پیشرفت‌های اخیر در پوشش‌های آبگریز و خودتمیزشونده چندمنظوره بر پایه مواد نیمه‌رسانا: چالش‌ها و فرصت‌ها

فاطمه عبادی [۱]، امید میرزائی [۲,*]، حسن عبدوس [۱]، ساناز علمداری [۱]

[۱] دانشکده نانوفناوری، پردیس علوم و فناوری های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

[۲] دانشکده مهندسی مواد و متالوژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، تحقیقات در حوزه پوشش‌های آبگریز، هوشمند با خواص چندگانه، به عنوان راه حلی نوآورانه و مناسب برای مقابله با مشکلات محیط زیستی و صنایع در مناطقی با شرایط آب و هوایی نامساعد به شدت افزایش یافته است. علی‌رغم دهه‌ها تلاش تحقیقاتی که قابلیت‌های پوشش‌های خودتمیزشونده و ضدباکتری را نشان می‌دهد، به دلیل عدم استحکام مکانیکی توپوگرافی در مقیاس میکرو نانو و پایداری مولکول‌های کم انرژی سطحی، روش پوشش‌دهی گران قیمت، سمیت بالای نانو مواد به کار برده شده، به بازار منتقل نشده‌اند. امروزه نانوفناوری با سرعت هرچه تمام‌تر درحال توسعه می‌باشد. به‌طوری که امروزه بیشتر تحقیقات به سمت طراحی و ساخت سازه‌ها و بناهای دوست‌دار محیط زیست، تمیزتر و سبک‌تر و با کارایی بالاتر معطوف شده است. از طرف دیگر پوشش‌های هوشمند، به پوشش‌هایی گفته می‌شود، که در برابر تغییرات محیط زیست مانند تابش نور، ترشوندگی، دما، فشار و تغییر pHخودبه‌خود پاسخی را فراهم می‌کنند. هدف از طراحی این گونه از پوشش‌ها، برای عملکرد بالاتر، افزایش طول عمر محصول و کاهش قابل توجه هزینه تعمیر و نگهداری است. در این مقاله ما به مطالعات اخیر در حوزه پوشش های خودتمیزشونده و آبگریز بر پایه مواد نیمه رسانا و مقایسه بین آن ها اشاره کردیم.

واژگان کلیدی: پوشش‌های آبگریز،پوشش های ضدباکتریایی، سیلیکون دی اکسید، اکسیدروی، اصلاح سطح، لایه نازک

ایمیل نویسنده مسئول: o_mirzaee@semnan.ac.ir

۱ـ مقدمه

يكي از مهمترين ضـــعف‌هـاي پوشـــش‌هـاي فوق آبگريز، پايداري شـــيميايي و مكانيكي ضـــعيف اين پوشش‌ها مي‌باشد كه استفاده صنعتي از اين پوشش‌ها را با محدوديت جدي مواجه كرده اســـت. بنابراين، باتوجه به اهميت پايداری شـــيميايي و مكانيكی پوشـــش‌هـای فوق آبگريز تحقيقات در مورد بهبود پايداري شـــيميايي و مكانيكی اين پوشـــش‌ها از مهمترين چالش‌ها مي‌باشد . برای كاربردهای عملی، ســـطح خودتميزشـــونده و ضـــدباكتری بايد از نظر حرارتی، شـــيميايی و مكانيكی پايدار باشـــد. بيشـــتر سطوح خودتميزشونده با واسطه ابرآبگريز از نظر مكانيكی بادوام نيســـتند. علاوه بر اين، آنها از نظر شـــيميايی در محيط بســـيار اســـيدی و بازی ناپايدار هستند. [۱] اين تحقيقات به طور چشـــمگيری به حل مســـائل مختلف مرتبط با آلودگی محيط زيست، مصرف انرژی بالا، و بهبود عملكرد ، افزايش طول عمر محصول و كاهش قابل توجه هزينه تعمير و نگهداری محصـــولات صـــنعتی كـــمـــك كـــرده‌انـــد و دوام ســـــطـــح را افـــزايـــش دهند.[۲،۳].جامدات از مواد توده‌ای تشـــكيل شـــده‌اند كه توسط يک سطح پوشانده شده است. سطحی كه مواد حجيم را محدود می‌كند، فاز ســـطح نـــاميده می‌شـــود.فاز ســـطحی يک جامد با محيط اطراف در تعامل اســـت. تخريب محيطی فاز ســـطحی، در طول زمان می‌تواند ناشی از سايش، خوردگی، خستگی و خزش، مه، باكتری ؛ نور خورشـــيد باشـــد. مهندســـی ســـطح شـــامل تغيير خواص فاز ســـطحی به منظور كاهش تخريب در طول زمان است.

تاریخ دریافت : ۱۴۰۳/۱۰/۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵

این امر با مقاوم‌سازی سطح در برابر محیطی که در آن مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام می‌شود. استفاده از مهندسی سطح منجر به بهبود طول عمر و بهبود کارایی می‌شود. [۴]

پوشش خود تمیز شونده یکی از ساده ترین و امیدوارکننده‌ترین روش‌ها برای تمیز کردن سطوح می‌باشد. در چند دهه اخیر، آلودگی‌های داخلی و خارجی به دلیل رشد تصاعدی در صنعتی شدن و شهرنشینی در سراسر جهان به نگرانی های قابل توجهی تبدیل شده اند. فناوری خود تمیز شوندگی در محصولات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، به عنوان مثال، آینه ماشین، پنل های خورشیدی، شیشه های پنجره، منسوجات، کاشی، سرامیک، رنگ، مواد سیمانی و غیره. اما محبوب ترین کاربرد آن برای منسوجاتی است که خاصیت خود تمیز شوندگی دارند.[۵،۶] خود تمیز شوندگی را می توان به سه دسته تقسیم کرد که عبارتند از خود تمیز شوندگی فیزیکی، خودتمیز شونده شیمیایی و خودتمیز شونده بیولوژیکی. استفاده از خودتمیز شونده‌ها منجر به صرفه‌جویی در هزینه و زمان نگهداری و دوام می‌شود. [۷]

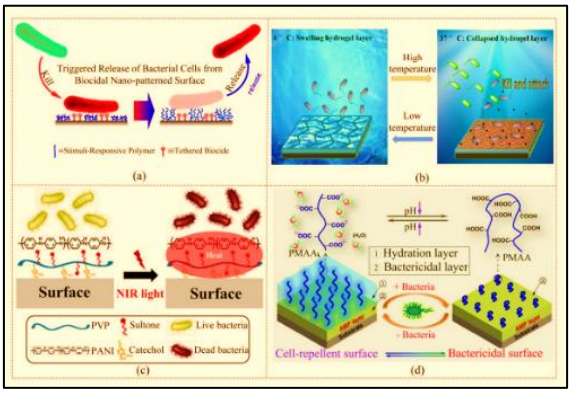
عفونت‌های باکتریایی هنوز به‌عنوان یکی از مهمترین عوامل مرگ و میر انسانی شناخته می‌شوند. رشد روز افزون نگرانی‌ها در مورد به وجود آمدن باکتری‌های مقاوم در برابر درمان‌های دارویی سبب گسترش پوشش‌های ضد باکتریایی شده است. به همین دلیل و با توجه به خواص منحصر به فرد نانومواد ساخت نانومواد با خواص ضد باکتریایی مطلوب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. آلودگی یک سطح شامل چسبیدن، ماندگاری و تکثیر باکتری‌ها روی آن است. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی پوشش، مانند زبری سطح، ترشوندگی و رسانایی، تأثیر زیادی بر رفتار باکتری دارند.[۸] در صنعت پزشکی به ویژه دندان پزشکی استفاده از سطوح و پوشش های ضدباکتریایی ضروری است. به طور مثال، با توجه به سطح وسیعی که دستگاه‌های ارتودنسی معمولا دارند و می‌توانند در طول درمان در تماس مستقیم با باکتری‌ها باشند، تغییراتی در قالب پوشش روی سطح دستگاه‌های ارتودنسی می‌تواند رویکردی موثر و عملی برای کاهش تکثیر باکتری‌ها و جلوگیری از موارد مرتبط باشد. [۹] چسبندگی باکتری با خواص آب دوست/ آب گریز سطح، انرژی سطح و هدایت الکتریکی مواد ارتباط نزدیکی دارد. بنابراین، تنظیم ترشوندگی سطح و سایر ویژگی های فیزیکی و شیمیایی مواد برای جلوگیری از چسبندگی باکتری‌ها یکی از استراتژی‌های مهم برای توسعه پوشش ضد باکتری است. [۱۰]

پوشش ضد میکروبی نوع تماسی، اولین نوع پوشش ضد میکروبی مورد مطالعه است. این ماده با تثبیت مولکول‌های آلی با خواص ضد میکروبی مانند: نمک های آمونیوم چهارتایی(QASs[1])، پپتیدهای ضد میکروبی(AMPs[2])، کیتوسان و غیره به طور مستقیم بر روی سطح ماده کار می‌کند. هنگامی که باکتری‌ها با مواد تماس پیدا می‌کنند، مولکول‌های ضد باکتری سطحی از یک مکانیسم شیمیایی برای کشتن باکتری‌ها استفاده می‌کنند. پوشش های ضد چسبندگی و باکتریواستاتیک عموما از پلیمرهای فوق آبدوست، هیدروژل ها یا سطوح عملکردی فوق آبگریز ساخته می شوند..[۱۱،۱۲] پوشش‌های آنتی باکتریال ضد چسبندگی پوشش‌های عملکردی هستند که بر روی سطح موادی ساخته می‌شوند که به طور همزمان در برابر چسبندگی بیومولکول‌ها مانند باکتری‌ها، قارچ‌ها و پروتئین‌ها مقاوم هستند. پوشش آنتی باکتریال مستقیماً از طریق اصلاح سطح مواد، خواص فیزیکوشیمیایی سطح مواد (مانند زبری، آبگریزی، بار و غیره)را تغییر می‌دهد تا مانع چسبندگی میکروب‌ها شود.[۱۳] پوشش‌های ضد میکروبی هوشمند به فرایندهای ضدمیکروبی قابل کنترل دست می‌یابند، "اینرسی بیولوژیکی" را هنگامی که تماس باکتریایی وجود ندارد حفظ می‌کنند، می‌توانند عملکرد باکتریایی را "فعال" کنند و عوامل ضدمیکروبی را در مراحل اولیه چسبندگی باکتریایی آزاد کنند، و می‌توانند با تنظیم برهم کنش‌های بین مولکولی و پاسخ دهی هوشمند باکتریایی به آزادسازی کنترل شده عوامل ضد میکروبی دست یابند. علاوه بر این، پوشش‌های ضد میکروبی هوشمند می‌توانند به سرعت باکتری‌های مرده و بقایای روی سطح را پس از کشتن باکتری‌ها از طریق پاسخ دهی هوشمند مولکول‌های پوشش (دما، pH، نور، مغناطیس و غیره) حذف کنند تا

[1] quaternary ammonium salts

[2] antimicrobial peptides

عملکرد پوشش ضد باکتریایی در طولانی مدت حفظ شود.[۱۴]



شکل۱) مکانیسم های باکتری کشی پوشش های ضد باکتری پاسخ هوشمند: (a) بر اساس پاسخ دما; (b) تغییر دما به عنوان سوئیچ برای مواد ضد باکتری ؛ (c) بر اساس پاسخ نور NIR ؛ (d) بر اساس پاسخ pH[15]

۲-مقایسه انواع پوشش‌های ضدباکتری بر اساس مکانیسم

پوشش‌های ضد باکتری با توجه به مکانیسم‌های عمل ضدباکتریایی مختلف، عمدتاً به چهار دسته تقسیم می‌شوند. مکانیسم های عمل، روش های ساخت و معایب آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.[۱۶]

جدول ۱) مکانیسم های عمل، روش های ساخت و معایب و مزایای پوشش های ضد میکروبی[۱۶]

نمونه	مکانیسم	ساخت و ساز	مزایا و معایب
پوشش آنتی باکتریال تماسی	کشتن مستقیم باکتری ها یا تداخل در تولید مثل طبیعی آنها با از بین بردن یکپارچگی غشای سلولی	پیوند کووالانسی با واکنش شیمیایی، رسوب سطحی	آنتی باکتریال با راندمان بالا؛ برخی از اجزا ممکن است سمی باشند.
پوشش باکتریو استاتیک ضد چسبندگی	مهار باکتری ها با افزایش موانع فیزیکی و انرژی از چسبیدن باکتری ها به سطوح مواد جلوگیری می کند	پلیمریزاسیون پیوند آغاز شده از سطح، اتصال عرضی	آنتی باکتریال با راندمان کم؛ اکثر اجزا غیر سمی هستند.
پوشش ضد چسبندگی ضد باکتری	ضد چسبندگی، هم کشنده و هم مهار باکتری	پلیمریزاسیون- پیوند آغاز شده از سطح، اتصال عرضی، جاسازی	آنتی باکتریال با راندمان بالا؛ برخی از اجزا ممکن است سمی باشند.
پوشش آنتی باکتریال هوشمند	محیط پاسخگو به‌عنوان یک "سوئیچ" برای انتشار جزء آنتی باکتریال برای کشتن باکتری ها و از بین بردن بدن آنها	پلیمریزاسیون پیوند آغاز شده از سطح، جاسازی	آنتی باکتریال با راندمان بالا؛ اکثر اجزا غیر سمی هستند.

۳-مقایسه روش‌های ساخت پوشش‌های آب گریز و ضدباکتریایی

در جدول۲ روش های ساخت پوشش های آب گریز و ضدباکتریایی به صورت مقایسه‌ای که شامل معایب و مزایا و نحوه آماده‌سازی می‌باشد بیان شده است.

جدول۲) آماده‌سازی، مزایا و معایب برخی از روش‌های ساخت پوشش‌های آبگریز و ضدباکتریایی.

روش	آماده سازی / گونه ها	مزیت	معایب	منبع
غوطه وری	غوطه ور کردن پارچه و اماده-سازی مواد کم انرژی سطحی	فرآیند ساده‌تر، هزینه کمتر، کاربرد وسیع‌تر و صنعتی‌سازی آسان‌تر	روی خواص مکانیکی زیرلایه تاثیر می-گذارد	[۱۷-۲۱]
الکتروریسی	طراحی ساختار ویژه فیبر یا تکمیل فیلم فیبر	عملکرد فوق آبگریز بالا، عملیات فرآیند انعطاف پذیر و هزینه کم	استحکام الیاف کم و راندمان تولید پایین	[۲۲-۲۴]
روش رسوبی	رسوب شیمیایی، رسوب الکتروشیمیایی	کم هزینه، ساده و موثر	فرآیند آماده سازی پیچیده و پایداری ضعیف محصول	[۲۵-۳۶]
دیگر روش ها	پلاسما اچینگ، جداسازی فاز	عملیات ساده	کاهش خواص مکانیکی	[۳۶-۴۳]

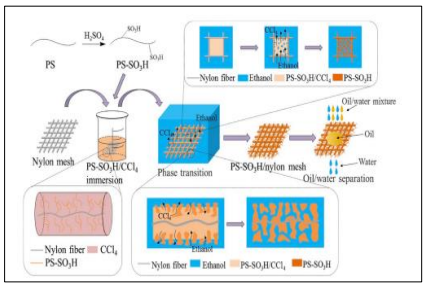
۴- پوشش های خودتمیزشونده براساس ماهیت شیمیایی

خودتمیزشوندهها یکی از موضوعات مورد بحث به دلیل توانایی آنها در تمیز کردن سطح، بدون هیچ منبع خارجی است.[۴۴،۴۵] نانوتکنولوژی نقش مهمی در توسعه سطوح خودتمیزشونده ایفا میکند زیرا استفاده از نانوذرات به تنهایی میتواند به خوبی بر روی لایه‌های مختلف به طور یکنواختتر پخش شود و مورفولوژی مناسبی ایجاد کند.[۴۶،۴۷] پوشش‌های خود تمیزشونده را می‌توان با توجه به ماهیت شیمیایی خود به سه دسته فیلم‌های مختلف، یعنی آلی، معدنی و معدنی-آلی تقسیم کرد.

۴-۱ پوشش‌های آلی

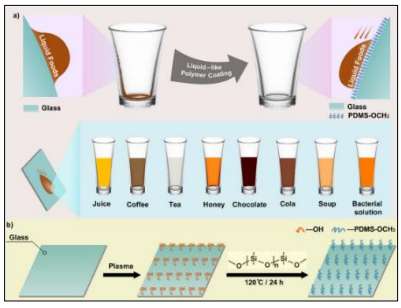
یکی از سادهترین و مؤثرترین راه‌ها برای ایجاد خاصیت خودتمیزشوندگی در مواد، رسوب لایه‌های نازک از پلیمرهای طبیعی یا مصنوعی محلول در آب (WSPs) که دارای ویژگی‌های آبدوست یا آبگریز هستند، مانند: پلی آمید، آلکیل کتن، پلی کربنات ، هیدروکربن‌های پارافینی[۴۸] ، پلی آکریلونیتریل[۴۹]، پلی استایرن و سولفونیک[۵۰]. این گروه‌ها می‌توانند با مولکول‌های آب، معمولاً از طریق پیوند هیدروژنی و برهمکنش‌های دوقطبی مرتبط، برهمکنش داشته باشند؛ که منجر به تشکیل یک لایه پیوسته یا شبه پیوسته بدون پراکندگی آب می‌شود.

در سال ۲۰۲۰ وانگ و همکارانش پلی استایرن را که توسط سولفوناسیون آبدوست شده است، با جداسازی فازی ناشی از حلال، روی یک شبکه نایلونی پوشاندند، تا یک شبکه فوق آبگریز/ زیر آب پایدار، برای جداسازی روغن/ آب ساخته شود. مخلوطهای مختلف روغن/ آب، با راندمان ۱۰۰٪ از هم جدا شدند. محلول‌های نمک عملکرد مش PS-SO_3H/نایلون را بهبود بخشیدند. افزایش عملکرد مش در حضور نمک‌ها کاربرد عملی پیدا می‌کند. این مش دارای راندمان عالی جداسازی روغن/ آب، شار آب بالا، قابلیت بازیافت خوب و خواص ضد رسوب است؛ و به ویژه در برابر نمک‌ها و اسیدها مقاوم است. بنابراین، مش PS SO_3H / نایلون برای حذف روغن از آب، به ویژه برای حذف روغن از فاضلاب آشپزخانه یا فاضلاب صنعتی اسیدی و همچنین برای تصفیه نشت نفت دریایی مناسب است. [50].



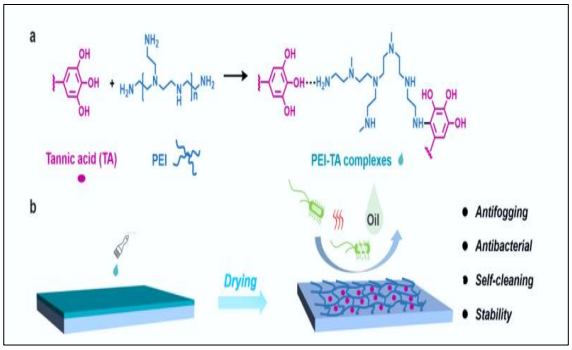
شکل۲) شماتیک ساخت شبکه فوق آب دوست PS SO_3H / نایلون مورد استفاده برای جداسازی روغن / آب[۵۰]

در سال ۲۰۲۱ یانگ و همکارانش پلی‌دی‌متیل سیلوکسان «مایع‌مانند» را با روش واکنش تعادل حرارتی یک مرحله‌ای بر روی شیشه‌های صاف پیوند دادند، که دافع بسیار قوی را به غذاهای مایع مختلف نشان می‌دهد. نشان داده شد که سطح شیشه اصلاح شده، شفافیت و زیست سازگاری بالایی دارد و دارای CA بالا و SAهای پایین برای انواع مایعات ارگانیک و غذاهای مایع است. که می‌تواند به طور موثری از چسبندگی باقی مانده مواد غذایی مایع بدون تمیز کردن مواد شوینده جلوگیری کند، و بهبود قابل توجهی را در کاهش آلودگی باکتری‌ها و آلودگی محیطی نشان می‌دهد. همچنین می‌تواند توانایی ضدچسبندگی عالی خود را در برابر رشد باکتری‌ها حتی پس از قرار گرفتن در معرض اصطکاک مکانیکی حفظ کند.[۵۱]



شکل ۳) a - تصویری از سطح شیشه ای اصلاح شده، b - تصویری از روش ساخت سطح با پلی‌دی‌متیل سیلوکسان

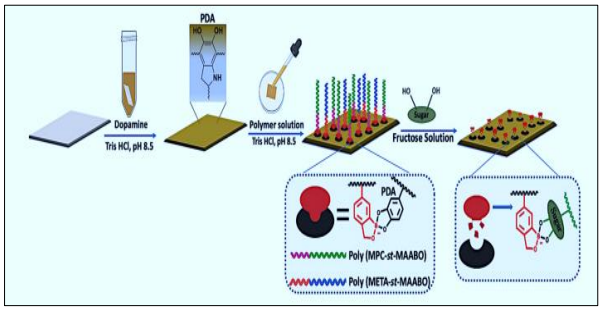
در سال ۲۰۲۱ رن و همکارانش یک روش ساده و در عین حال قوی برای ساخت یک پوشش چسب الهام‌گرفته از زیست بر اساس کمپلکس‌های پلی‌اتیلن‌ایمین (PEI) و اسید تانیک (TA) توسعه دادند؛ که خواص ضدمه، خودتمیزشوندگی و ضدباکتری عالی را نشان می‌دهد. پوشش کمپلکس‌های پلی اتیلن ایمین-تانیک اسید (PEI-TA) همراه با خاصیت چسب الهام گرفته شده از TA می‌تواند به طور موثر و پایداری بر روی بسترهای مختلف از طریق یک فرآیند رسوب‌گذاری یک مرحله‌ای پوشش داده شود و آب دوستی لایه‌های پوشش داده شده را می‌توان به میزان قابل توجهی افزایش داد. زاویه تماس آب کمتر از ۱۰ درجه می‌باشد. علاوه بر این، مشخص شد که عینک ایمنی با روکش PEI-TA در مقایسه با عینک ایمنی ضدمه تجاری در شرایط بخار ۶۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲ ساعت، دوام و قابلیت ضدمه عالی را نشان می‌دهد. هم چنین پوشش‌های PEI-TA فعالیت ضدباکتریایی برتری را برای اشریشیا کلی گرم منفی و استافیلوکوکوس اورئوس گرم مثبت نشان می‌دهند. پوشش ضد مه، خودتمیزشونده و آنتی باکتریال، چشم انداز کاربرد گسترده‌ای را در دستگاه‌های نوری و پزشکی فراهم می‌کند.[۵۲]



شکل ۴) تصویری از آماده سازی کمپلکس های a) PEI-TA و پوشش‌های چند منظوره (b) با قابلیت های ضد مه، خود تمیز شونده و ضد باکتریایی

در سال ۲۰۲۲ آنیکا آشا و همکارانش با تشکیل پیوندهای استر بورونیک کووالانسی بین گروه‌های کاتکول از پلی دوپامین و بنزوکسا بورول از پلیمرهای زویتریونی و کاتیونی یک سطح خودتمیزشونده با خاصیت دو عملکردی پاسخگو به قند ایجاد نمودند. برای ایجاد خاصیت ضد رسوب و افزایش سازگاری زیستی پوشش، ترکیب زویتریونیک ۲- متاکریلویلوکسی اتیل فسفریل کولین (MPC) انتخاب شد و بنزوکسا بورول حاوی پلیمر زوئیتریونیک پلیمر (MPC-st-MAABO) (MAABO:) سنتز شد. علاوه بر این برای ایجاد خاصیت ضد باکتریایی به سطح، یک آمونیوم چهارتایی حاوی پلیمر کاتیونی پلی (۲- متاکریلویلوکسی) اتیل تری متیل آمونیوم -(META) st-MAABO سنتز شد. پلیمر زوئیتریونی و پلیمر کاتیونی حاوی آمونیوم چهارتایی با نسبت‌های وزنی

مختلف با موفقیت به سطح پوشش داده شده PDA پیوند زدند. مشاهده شد که وجود مقدار کمی از پلیمر زویتریونیک (MPC-st-MAABO) در پوشش علاوه بر افزایش خاصیت ضدباکتریایی، به توسعه یک سطح بسیار آبدوست با زیست سازگاری عالی کمک کرد. این سطح پویا خودتمیزشونده می‌تواند پتانسیل زیادی در زمینه کاربردهای زیست پزشکی داشته باشد. [۵۳]



شکل۵) تصویر شماتیک از پوشش PDA برای پیوند بنزوکسابورول حاوی پلیمر کاتیونی پلیمری (META-st-MAABO) و پلیمر زوئیتریونیک (MPC-st-MAABO) روی سطح پوشش داده شده با PDA با تشکیل پیوند استری بورونات. تفکیک کمپلکس بنزوکسابورول-کاتکول در حضور قند مانند محلول فروک[۵۳]

۴-۱-۱) مزیت ومعایب پوشش‌های آلی

WSPها به دلیل انعطاف‌پذیری، پردازش‌پذیری عالی، شفافیت، چسبندگی، چقرمگی خوب و هزینه کم و همچنین امکان تنظیم عملکرد آنها از طریق واکنش-های شیمیایی مناسب، برای طراحی پوشش‌های خودتمیزشونده مناسب هستند. [۵۴،۵۵] متأسفانه، پوشش‌های ساخته شده از این مولکول‌ها به دلیل آب دوستی ذاتی، مستعد حل شدن در آب هستند.[۵۶] برای ایجاد پایداری ساختاری و در نهایت، فعالیت طولانی مدت، عوامل شبکه معمولاً در فرمول‌های پوشش گنجانده می‌شوند تا شبکه‌های پلیمری متقاطع را پس از عمل آوری نوری/ حرارتی ایجاد کنند. عوامل اتصال عرضی یا پلیمرهای آبدوست یا نمک-های معدنی یا مخلوطی از هر دو هستند.[۵۷, ۵۶] ویژگی‌های متنوعی مانند مقاومت در برابر حلال‌ها، تورم‌پذیری، نفوذپذیری آب، پایداری حرارتی و عملکرد نوری به شدت به چگالی اتصال متقابل بستگی دارد.[۵۸] به‌عنوان مثال، برای اینکه یک پوشش خودتمیزشونده در برابر سایش مقاوم باشد، درجه اتصال عرضی باید به اندازه کافی بالا ، به‌ویژه در بالاترین ناحیه لایه باشد.[۵۹] با این وجود، توزیع همگن اتصال متقابل نیز مفید است. در غیر این صورت، جذب آب باعث ایجاد بی‌نظمی در سطح می‌شود که ممکن است باعث پراکندگی نور شود، و منجر به کاهش شفافیت نوری شود.

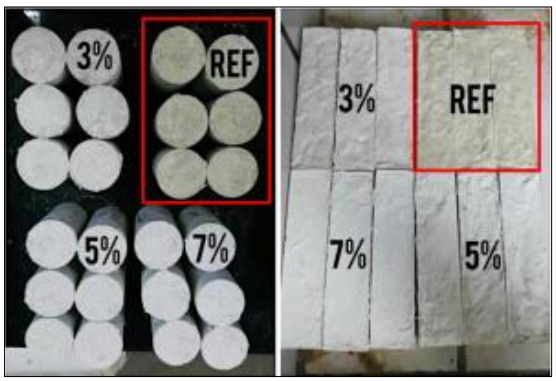
۴-۲) پوشش‌های معدنی

به طور کلی، مواد معدنی مورد استفاده در پوشش‌های خودتمیزشونده و ضد باکتریایی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. اولین مورد توسط مواد ذاتاً آب دوست مانند SiO_2، اکسید گرافن، یا $In_2O_3 - SnO_2$ در اشکال مختلف از جمله نانوذرات جامد، توخالی یا مزوپور، نانوفلکه ها و نانومیله ها ادغام می شود. در مقابل، گروه دوم از مواد فوتواکتیو مانند TiO_2یا ZnO تشکیل شده است. که در معرض نور ماوراء بنفش یا به دنبال تغییرات شیمیایی یا فیزیکی مناسب در برابر نور مرئی، فوق‌آبدوست می‌شوند. هدف از افزودن ذرات معدنی بهبود خواص پوشش و گسترش دامنه کاربرد است [۶۰-۶۴]

در سال ۲۰۲۲ وانگ و همکارنش یک پوشش ضد انعکاس و فوق آبگریز ، بادوام و با خاصیت خودتمیزشوندگی عالی برای بهبود کارایی سلول‌های خورشیدی پیشنهاد دادند. پوشش آماده شده دارای ساختارهای متعددی برای بهبود دوام است. در مرحله اول، پوشش از یک ساختار فیلم دو لایه تشکیل شده است، و لایه زیرین از طریق پیوند کووالانسی به بستر متصل می‌شود تا چسبندگی پوشش‌ها را بهبود بخشد. ثانیاً، ذرات سیلیس آبگریز در لایه بالایی را می‌توان در ساختار منافذ لایه زیرین جاسازی کرد، تا استحکام اتصال بین لایه‌های بالا و پایین را بهبود بخشد. ثالثاً، ذرات سیلیس آبگریز در لایه بالایی در یک ساختار مشبک سه بعدی تشکیل شده توسط سیلیس با زنجیره بلند ثابت می‌شوند که می‌تواند پایداری مکانیکی پوشش‌ها را بهبود بخشد. علاوه بر این، شرایط آماده‌سازی ذرات سیلیسی آبگریز و نسبت سل سیلیکا با زنجیره بلند در محلول لایه بالایی را می‌توان برای کنترل خواص بادوام، ضد انعکاس و فوق آبگریز پوشش‌ها تنظیم کرد. نتایج تجربی نشان می‌دهد که ضریب عبور شیشه پوشش‌دار نسبت به شیشه بدون پوشش ۵ درصد افزایش یافته و WCA شیشه پوشش‌دار می‌تواند به بیش از ۱۵۰درجه برسد و پوشش دارای درجه تست سختی مداد 6H و درجه تست چسبندگی نوار 5B است. حداکثر بازدهی سلول-های خورشیدی پوشش داده شده را می‌توان تا ۵/۶۷

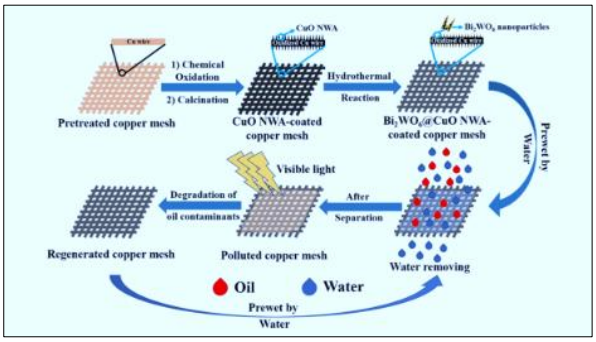
درصد افزایش داد. پس از شبیه‌سازی تجمع گرد و غبار و بارندگی، توان سلول‌های خورشیدی پوشش-دار و بدون پوشش را می‌توان به ترتیب به ۹۶/۶٪ و ۸۳٪ بازگرداند که نشان می‌دهد پوشش تهیه شده، دارای قابلیت خودتمیزشوندگی عالی نیز می-باشد.[۶۵]

در سال ۲۰۲۲ زامیس و همکارانش اثر افزودن TiO_2 را بر خودتمیزشوندگی و مقاومت فشاری و خمشی صفحات GRC در محتوای ۳، ۵ و ۷ درصد با توجه به جرم سیمان ارزیابی کردند. صفحات نمونه GRC آماده شده با محلول رنگی (رودامین B و متیلن بلو) رنگ آمیزی شدند، و در معرض چهار جهت خورشیدی اصلی نمای ساختمان (شمال، جنوب، شرق و غرب) در زوایای شیب مختلف (۰ درجه، ۴۵ درجه، و ۹۰ درجه نسبت به سطح زمین) قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نمونه‌هایی که بیشترین عملکرد را داشتند، صفحاتی بودند که در جهت شمال قرار گرفتند و نسبت به سطح زمین شیب صفر درجه داشتند. گنجاندن TiO_2 به طور مثبت بر قوام مخلوطها تأثیر می‌گذارد و خواص GRC را در حالت سخت شده بهبود می‌بخشد، ولی تنها به افزایش غلظت TiO_2 بستگی ندارد. بلکه به جهت‌گیری خورشید و قرار گرفتن در معرض اشعه UV و زمان تابش و شیب صفحات نیز بستگی دارد. تنش‌های گسیختگی اندازه-گیری شده بیشتر از ۱۰۰ مگاپاسکال در مقاومت فشاری و ۲۰ مگاپاسکال در خمش بود.[۶۶]



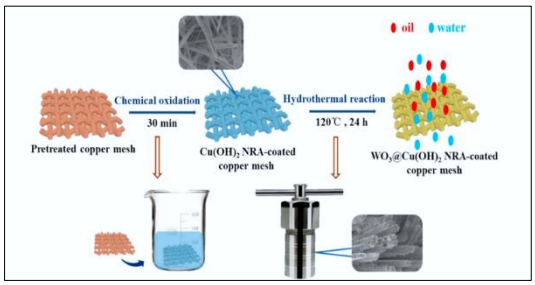
شکل۷) تصویر برخی از نمونه ها پس از قالب گیری: سیلندری (سمت چپ) و منشوری (راست)[۶۶]

در سال ۲۰۲۰ لی و هکارانش یک مش مسی با پوشش نانو سیم های $Bi_2WO_6@CuO$ با ترکیبی از روش‌های اکسیداسیون شیمیایی و رسوب هیدروترمال برای جداسازی روغن / آب تهیه نمودند. تحت نور مرئی، مش مسی ساخته شده دارای توانایی اکسیداسیون فوتوکاتالیستی عالی برای تجزیه آلاینده‌های روغنی برای دستیابی به خودتمیزشوندگی برای استفاده مکرر است. تست‌های پایداری مختلف مانند مقاومت حرارتی، نمک و خوردگی اسید/قلیایی، و تست‌های سایشی برای تعیین دوام و پایداری حرارتی، فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی در کاربردهای عملی انجام شد. بنابراین، توری فلزی معدنی با پوشش $Bi_2WO_6@CuO$ یک کاندیدای امیدوارکننده برای تصفیه فاضلاب روغنی به دلیل راندمان جداسازی بالا، توانایی خود تمیز کنندگی مبتنی بر نور مرئی و پایداری محیطی بالا است.[۶۷]



شکل۸) تصویر شماتیک از فرآیند ساخت مش مسی با پوشش نانوسیم $Bi_2WO_6@CuO$ ، کاربرد در جداسازی روغن/ آب و تخریب آلاینده‌های روغنی به کمک نور مرئی.[۶۷]

لی و همکارنش در سال ۲۰۲۱ نانومیله های $WO_3@Cu(OH)_2$ را نیز با همان کارایی تهیه نمودند. توانایی خودتمیزشوندگی مش ساخته شده از طریق نور مرئی با تابش نور مرئی به مدت ۸۰ دقیقه توسط ابرترشوندگی بازسازی شده تأیید شد. همچنین برای ارزیابی پایداری و دوام بالا در شرایط محیطی شدید، مانند آزمایش‌های غوطه‌وری در نمک، محلول‌های اسیدی و قلیایی، دمای بالا و آزمون‌های سایشی مکانیکی قرار گرفت. با مزایای ذاتی نفوذپذیری آب ، راندمان جداسازی روغن/آب بالا، پایداری شیمیایی و مکانیکی عالی، مش مسی ساخته شده چشم انداز امیدوارکننده‌ای را در کاربردهای صنعتی عملی ارائه می‌دهد. [۶۸]



شکل۲-۸) شماتیک یک فرآیند ساخت دو مرحله‌ای مش‌های مسی پوشش‌داده‌شده با نانومیله‌های $WO_3@Cu(OH)_2$ با ترکیبی از روش‌های اکسیداسیون شیمیایی و رسوب هیدروترمال [۶۸]

٤-۲-۱) مزایا و معایب پوشش های معدنی

در مقایسه با مولکول‌های آلی، طراحی نانومواد معدنی به‌عنوان پوشش‌های کاربردی با ریزساختارهای غنی، دینامیک و آزادسازی فعالیت، آسان‌تر است. بنابراین، نانومواد فلزی به عنوان عوامل ضد میکروبی بسیار ارجح هستند. پوشش‌های معدنی از مزایای سختی بالا و مقاومت در برابر سایش عالی برخوردار هستند.

با این وجود، فرآیند ساخت پیچیده، نیاز به تجهیزات ساخت گسترده و دمای کاربرد، کاربرد پوشش‌های معدنی خالص را محدود کرده است. بنابراین، در دهه‌های اخیر، پوشش‌های هیبریدی آلی – معدنی (OIHCs) به دلیل مزایای پوشش‌های معدنی و پوشش‌های ارگانیک را می‌توان ترکیب کرد. ترکیب این دو جزء (اکسیدهای معدنی آبدوست و مولکول‌های آلی آبگریز) معمولاً در یک شبکه ترکیبی دشوار است.[۶۹،۷۰]

نانوکامپوزیت‌های اکسید دو و سه فلزی به دلیل ویژگی‌های رقابتی خود، که شامل پایداری شیمیایی بالا، غیر سمی، هدایت الکترونی کم، سایش بالا، مقاومت در برابر خوردگی، خواص فوتوکاتالیستی فعال، ضد باکتری/ ضد ویروسی عالی، قدرت و قابلیت خودتمیزشوندگی و ضریب حرارتی بالا، همواره مورد توجه تحقیقاتی قرار گرفته‌اند. خواص کاتالیزوری نانوذرات پس از فلز شدن به شکل آلیاژ ها، تشکیلات هسته-پوسته، سنگدانه‌های تماسی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. که نمی توان به طور کامل از کاتالیزورهای اکسید تک فلزی به‌دست آورد. امروزه محققان، انگیزه تولید و بررسی انواع مختلفی از آلیاژهای معدنی مانند TiO_2، SiO_2، CeO_2، ZrO_2، Al_2O_3، ZnO یا نانوکامپوزیت‌های مخلوط را برای افزایش کاربرد آنها دارند. [۷۱] پوشش‌های نسبتاً نازک مواد فلزی و معدنی همیشه ضروری هستند، زیرا مسیرهایی را برای موانع ارتباطی مؤثر بین فلز و محیط آن فراهم می‌کنند. [۷۱،۷۲]

۴-۳) پوشش‌های آلی- معدنی

یکی دیگر از استراتژی‌های برنده برای تهیه پوشش‌های خودتمیزشونده شامل مواد هیبریدی است. که در آن اجزای آلی و معدنی در سطح نانومتریک به دلیل ترکیبی از مزایای پوشش‌های آلی و معدنی استفاده می‌شوند.[۷۳] نانومواد غیر آلی مانند نانو پودر های فلزی، اکسیدهای فلزی، نیتریدها و کاربیدها و نانو کربنات کلسیم پتانسیل قابل توجهی برای افزایش عملکرد پوشش‌های پلیمری دارند. ویژگی‌های پوشش‌های نانوکامپوزیت به شدت به نوع نانوذرات، مورفولوژی، اندازه، سطح ویژه، ساختار شیمیایی، گروه‌های عاملی و برهمکنش بین نانوذرات و زمینه پلیمری بستگی دارد. [۷۴]

در سال ۲۰۲۳ ویرونچیت و همکارانش بر روی منسوجات پلی استر به روش غوطه وری کامپوزیت ZnO/PDMS را پوشش دادند. از نتایج، مشخص شد که منسوجات پلی استر پوشش داده شده با نانوکامپوزیت ZnO/PDMS تمام خواص خود تمیز شوندگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی را به طور قابل توجهی نشان می‌دهند.[۷۵]

در سال ۲۰۲۳ لام و همکارانش بر روس پارچه پنبه ای به روش reflux-thermal deposition نانو کامپوزیت MnO2/ZnO را پوشش دادند. ویژگی نوری و خاصیت ضد باکتری و خودتمیزشوندگی پارچه پنبه‌ای پوشش داده شده با ZnO به طور قابل توجهی با افزودن MnO_2 بهبود یافت.[۷۶]

در سال ۲۰۲۳ لی و همکارانش بر روی کاغذ شیاری بسته بندی به روش اسپری نانوکامپوزیت PDMS وZnO را پوشش دادند. نتایج تجربی نشان داد که پس از اصلاح با پوشش نانو اکسید روی، کاغذ بسته بندی دارای قابلیت آبگریزی و خودتمیزشوندگی بسیار خوبی هستند. زاویه تماس از ۱۱۴ درجه به ۱۴۴/۸ درجه افزایش یافت و خاصیت ضدرطوبت، ضدرسوب و مکانیکی بهبود یافت.[۷۷]

در سال ۲۰۲۳ مگاناتام و همکارانش بر روی پارچه پنبه ای به روش ad-dry cure نانو کامپوزیت C_3N_4/PPY را پوشش دادند. پارچه پنبه‌ای با روکش کامپوزیت C_3N_4/PPY راندمان تخریب فتوکاتالیستی و خواص خود تمیز شوندگی و ضد باکتری بهتری را در مقایسه با پوشش های جداگانه C_3N_4 و PPY نشان داد.[۷۸]

در سال ۲۰۲۳ لی و همکارانش بر روی پارچه پنبه ای به روش اسپری نانو کامپوزیت SiO_2 و پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) را پوشش دادند. پارچه پنبه ای دارای خاصیت ابرآبگریز با زاویه تماس با آب (WCA) و زاویه ریزش آب (WSA) به ترتیب ۱۶۱/۱ درجه و ۴ درجه هستند. هم چنین خواص خودتمیزشوندگی و ضد رسوب عالی و خودترمیم شوندگی دارند.[۷۹]

در سال ۲۰۲۳ ژیان ژن و همکارانش بر روی پارچه پنبه ای به روش غوطه وری نانوکامپوزیت FR-PDA@Ag-PDMS پوشش دادند.نتایج نشان داد که پارچه پنبه‌ای خاصیت ضد شعله، ضد باکتری، فوق آبگریز و خودتمیزشوندگی نشان می دهد. و همچنین پس از ۵۰ دوره شستشوی استاندارد، عملکرد مقاوم در برابر شعله، ضدباکتری، فوق‌آبگریز و خودتمیزشونده را حفظ کرد.[۸۰]

۵) جمع بندی و چشم اندازی به آینده

مطالعات ما نشـــان می‌دهد، که علیرغم تلاش‌های چشمگیری که در این حوزه انجام شده، اما هنوز یک پوشش آنتی باکتریال حساس به نور و ضد مادون قرمز و ضد اشعه فرابنفش و فوق‌آبگریز با کارایی و پایداری بالا و هزینه کم تولید نشده‌است. اغلب مواد نیمرسـانای مورد اسـتفاده در این حوزه هنوز از محدودیت جذب فوتون، جدایش ضـعیف جفت الکترون-حفره و سـرعت بالای بازترکیب حاملین بار، رنج می‌برند. با این وجود نانومواد به دلیل نسبت سطح به حجم بالایی که دارند، گزینه مناسبی جهت انجام واکنش‌های شیمیایی هستند. همچنین بکارگیری نانوذرات فلزی و تشکیل نانوکامپوزیت سبب بهبود نقایص و کاسـتی‌های پوشـش‌های ضـدباکتریایی فوق‌آبگریز شـده و افق‌های جدیدی در این حوزه گشوده شده‌است. در این راستا، به نظر می‌رسد نانوکامپوزیتی که شـامل نانوذرات اکسـیدروی و سیلیکون دی اکسید است، یکی از امیدوار کننده‌ترین فناوری‌ها در زمینه پوشـش‌های ضـدباکتری و فوق‌آبگریز است.

۶) منابع

1) Nyankson, Emmanuel, et al. "Recent advances in nanostructured superhydrophobic surfaces: Fabrication and long-term durability challenges." *Current Opinion in Chemical Engineering* 36 (2022): 100790.

2) Nistor, Cristina Lavinia, et al. "Novel hydrophobic nanostructured antibacterial coatings for metallic surface protection." *Coatings* 12.2 (2022): 253.

3) Sotoudeh, Freshteh, et al. "Natural and synthetic superhydrophobic surfaces: A review of the fundamentals, structures, and applications." Alexandria Engineering Journal 68 (2023): 587-609.

4) Kaddoura, Mohamad; Majeau-Bettez, Guillaume; Amor, Ben; Moreau, Christian; Margni, Manuele (2022). "Investigating the role of surface engineering in mitigating greenhouse gas emissions of energy technologies: An outlook towards 2100". Sustainable Materials and Technologies. 32: 425.

5) Ratan, J.K.; Saini, A. Enhancement of photocatalytic activity of self-cleaning cement. Mater. Lett. 2019, 244, 178–181.

6) Zailan, Siti Norsaffirah, et al. "Potential Applications of Geopolymer Cement-Based Composite as Self-Cleaning

Coating: A Review." *Coatings* 12.2 (2022): 133.

7) Alinezhad-Kahriz, Ehsan, Seyed Ali Hosseini, and Behrang Izadkhah. "Synthesis, characterization and investigation of hydrophobic and self-cleaning properties of modified Zn–Mn and Cu–Mn nano spinels." *Materials Chemistry and Physics* 303 (2023): 127816.

8) Li, Zhong, and Khiam Aik Khor. "Preparation and properties of coatings and thin films on metal implants." (2019): 203-212.

9) Wang, Nannan, et al. "Recent advances in antibacterial coatings for orthodontic appliances." *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 11 (2023): 1093926.

10) Chen, Xionggang, et al. "Antibacterial coatings on orthopedic implants." *Materials Today Bio* (2023): 100586

11) Li, Y.; Luo, B.; Guet, C.; Narasimalu, S.; Dong, Z. Preparation and formula analysis of anti-biofouling titania–polyurea spray coating with nano/micro-structure. Coatings 2019, 9, 560.

12) Yang, Xiongfa, et al. "Fabrication and performance of UV–curable Schiff base–containing antibacterial silicone modified materials." *Progress in Organic Coatings* 174 (2023): 107313.

13) Li, J.; Zhuang, S. Antibacterial activity of chitosan and its derivatives and their interaction mechanism with bacteria: Current state and perspectives. Eur. Polym. J. 2020, 138, 109984.

14) Wei, T.; Yu, Q.; Chen, H. Responsive and synergistic antibacterial coatings: Fighting against bacteria in a smart and effective way. Adv. Healthc. Mater. 2019, 8, 1801381.

15) Hao, X.; Chen, S.; Qin, D.; Zhang, M.; Li, W.; Fan, J.; Wang, C.; Dong, M.; Zhang, J.; Cheng, F.; et al. Antifouling and antibacterial behaviors of capsaicin-based pH responsive smart coatings in marine environments. Mater. Sci. Eng. C 2020, 108, 110361.

16) Wang, Leijie, et al. "Recent advances in superhydrophobic and antibacterial coatings for biomedical materials." *Coatings* 12.10 (2022): 1469.

17) J.T. Wen, Z. Sun, Z.H. Wang, H.J. Fan, J. Xiang, Y. Chen, J. Yan, J.X. Ning, Biomimetic construction of three-dimensional superhydrophobic microfiber nonwoven fabric, Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 612 (2021) 125990e125998.

18) A.L. Vasiliu, M.M. Zaharia, M.M. Bazarghideanu, I. Rosca, D. Peptanariu, M. Mihai, Hydrophobic composites designed by a nonwoven cellulose-based material and polymer/CaCO3 patterns with biomedical applications, Biomacromolecules 23 (2022) 89e99.

19) N. Tian, J.F. Wei, Y.B. Li, B.C. Li, J.P. Zhang, Efficient scald-preventing enabled by robust polyester fabrics with hot water repellency and water impalement resistance, J. Colloid Interface Sci. 566 (2020) 69e78.

20) L.Y. Shen, X. Wang, Z.H. Zhang, X.X. Jin, M. Jiang, J.M. Zhang, Design and fabrication of the evolved zeolitic imidazolate framework-

modified polylactic acid nonwoven fabric for efficient oil/water separation, ACS Appl. Mater. Interfaces 13 (2021) 14666e14674.

21)J. Lu, C.F. Cui, Q.H. Yu, J.J. Su, J. Han, Robustly superhydrophobic polylactic acid nonwoven membranes for efficient oil/water separation, J. Porous Mater. 29 (2022) 241e247.

22)W. Choi, M. Kang, J.Y. Park, H.E. Jeong, S.J. Lee, Enhanced air stability of superhydrophobic surfaces with flexible overhangs of re-entrant structures, Phys. Fluids 33 (2021) 9.

23)P.K. Sow, R. Singhal, P. Sahoo, S. Radhakanth, Fabricating low-cost, robust superhydrophobic coatings with re-entrant topology for self-cleaning, corrosion inhibition, and oil-water separation, J. Colloid Interface Sci. 600 (2021) 358e372.

24)X.Y. Huang, R.B. Yu, Robust superhydrophobic and repellent coatings based on micro/nano SiO2 and fluorinated epoxy, Coatings 11 (2021) 18.

25)I. Sadeghi, N. Govinna, P. Cebe, A. Asatekin, Superoleophilic, mechanically strong electrospun membranes for fast and efficient gravity-driven oil/water separation, ACS Applied Polymer Materials 1 (2019) 765e776.

26)X. Yan, Z. Huang, S. Sett, J. Oh, H. Cha, L. Li, L. Feng, Y. Wu, C. Zhao, D. Orejon, F. Chen, N. Miljkovic, Atmosphere-mediated superhydrophobicity of rationally designed micro/nanostructured surfaces, ACS Nano 13 (2019) 4160e4173.

27)H. Liu, Q. Li, Y. Bu, N. Zhang, C. Wang, C. Pan, L. Mi, Z. Guo, C. Liu, C. Shen, Stretchable conductive nonwoven fabrics with self-cleaning capability for tunable wearable strain sensor, Nano Energy 66 (2019) 104143e104151.

28)X.H. Lang, T.Y. Zhu, L. Zou, K. Prakashan, Z.X. Zhang, Fabrication and characterization of polypropylene aerogel material and aerogel coated hybrid materials for oil-water separation applications, Prog. Org. Coating 137 (2019) 105370e105378.

29)G. Fan, Y. Diao, B. Huang, Preparation of superhydrophobic and superoleophilic polylactic acid nonwoven filter for oil/Water separation, J. Dispersion Sci. Technol. 41 (2020) 289e296.

30)H. Yuan, Y. Pan, X. Wang, Q. Chen, Q. Hu, C. Shao, Z. Guo, C. Liu, C. Shen, X. Liu, Simple water tunable polyurethane microsphere for super-hydrophobic dipcoating and oil-water separation, Polymer 204 (2020) 122833e122838.

31)L.H. Li Guobin, Jinhui Li, Hui Zeng, Li Rui, Gensheng Li, Jican Jin, Progress in research of preparation of superhydrophobic, Polym. Mater. Sci. Eng. 36 (2020) 142e150.

32)F. Sun, T.T. Li, X. Zhang, Preparation and oilewater separation evaluations of polypropylene/low-melt-point polyester composites reinforced by thermal bonding and one-step

39)L. Zhao, G. Duan, G. Zhang, Electrospun functional materials toward food packaging applications: a review, Nanomaterials 10 (2020) 150e181.

40)Y. Liang, N. Li, F. Li, Z. Xu, Y. Hu, M. Jing, K. Teng, X. Yan, J. Shi, Controllable nitrogen doping and specific surface from freestanding TiO2@carbon nanofibers as anodes for lithium ion battery, Electrochim. Acta 297 (2019) 1063e1070.

41)Q. Liu, Z. Chen, X. Pei, C. Guo, K. Teng, Y. Hu, Z. Xu, X. Qian, Review: applications, effects and the prospects for electrospun nanofibrous mats in membrane separation, J. Mater. Sci. 55 (2020) 893e924.

42)X.W. Wang, D.C. Chen, M. Zhang, H.W. Hu, Biodegradable polylactide/TiO2 composite fiber scaffolds with superhydrophobic and superadhesive porous surfaces for water immobilization, antibacterial performance, and deodorization, Polymers 11 (2019) 1860e1871.

43)I.M. Alarifi, In-situ annealing and characterization of superhydrophobic electrospun poly(acrylonitrile) ionized nanofibre smart material properties, Bull. Mater. Sci. 43 (2020) 246e256.

44)S. Wu, G. Xiong, H. Yang, B. Gong, Y. Tian, C. Xu, Y. Wang, T. Fisher, J. Yan, K. Cen, Multifunctional solar waterways: plasma-enabled self-cleaning nanoarchitectures for energy-efficient desalination, Adv. Energy Mater. (2019) 1901286.

solution immersion, Polym. Int. 69 (2020) 752e762.

33)Q. Zeng, P. Ma, X. Su, D. Lai, X. Lai, X. Zeng, H. Li, Facile fabrication of superhydrophobic and magnetic poly(lactic acid) nonwoven fabric for oilewater separation, Ind. Eng. Chem. Res. 59 (2020) 9127e9135.

34)T. Zhang, C. Xiao, J. Zhao, J. Cheng, K. Chen, Y. Huang, Graphene-coated poly(ethylene terephthalate) nonwoven hollow tube for continuous and highly effective oil collection from the water surface, ACS Omega 4 (2019) 7237e7245.

35)S. Ortelli, A.L. Costa, Insulating thermal and water-resistant hybrid coating for fabrics, Coatings 10 (2020) 72e84.

36)K. Song, J. Lee, S.O. Choi, J. Kim, Interaction of surface energy components between solid and liquid on wettability, and its application to textile antiwetting finish, Polymers 11 (2019) 498e515.

37)M. Vaidulych, A. Shelemin, J. Hanus, I. Khalakhan, I. Krakovsky, P. Kocova, H. Maskova, J. Kratochvil, P. Pleskunov, J. Sterba, O. Kylian, A. Choukourov, H. Biederman, Superwettable antibacterial textiles for versatile oil/water separation, Plasma Process. Polym. 16 (2019) 1900003e1900015.

38)W.C. Wang Feipeng, Mu Peng, Li Jian, Zhengyong Huang, Jingliang Huang, Transformer-oil filtration properties of fluorinated nonwoven polypropylene electret fimls, J. Chongqing Univ. 42 (2019) 39e49.

45)S. Maharjan, K.-S. Liao, A.J. Wang, K. Barton, A. Haldar, N.J. Alley, H.J. Byrne, S.A. Curran, Self-cleaning hydrophobic nanocoating on glass: a scalable manufacturing process, Mater. Chem. Phys. 239 (2020) 122000.
46)S.S. Latthe, K. Nakata, R. Höfer, A. Fujishima, C. Terashima, CHAPTER 5 Lotus effect-based superhydrophobic surfaces: candle soot as a promising class of nanoparticles for self-cleaning and oil–water separation applications, Green Chemistry for Surface Coatings, Inks and Adhesives: Sustainable Applications, The Royal Society of Chemistry, 2019, pp. 92–119.
47)S.S. Latthe, R.S. Sutar, A.K. Bhosale, K.K. Sadasivuni, S. Liu, Chapter 15 - Superhydrophobic surfaces for oil-water separation, in: S.K. Samal, S. Mohanty, S.K. Nayak (Eds.), Superhydrophobic Polymer Coatings, Elsevier, 2019, pp. 339–356.
48)Tripathi, Prerna, et al. "6 Application of Self-Cleaning Materials in the Oil and Gas Industries." *Functional Materials for the Oil and Gas Industry: Characterization and Applications* (2023): 87.
49)Wu, Zhenbo, et al. "Photocatalytic self-cleaning membrane with polyaniline/NH2-MIL-125 heterojunction for highly oil-water/seawater separation and bacterial inactivation." *Separation and Purification Technology* (2023): 124412.
50)Wang, Lujun, et al. "Preparation of a polystyrene-based super-hydrophilic mesh and evaluation of its oil/water separation performance." *Journal of Membrane Science* 597 (2020): 117747.
51)Yang, Chengduan, et al. "Liquid-like polymer-based self-cleaning coating for effective prevention of liquid foods contaminations." *Journal of Colloid and Interface Science* 589 (2021): 327-335.
52)Ren, Jingli, et al. "Bioinspired adhesive coatings from polyethylenimine and tannic acid complexes exhibiting antifogging, self-cleaning, and antibacterial capabilities." *Journal of Colloid and Interface Science* 602 (2021): 406-414.
53)Asha, Anika B., et al. "Dopamine assisted self-cleaning, antifouling, and antibacterial coating via dynamic covalent interactions." *ACS Applied Materials & Interfaces* 14.7 (2022): 9557-9569.
54)Cherupurakal, Nizamudeen, et al. "Recent advances in superhydrophobic polymers for antireflective self-cleaning solar panels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151 (2021): 111538.
55)Li, Haibo, Li Sun, and Weihua Li. "Application of organosilanes in titanium-containing organic–inorganic hybrid coatings." *Journal of Materials Science* 57.29 (2022): 13845-13870.
56)Chevallier P, Turgeon S, Sarra-Bournet C, Turcotte R, Laroche G. Characterization of multilayer anti-fog coatings. ACS Appl Mater Interfaces 2011;3:750–8.
57)Maechler L, Sarra-Bournet C, Chevallier P, Gherardi N, Laroche G. Anti-fog layer deposition onto polymer materials: A multi-step

excellent durable and Self-cleaning properties for solar cells." *Applied Surface Science* 602 (2022): 154408.

66) Ehrenbring, Hinoel Zamis, et al. "Analysis of the Self-Cleaning Potential of Glass Fiber Reinforced Concrete (GRC) with TiO2 Nanoparticles." *Sustainability* 14.1 4 (2022): 8738.

67) Li, Zhikai, et al. "Photocatalytically driven self-cleaning and underwater superoleophobic copper mesh modified with hierarchical Bi2WO6@ CuO nanowires for oil/water separation." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 59.37 (2020): 16450-16461.

68) He, Huaqiang, et al. "Hierarchical WO3@ Cu (OH) 2 nanorod arrays grown on copper mesh with superwetting and self-cleaning properties for high-performance oil/water separation." *Journal of Alloys and Compounds* 855 (2021): 157421.

69) Rigo, S.; Cai, C.; Gunkel-Grabole, G.; Maurizi, L.; Zhang, X.; Xu, J.; Palivan, C.G. Nanoscience-based strategies to engineer antimicrobial surfaces. Adv. Sci. 2018, 5, 1700892.

70) Wang, L.; Hu, C.; Shao, L. The Antimicrobial activity of nanoparticles: Present situation and prospects for the future. Int. J. Nanomed. 2017, 12, 1227–1249.

71) Velumani, S., et al. "Engineered Zr/Zn/Ti oxide nanocomposite coatings for multifunctionality." *Applied Surface Science* 563 (2021): 150353.

72) G. Sharma, M. Naushad, A. Kumar, S. Devi, M.R. Khan, approach. Plasma Chem Plasma Process 2010;31:175–87

58) Ye Y-S, Rick J, Hwang B-J. Water Soluble Polymers as Proton Exchange Membranes for Fuel Cells. Polymers (Basel) 2012;4:913–63.

59) Grube S, Siegmann K, Hirayama M. A moisture-absorbing and abrasion-resistant transparent coating on polystyrene. J Coatings Technol Res 2015;12:669–80.

60) Liu, Fengguo, et al. "Preparation of UV curable organic/inorganic hybrid coatings-a review." *Progress in Organic Coatings* 145 (2020): 105685.

61) Wei, Yuanchen, et al. "Recent advances in photocatalytic self-cleaning performances of TiO 2-based building materials." *RSC advances* 13.30 (2023): 20584-20597.

62) Behera, Ajit, and Ajit Behera. "Self-cleaning materials." *Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science* (2022): 359-394.

63) Behera, Ajit, Dipen Kumar Rajak, and K. Jeyasubramanian. "Fabrication of nanostructures with excellent self-cleaning properties." *Design, fabrication, and characterization of multifunctional nanomaterials*. Elsevier, 2022. 449-478.

64) Jishnu, A., et al. "Superhydrophobic graphene-based materials with self-cleaning and anticorrosion performance: An appraisal of neoteric advancement and future perspectives." *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 606 (2020): 125395.

65) Wang, Ping, et al. "Anti-Reflective superhydrophobic coatings with

Lanthanum/Cadmium/ Polyaniline bimetallic nanocomposite for the photodegradation of organic pollutant, Iran. Polym. J. (English Ed. 24 (2015) 1003–1013.

73) Li, Haibo, Li Sun, and Weihua Li. "Application of organosilanes in titanium-containing organic–inorganic hybrid coatings." *Journal of Materials Science* 57.29 (2022): 13845-13870.

74) Pourhashem, Sepideh, et al. "Polymer/Inorganic nanocomposite coatings with superior corrosion protection performance: A review." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 88 (2020): 29-57.

75) Wirunchit, Supamas, Narin Wonganan, and Wantana Keardniyom. "Multi Self-cleaning Properties of Zinc Oxide Nanoparticles/Polydimethylsiloxane (ZnO/PDMS) Composite on Polyester Textile." *CURRENT APPLIED SCIENCE AND TECHNOLOGY* (2023): 10-55003..

76) Lam, Sze Mun, et al. "Boosted Antimicrobial and Self-Cleaning Activities with MnO2/ZnO Coated on Cotton Fabric." *Advanced Materials Research* 1175 (2023): 89-95.

77) Li, Juanjuan, and Chunjun Zhou. "Nano-Zno Coating Enhanced the Hydrophobicn, Self-Cleaning, and Mechanical Property of Corrugated Paper Packaging Materials."

78) Meganathan, Prathiba, et al. "A Synergistic Self-Cleaning and Antibacterial studies of Photocatalytic Carbon Nitride/Polypyrrole Coated Cotton Fabrics for smart textile application." (2023).

79) Li, Keting, et al. "Preparation of self-healing superhydrophobic cotton fabric based on silica aerogel for self-cleaning and oil/water separation." *Journal of Adhesion Science and Technology* 37.14 (2023): 2154-2174.

80) Gu, Jianjun, et al. "Fabrication of durable coatings for cotton fabrics with flame retardant, antibacterial, Fluorine-free Superhydrophobic and self-cleaning properties." *Cellulose* 30.1 (2023): 591-610.

Recent Advances in Multifunctional Hydrophobic and Self-Cleaning Coatings Based on Semiconductor Materials: Challenges and Opportunities

Fatemeh Ebadi[1], Omid Mirzaee[2,*], Hassan Abdoos[1], , Sanaz Alamdari[1]

[1]Department of Nanotechnology, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran

[2]Department of Materials and Metallurgical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract: In recent years, research in the field of hydrophobic coatings, smart with multiple properties, as an innovative and appropriate solution to deal with environmental and industrial problems in areas with adverse weather conditions, has greatly increased. Despite decades of research efforts that show the capabilities of self-cleaning and antibacterial coatings, due to the lack of mechanical strength of the topography in dealing with micro-nano and the stability of molecules with low surface energy, the expensive coating method used, and the high toxicity of nanomaterials, they have not been brought to the market.Today, nanotechnology is developing at the fastest possible speed. So that nowadays most of the research is directed towards the design and construction of environmentally friendly structures and buildings, cleaner, lighter and with higher efficiency. On the other hand, smart coatings are referred to as coatings that respond automatically to environmental changes such as light radiation, humidity, temperature, pressure, and pH change. The purpose of designing this kind of coatings is for higher performance, increasing the life of the product and significantly reducing the cost of maintenance. In this article, we mentioned the recent studies in the field of self-cleaning and hydrophobic coatings based on semi-conducting materials and the comparison between them.

Key words: Hydrophobic coatings, antibacterial coatings, silicon dioxide, zinc oxide, surface modification, thin layer