zhao X, Zhang R, Zhang Y, Xing Y. Preparation of nano-silver particles and its application in antibacterial coatings. *New Chem Mater*. 2019;47(2):37–41.
53. Lischer S, Kömer E, Balazs DJ, Shen D, Wick P, Grieder K, et al. Antibacterial burst-release from minimal Ag-containing plasma polymer coatings. *J R Soc Interface*. 2011;8(60):1019–30. <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0596>
54. Naskar A, Khan H, Sarkar R, Kumar S, Halder D, Jana S. Anti-biofilm activity and food packaging application of room temperature solution process based polyethylene glycol capped Ag-ZnO-graphene nanocomposite. *Mater Sci Eng C*. 2018;91:743–53. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.06.009>
55. Garcia C V, Shin GH, Kim JT. Metal oxide-based nanocomposites in food packaging: Applications, migration, and regulations. *Trends Food Sci Technol*. 2018;82:21–31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.021>
56. Dobretsov S, Sathe P, Bora T, Barry M, Myint MTZ, Abri M Al. Toxicity of different zinc oxide nanomaterials at 3 trophic levels: implications for development of low-toxicity antifouling agents. *Environ Toxicol Chem*. 2020;39(7):1343–54. <https://doi.org/10.1002/etc.4720>
57. Hoshyar N, Gray S, Han H, Bao G. The effect of nanoparticle size on in vivo pharmacokinetics and cellular interaction. *Nanomedicine*. 2016;11(6):673–92. <https://doi.org/10.2217/nmm.16.5>
58. Youssef Z, Colombeau L, Yesmurzayeva N, Baros F, Vanderesse R, Hamieh T, et al. Dye-sensitized nanoparticles for heterogeneous photocatalysis: Cases studies with TiO₂, ZnO, fullerene and graphene for water purification. *Dye Pigment*. 2018;159:49–71. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2018.06.002>
59. Mooss VA, Hamza F, Zinjarde SS, Athawale AA. Polyurethane films modified with polyaniline-zinc oxide nanocomposites for biofouling mitigation. *Chem Eng J*. 2019;359:1400–10. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.038>
60. Deng Y, Song GL, Zheng D, Zhang Y. Fabrication and synergistic antibacterial and antifouling effect of an organic/inorganic hybrid coating embedded with nanocomposite Ag@ TA-SiO₂ particles. *Colloids Surfaces A Physicochem Eng Asp*. 2021;613:126085. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.126085>
61. Valenzuela L, Iglesias A, Faraldos M, Bahamonde A, Rosal R. Antimicrobial surfaces with self-cleaning properties functionalized by photocatalytic ZnO electrosprayed coatings. *J Hazard Mater*. 2019;369:665–73. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.073>
62. Bojarska M, Nowak B, Skowroński J, Piątkiewicz W, Gradoń L. Growth of ZnO nanowires on polypropylene membrane surface—Characterization and reactivity. *Appl Surf Sci*. 2017;391:457–67. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.130>
63. Al-Hinai MH, Sathe P, Al-Abri MZ, Dobretsov S, Al-Hinai AT, Dutta J. Antimicrobial activity enhancement of poly (ether sulfone) membranes by in situ growth of ZnO nanorods. *ACS omega*. 2017;2(7):3157–67. <https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00314>
64. Rasmi KR, Vanithakumari SC, George RP, Kamachi Mudali U. Active nano metal oxide coating for bio-fouling resistance. *Trans Indian Inst Met*. 2018;71(6):1323–9. <https://doi.org/10.1007/s12666-017-1264-x>
65. Jin T, He Y. Antibacterial activities of magnesium oxide (MgO) nanoparticles against foodborne pathogens. *J Nanoparticle Res [Internet]*. 2011;13(12):6877–85. <https://doi.org/10.1007/s11051-011-0595-5>

66. Dong L xi, Yang H wei, Liu S ting, Wang X mao, Xie YF. Fabrication and anti-biofouling properties of alumina and zeolite nanoparticle embedded ultrafiltration membranes. *Desalination*. 2015;365:70–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.02.023>
67. Selim MS, El-Safty SA, Fathallah NA, Shenashen MA. Silicone/graphene oxide sheet-alumina nanorod ternary composite for superhydrophobic antifouling coating. *Prog Org Coatings*. 2018;121:160–72. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.04.021>
68. Alpaslan E, Geilich BM, Yazici H, Webster TJ. pH-Controlled Cerium Oxide Nanoparticle Inhibition of Both Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria Growth. *Sci Rep*. 2017;7(1):45859. <https://doi.org/10.1038/srep45859>
69. Balakrishnan A, Jena G, Pongachira George R, Philip J. Polydimethylsiloxane–graphene oxide nanocomposite coatings with improved anti-corrosion and anti-biofouling properties. *Environ Sci Pollut Res*. 2021;28(6):7404–22. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11068-5>
70. Roy CJ, Leprince L, De Boulard A, Landoulsi J, Callegari V, Jonas AM, et al. Electrosynthesis of pyrrole 3-carboxylic acid copolymer films and nanotubes with tunable degree of functionalization for biomedical applications. *Electrochim Acta*. 2011;56(10):3641–8. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.10.076>
71. Zhao S, Wang Z, Wei X, Tian X, Wang J, Yang S, et al. Comparison study of the effect of PVP and PANI nanofibers additives on membrane formation mechanism, structure and performance. *J Memb Sci*. 2011;385:110–22. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.09.029>
72. Chen X, Huang Y, Yang G, Li J, Wang T, H. Schulz O, et al. Polydopamine integrated nanomaterials and their biomedical applications. *Curr Pharm Des*. 2015;21(29):4262–75. <https://doi.org/10.2174/1381612821666150901103418>
73. Ranneh A, Takemoto H, Sakuma S, Awaad A, Nomoto T, Mochida Y, et al. An ethylenediamine-based switch to render the polyzwitterion cationic at tumorous pH for effective tumor accumulation of coated nanomaterials. *Angew Chemie*. 2018;130(18):5151–5. <https://doi.org/10.1002/ange.201801641>
74. Zhang C, Yuan J, Lu J, Hou Y, Xiong W, Lu H. From neutral to zwitterionic poly(α -amino acid) nonfouling surfaces: Effects of helical conformation and anchoring orientation. *Biomaterials*. 2018;178:728–37. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2018.01.052>
75. Wu A, Gao Y, Zheng L. Zwitterionic amphiphiles: their aggregation behavior and applications. *Green Chem*. 2019;21(16):4290–312. <http://doi.org/10.1039/C9GC01808E>
76. Agrawal A, Sharma A, Awasthi KK, Awasthi A. Metal oxides nanocomposite membrane for biofouling mitigation in wastewater treatment. *Mater Today Chem*. 2021;21:100532. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2021.100532>
77. Mahmoudi E, Ng LY, Ang WL, Chung YT, Rohani R, Mohammad AW. Enhancing Morphology and Separation Performance of Polyamide 6,6 Membranes By Minimal Incorporation of Silver Decorated Graphene Oxide Nanoparticles. *Sci Rep*. 2019;9(1):1216. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38060-x>
78. Pandey RP, Rasheed PA, Gomez T, Azam RS, Mahmoud KA. A fouling-resistant mixed-matrix nanofiltration membrane based on covalently cross-linked Ti3C2TX (MXene)/cellulose acetate. *J Memb Sci*. 2020;607:118139. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118139>
79. Xu Y, Wang X, Ding C, Luo X. Ratiometric Antifouling Electrochemical Biosensors Based on Multifunctional Peptides and MXene Loaded with Au Nanoparticles and Methylene Blue. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2021 May 5;13(17):20388–96. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c04933>
80. Selim MS, Elmarakbi A, Azzam AM, Shenashen MA, EL-Saeed AM, El-Safty SA. Eco-friendly design of superhydrophobic nano-magnetite/silicone composites for marine foul-release paints. *Prog Org Coatings*. 2018;116:21–34. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.12.008>
81. Gholami F, Zinatizadeh AA, Zinadini S, Rittmann BE, Torres CI. Enhanced antifouling and flux performances of a composite membrane via incorporating TiO2 functionalized with hydrophilic groups of L-cysteine for nanofiltration. *Polym Adv Technol*. 2022 May 1;33(5):1544–60. <https://doi.org/10.1002/pat.5620>
82. Wang Z, Zou Y, Li Y, Cheng Y. Metal-Containing Polydopamine Nanomaterials: Catalysis, Energy, and Theranostics. *Small*. 2020 May 1;16(18):1907042. <https://doi.org/10.1002/sml.201907042>
83. Liang Q, Jiang B, Yang N, Zhang L, Sun Y, Zhang L. Superhydrophilic Modification of Polyvinylidene Fluoride

- Membrane via a Highly Compatible Covalent Organic Framework–COOH/Dopamine-Integrated Hierarchical Assembly Strategy for Oil–Water Separation. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2022 Oct 12;14(40):45880–92. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c13402>
84. Sharmin S, Rahaman MM, Sarkar C, Atolani O, Islam MT, Adeyemi OS. Nanoparticles as antimicrobial and antiviral agents: A literature-based perspective study. *Heliyon*. 2021;7(3):e06456. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06456>
85. Kyung JW, Cheong KH, Woo KK, Sook S, Hyun KS, Ho PY. Antibacterial Activity and Mechanism of Action of the Silver Ion in *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. *Appl Environ Microbiol*. 2008 Apr 1;74(7):2171–8. <https://doi.org/10.1128/AEM.02001-07>
86. Leung YH, Ng AMC, Xu X, Shen Z, Gethings LA, Wong MT, et al. Mechanisms of Antibacterial Activity of MgO: Non-ROS Mediated Toxicity of MgO Nanoparticles Towards *Escherichia coli*. *Small*. 2014 Mar 1;10(6):1171–83. <https://doi.org/10.1002/sml.201302434>
87. Munafò P, Goffredo GB, Quagliarini E. TiO₂-based nanocoatings for preserving architectural stone surfaces: An overview. *Constr Build Mater*. 2015;84:201–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.083>
88. Perreault F, De Faria AF, Elimelech M. Environmental applications of graphene-based nanomaterials. *Chem Soc Rev*. 2015;44(16):5861–96. <https://doi.org/10.1039/C5CS00021A>
89. Lu X, Feng X, Zhang X, Chukwu MN, Osuji CO, Elimelech M. Fabrication of a Desalination Membrane with Enhanced Microbial Resistance through Vertical Alignment of Graphene Oxide. *Environ Sci Technol Lett*. 2018 Oct 9;5(10):614–20. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00364>
90. Farré M, Gajda-Schranz K, Kantiani L, Barceló D. Ecotoxicity and analysis of nanomaterials in the aquatic environment. *Anal Bioanal Chem*. 2009;393(1):81–95. <https://doi.org/10.1007/s00216-008-2458-1>
91. Dou H, Wang J, Zhao Y, Liu J, Li Y. Preparation of Ag-Decorated TiO₂ Composite Materials and Study on Photocatalytic Performance. *Nanomater* (Basel, Switzerland). 2025 Sep;15(18). <https://doi.org/10.3390/nano15181383>
92. Zhang X, Zhang S, Mathivanan K, Zhang R, Zhang J, Jiang Q, et al. Research progress and prospects in antifouling performance of photocatalytic sterilization: A review. *J Mater Sci Technol*. 2025;208:189–201. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.04.052>
93. Jia B, Xu T, Zhang Q, Geng X, Xu J, Li Y, et al. Synergistic photobiocatalytic antifouling strategy based on a Bi₅O₇/CeO₂ heterojunction for sustainable marine coating. *Chem Eng J*. 2026;535:175410. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2026.175410>
94. da Silva BL, Caetano BL, Chiari-Andréo BG, Pietro RCLR, Chiavacci LA. Increased antibacterial activity of ZnO nanoparticles: Influence of size and surface modification. *Colloids Surfaces B Biointerfaces*. 2019;177:440–7. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.02.013>
95. Jonidi Jafari A, Moslemzadeh M. The effect of TiO₂ nanoparticles on bacterial growth: the effect of particle size and their structure – a systematic review. *Int J Environ Health Res*. 2024 Feb 1;34(2):697–707. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2163990>
96. Maréchal JP, Hellio C. Challenges for the Development of New Non-Toxic Antifouling Solutions. Vol. 10, *International Journal of Molecular Sciences*. 2009. p. 4623–37. <https://doi.org/10.3390/ijms10114623>
97. Knowles BR, Yang D, Wagner P, Maclaughlin S, Higgins MJ, Molino PJ. Zwitterion Functionalized Silica Nanoparticle Coatings: The Effect of Particle Size on Protein, Bacteria, and Fungal Spore Adhesion. *Langmuir*. 2019 Feb;35(5):1335–45. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01550>
98. Vourna P, Falara PP, Papadopoulos ND. In Situ and Laboratory Investigation of the Anti-Corrosion and Anti-Fouling Efficacy of an Innovative Biocide-Free Coating for Naval Steels. Vol. 15, *Metals*. 2025. p. 1000. <https://doi.org/10.3390/met15091000>
99. He X, Deng H, Hwang H min. The current application of nanotechnology in food and agriculture. *J Food Drug Anal*. 2019;27(1):1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2018.12.002>
100. Athukoralalage SSA, Amiralian N. Dual-functional surface coatings integrating antimicrobial and antibiofouling mechanisms: from material design to application landscapes. *Mater Horizons*. 2025;12(23):9966–93.

مقاله پذیرفته شده

<http://doi.org/10.1039/D5MH01132A>

101. Ale A, Andrade VS, Gutierrez MF, Ayech A, Monserrat JM, Desimone MF, et al. Metal-based nanomaterials in aquatic environments: What do we know so far about their ecotoxicity? *Aquat Toxicol.* 2024;275:107069. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2024.107069>
102. Kalajahi ST, Misra A, Koerd A. Nanotechnology to mitigate microbiologically influenced corrosion (MIC). *Front Nanotechnol.* 2024;Volume 6-2024. <https://doi.org/10.3389/fnano.2024.1340352>
103. Li J, Wang P, Zhang D, Liao X. Unraveling the anti-biofouling mechanisms of slippery liquid-infused porous surface from molecular interaction perspective. *J Colloid Interface Sci.* 2025;686:785–94. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2025.02.001>

مقاله پذیرفته شده