

A Review of Anti-Soiling Coatings for Improving the Performance of Photovoltaic Panels

Majid Mirzaee^{1,*}, Tayyeb Mohebbi², Masoud Hamedanian³, Mohammad Golmohammad⁴

1-Assistant professor, Non-metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

2- Ph.D Student, Chemistry Department, Kashan University, Kashan, Iran.

3- Associate Professor, Chemistry Department, Kashan University, Kashan, Iran.

4- Assistant professor, Renewable Research Research Group, Niroo Research Institute, Tehran, Iran.

Abstract

Regions with abundant sunlight, such as the Middle East and North Africa, are optimal for photovoltaic power generation. However, the average power loss of photovoltaic modules due to dust accumulation is very high and may reach 1% per day, necessitating frequent cleaning, which adds to operational and maintenance costs. One solution is the creation of anti-dust coatings, where hydrophilic or hydrophobic coatings with suitable spectral characteristics for PV applications are added to the outer glass layer of PV panels. Nevertheless, the effectiveness of such coatings greatly depends on climatic conditions and geographical locations. Since the coatings add to the cost of solar panels, it is essential to first test their suitability in the intended location and/or under similar climatic conditions before large-scale deployment. This paper provides a review of various anti-dust technologies used to reduce the PV pollution problem. The goal is to deeply compare different techniques and developed materials, providing relevant input in aligning the appropriate technology based on the particle accumulation mechanism, climatic conditions, and geographical location. Although mechanical cleaning methods have been most commonly used to date, the development of anti-dust thin coatings could be a better option due to their non-abrasive nature, wide deployability, cost-effectiveness, and durability. This review aims to serve as a reference in this field, thereby paving the way for the implementation of efficient anti-dust coatings.

Keywords

Dust, Anti-dust coatings, Hydrophobic, Hydrophilic, Outdoor testing

Article history:

Received: 27-04-2024

Accepted: 22-07-2024

Corresponding author:

*mjmiraee@nri.ac.ir

مروری بر پوشش‌های ضد گرد و خاک برای بهبود عملکرد پنل فوتوولتائیک

مجید میرزایی^{۱*}، طیبه محبی^۲، مسعود همدانیان^۳، محمد گل محمد^۴

۱- عضو هیات علمی گروه پژوهشی مواد غیرفلزی (استادیار)، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری تخصصی، دانشگاه کاشان، گروه شیمی

۳- عضو هیات علمی گروه نانوشیمی (دانشیار)، دانشگاه کاشان، گروه شیمی، کاشان، ایران

۴- عضو هیات علمی گروه پژوهشی انرژی‌های تجدیدپذیر (استادیار)، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

مناطق با نور خورشید فراوان، مانند خاورمیانه و شمال آفریقا برای تولید برق فتوولتائیک بهینه هستند. با این حال، میانگین تلفات توان ماژول‌های فتوولتائیک ناشی از تجمع گرد و غبار بسیار زیاد است و ممکن است به ۱٪ در روز برسد، که نیاز به تمیز کردن مکرر دارد که به هزینه عملیات و نگهداری می‌افزاید. یک راه‌حل، ایجاد پوشش‌های ضد گرد و خاک است، که در آن پوشش‌های آب دوست یا آبگریز با ویژگی‌های طیفی مناسب برای کاربردهای PV به لایه بیرونی شیشه PV اضافه می‌شود. با این حال، اثربخشی چنین پوشش‌هایی بستگی زیادی به شرایط آب و هوایی و موقعیت‌های جغرافیایی دارد. از آنجایی که پوشش‌ها به هزینه پانل‌های خورشیدی می‌افزایند، ضروری است که ابتدا از نظر مناسب بودن در مکان مورد نظر و/یا در شرایط آب و هوایی مشابه قبل از استقرار در مقیاس بزرگ آزمایش شوند. این مقاله مروری بر روی فن‌آوری‌های مختلف ضد گرد و غبار مورد استفاده برای کاهش مسئله آلودگی PV تمرکز دارد. هدف مقایسه تکنیک‌ها و مواد مختلف توسعه‌یافته، ارائه ورودی مرتبط در انطباق فناوری مناسب بر اساس مکانیسم تجمع ذرات، شرایط آب‌وهوایی و موقعیت جغرافیایی است. گرچه تاکنون روش تمیزکاری مکانیکی بیشترین استفاده را داشته است، با این وجود توسعه پوشش‌های نازک ضد گرد و غبار به دلیل قابلیت عدم سایش، قابلیت استقرار وسیع، صرفه اقتصادی و دوام بالا می‌تواند گزینه‌ای بهتر باشد. این بررسی با هدف عمل کردن به عنوان یک مرجع در این زمینه است، و در نتیجه مسیر را برای به کارگیری پوشش‌های ضد گرد و غبار کارآمد هموار می‌کند.

چکیده

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۲/۰۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۵/۰۱

گرد و غبار، پوشش‌های ضد گرد و خاک، آبگریز، آب دوست، تست فضای باز

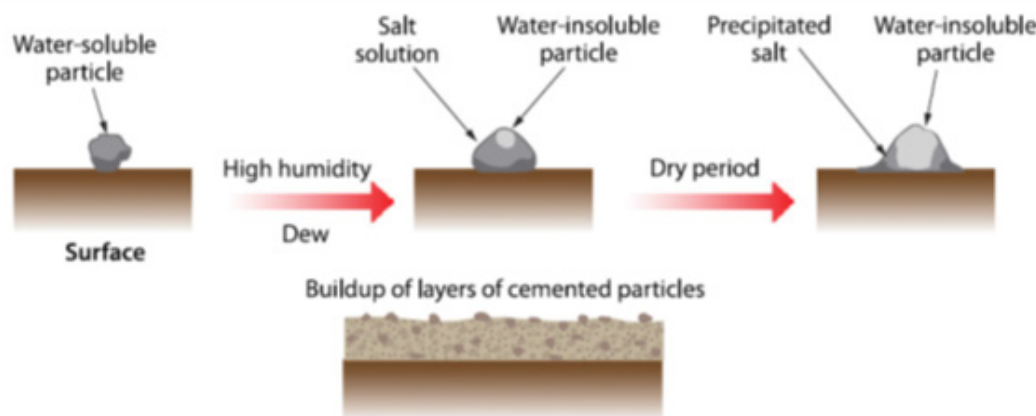
واژگان کلیدی

۱- مقدمه

سیستم‌های فتوولتائیک (PV) به شدت به نور و طیف خورشیدی و همچنین به کارایی اجزای خود وابسته‌اند. اما نباید از اهمیت محل نصب و شرایط آب و هوایی غافل شد که در توان خروجی و در نتیجه عملکرد کلی سیستم تأثیرگذارند. یکی از مسائلی که شاید کمتر به چشم آمده، انباشت گرد و غبار روی پنل‌های PV است که می‌تواند به مرور زمان به یک عامل تضعیف‌کننده برای نیروگاه‌های خورشیدی تبدیل شود و با محدود کردن توان خروجی، به کاهش کارایی سیستم منجر شود. در مناطق خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA)، ترکیب گرد و غبار با رطوبت یک واقعیت اجتناب‌ناپذیر است، که در نتیجه، زمینه‌های تحقیقاتی و فنی را برای رویارویی با این چالش‌ها همواره فعال نگه داشته است [۱-۳]. در سه دهه گذشته، تلاش‌های علمی فراوانی صورت گرفته تا سیستم‌های PV را به حالتی پایدار با اجزای مکانیکی و الکتریکی مطمئن و کارآمد برسانند [۴-۷]. با این حال، انباشت گرد و غبار روی سطح پنل‌ها می‌تواند هنگام برخورد با نور، به سادگی باعث اختلال در عملکرد مورد نظر شود و توان خروجی را کاهش دهد، که در نهایت ممکن است به قطع کامل کارایی سیستم منجر شود. گرد و غبار به طور معمول از ذراتی با قطر کمتر از ۵۰۰ نانومتر تشکیل شده که از مواد معدنی آلی ساخته شده‌اند [۸]. منشأ گرد و غبار جوی می‌تواند برخاسته از باد که خاک را به حرکت درمی‌آورد، فوران‌های آتشفشانی و آلودگی‌های زیست‌محیطی باشد. جالب است که ترکیب ذرات گرد و غبار در هر نقطه‌ای متفاوت است و می‌تواند بین مکان‌های مختلف به شدت متغیر باشد. همچنین، نحوه و سرعت تجمع گرد و غبار در مکان‌های متفاوت به طور چشمگیری متفاوت است. تاکنون، متداول‌ترین روش برای تمیز کردن پنل‌های PV، استفاده مکانیکی از آب یا مواد پاک‌کننده است. با این حال،

این نوع تمیزکاری به آب فراوان و نیروی کار زیادی نیاز دارد و در نهایت می‌تواند هزینه‌های عملیاتی و نگهداری را به شدت افزایش دهد. در برخی تحقیقات قبلی، نتایج نادرستی از نرخ تجمع گرد و غبار بدون توجه به چگالی و ویژگی‌های ذرات گزارش شده است. بر اساس گزارش‌ها، زاویه شیب ۳۰ درجه ممکن است تنها ۱٪ از طیف نور خورشید را به خود اختصاص دهد، در حالی که از دست دادن ۵٪ برای شیب‌هایی بین ۰ تا ۵۰ درجه گزارش شده است. گرد و غبار می‌تواند به یک دغدغه بزرگ تبدیل شود، حتی اگر بارندگی‌های طبیعی گاه به گاه وجود داشته باشد و میزان آلودگی سطح پنل‌ها پایین باشد. نرخ تخریب ناشی از آلودگی ممکن است تا ۱۴٪ برسد، به خصوص در شرایط آب و هوایی پر از گرد و غبار که می‌تواند باعث کاهش ۱۲٪ در انتقال نور خورشید شود. اما این مسئله در منطقه MENA صدق نمی‌کند، جایی که بارش‌های طبیعی بسیار نادر هستند [۹]. چهار مکانیزم آلودگی شناسایی شده است که شامل (۱) سمناسیون نمک‌های محلول در آب، (۲) رسوب مواد آلی، (۳) تنش بین سطح و ذرات گرد و غبار، و (۴) انرژی ذرات می‌باشد. مکانیزم سیمان‌کاری به عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب شناخته می‌شود، چرا که ترکیب زیادی از گرد و غبار و رطوبت می‌تواند به چسبیدن گرد و غبار به پنل‌های PV منجر شود [۹]. این فرآیند باعث می‌شود ذرات سیمانی پس از خشک شدن تجمع یابند (شکل ۱). رسوب لایه‌های آلی روی سطح، تمیز کردن نمک‌های رسوبی را دشوارتر می‌کند و نیاز به فرآیند تمیز کردن پیچیده‌تری دارد.

از میان روش‌های مقابله با گرد و غبار، روش بازسازی برای بازگرداندن سطح اولیه با حذف گرد و غبار به کار گرفته شده است. دیگر روش‌ها شامل استفاده از مکانیزم‌های دفع گرد و غبار، تمیز کردن با آب یا مواد شیمیایی قوی‌تر و وسایل تمیز کردن مکانیکی،



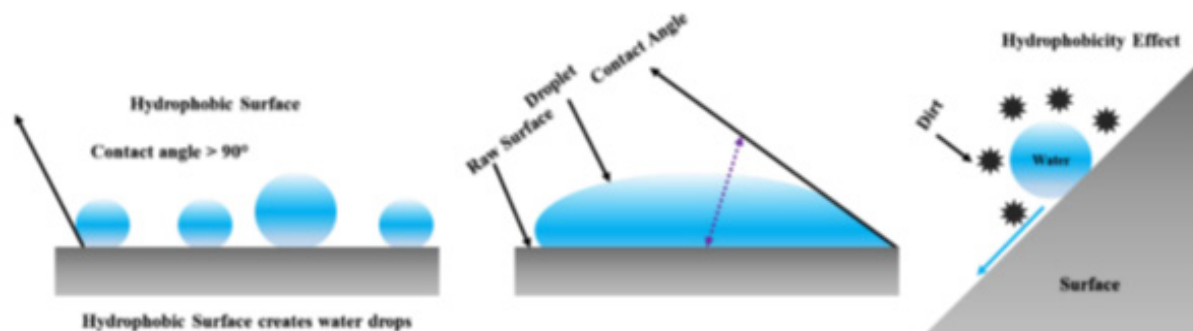
شکل ۱. فرآیند سمناسیون گرد و غبار-رطوبت (آب).

Figure 1. Dust-moisture (water) cementation process.

(شکل ۲) [۱۳، ۱۴]. این فرآیند با جایگزینی یون‌های سدیم و پتاسیم با یون‌های آلومینیومی انجام می‌شود. این تغییرات مهندسی مولکولی، خصوصیات سطح را از هیدروفیلیک به هیدروفوبیک تبدیل می‌کند. علاوه بر این، آلومینیوم مقاومت در برابر آب و دوام سطح را افزایش می‌دهد. عوامل متقاطع یونی مانند آکرلیک‌ها می‌توانند به دلیل دوام سطحی بهتر و خصوصیات هیدروفوبیک، جایگزین یون‌های آلومینیوم شوند [۱۵]. در حقیقت، برای ایجاد خاصیت آب‌دوستی می‌توان از موادی با انرژی سطحی زیاد استفاده کرد که از تجمع گرد و غبار جلوگیری می‌کنند و به دلیل قابلیت حل شدن در آب، این لایه‌ها به عنوان مواد سازگار با محیط زیست شناخته می‌شوند. در مقابل، خاصیت آب‌گریزی زمانی اتفاق می‌افتد که زاویه بزرگی بین قطره‌های آب و سطح وجود داشته باشد، که در این حالت نیروی جاذبه به آن‌ها کمک می‌کند تا گرد و غبار روی سطح را به سمت پایین بکشند. همچنین، برای جلوگیری از ایجاد بار الکتریکی ناشی از گرد و غبار، می‌توان از موادی با رسانایی بالای سطح استفاده کرد که نقش لایه‌های ضد استاتیک را ایفا می‌کنند [۱۶].

پوشش‌های آبگریز نیز به عنوان محافظ‌هایی در برابر گرد و غبار و رطوبت شناخته شده‌اند [۱۷]. در تحقیقات قبلی، ایجاد بافت‌های مختلف روی سطح برای مقابله با مشکل آلودگی مورد بررسی قرار گرفته است. با اینکه مواد فوق آب‌گریز به عنوان پوشش‌های ضد گرد و غبار مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، اما مشخص شده که به دلیل خصوصیات آلی آن‌ها در معرض نور UV، این مواد ناپایدار هستند. عملکرد سلول‌های خورشیدی (PV) به دلیل وجود گرد و غبار به شدت کاهش می‌یابد و کاهشی در طیف نور خورشیدی از ۲۰٪ تا ۵۰٪ مشاهده شده است که این امر در نهایت باعث اختلال در کارایی کلی سیستم PV تا حدود ۳۰٪ حتی با وجود تجمع زیاد گرد و غبار می‌شود. آلودگی سطح همچنین باعث افزایش بازتاب در سیستم‌های انرژی خورشیدی متمرکز

و تغییر خصوصیات سطح می‌شوند [۱۰، ۱۱]. همچنین، حذف مکانیکی آلودگی‌ها با استفاده از دستمال به عنوان یک استراتژی منطقی شناخته شده است. اما این روش نیاز به نیروی کار زیاد و تکرار مداوم دارد. اتوماسیون با استفاده از رباتیک به همراه مواد شیمیایی بر پایه محلول‌های شوینده ملایم نیز ممکن است. با این وجود، این روش‌ها احتمال آسیب به سطح به دلیل فرآیندهای تمیز کردن مکانیکی را نادیده می‌گیرند. یک فرآیند تمیز کردن سطح که هم اقتصادی باشد و هم مؤثر، نیاز به کمترین نیروی کار، مواد شوینده کافی و تمیز کردن به اندازه برای کاهش هرگونه افت توان دارد. گرچه آب به عنوان یکی از بهترین مواد شوینده شناخته شده است، کمبود آب در بسیاری از نقاط جهان، از جمله منطقه MENA، یک مشکل است. بر اساس مطالعات قبلی، آب و سایر محلول‌های شیمیایی برای حذف ذرات گرد و غبار مؤثر هستند [۱۰]. اگرچه میزان تراکم گرد و غبار در منطقه MENA نسبتاً بیشتر است، اثرات رطوبت نیز همانطور که در مطالعات قبلی بررسی شده، وجود دارند. توسعه پوششی با ویژگی‌های دلخواه که بتواند گرد و غبار را از سطح جدا کند و همزمان دوام و اطمینان بالایی داشته باشد، اهمیت بسزایی دارد. پوشش‌های ضد گرد و غبار باید از نظر اقتصادی برای استفاده در مقیاس وسیع و با بالاترین مقاومت در برابر طیف‌های خورشیدی UV و مادون قرمز مناسب باشند [۱۲]. ایجاد پوششی ضد گرد و غبار که بتواند ذرات را از سطح شیشه دور کند بدون اینکه بر خصوصیات نوری تأثیر بگذارد، ایده‌ای نو نیست. در زمینه کاربردهای فتوولتائیک، مواد شیمیایی متنوعی مانند پلی وینیل کلراید (PVC)، پلی‌اتیلن و آکرلیک‌ها برای ایجاد فیلم‌هایی روی زیرلایه‌های شیشه‌ای به کار رفته‌اند. با این حال، مشخص شده که این پوشش‌ها با گذشت زمان به دلیل مولکول‌های آلی ناپایدار می‌شوند. سطوح هیدروفوبیک و تنش سطحی کمتر به عنوان عوامل مهم دیگری برای کاهش تجمع گرد و غبار روی پنل‌های PV شناخته شده‌اند



شکل ۲. سطح آبگریز به عنوان پوشش ضد گرد و غبار.

Figure 2. Hydrophobic surface as anti-dust coating.

پوشش‌های ضد آلودگی و ضد بازتابش پرداخته است [۱۹-۲۱]. با این حال، تنها تعداد اندکی از مطالعات تجربی وجود دارند که چنین لایه‌هایی را برای دوره‌های طولانی آزمایش و در شرایط طوفان‌های شنی طبیعی و همچنین در کنار روش‌های دیگر تمیزکاری مورد بررسی قرار داده‌اند [۲۲]. کاهش عملکرد ناشی از آلودگی سلول‌های خورشیدی (یعنی تجمع گرد و غبار) یا تأثیرات ذرات معلق محیطی (PM) به شدت به موقعیت جغرافیایی بستگی دارد و هر دو تحت تأثیر پارامترهای متفاوتی مانند سرعت باد، تراکم ذرات گرد و غبار، ترکیبات و غیره قرار دارند. آلودگی نتیجه وجود ذرات گرد و غبار است و ترکیب این ذرات در سراسر دنیا به شدت متغیر است (شکل ۴). عنصر اصلی ترکیب شیمیایی به شدت به منابع محلی و ناپایدار وابسته است. در اصل، شیمی آلودگی شامل ترکیباتی از سیلیکا و اکسیدهای فلزی است. علاوه بر این، منابع دیگری مانند نمک، مولکول‌های اسید سولفوریک و دوده نیز وجود دارند که مولکول‌های اسید سولفوریک از تغییر فاز از گاز به جامد به وجود می‌آیند. همچنین، بیوفیلیم‌ها می‌توانند بر روی شیشه‌های سولار رشد کنند [۲۳]. استفاده از تحلیل داده‌ها به عنوان یک روش اندازه‌گیری هوشمند برای شمارش ذرات گرد و غبار مهم است، چرا که انجام بررسی‌های مختلف در مناطق متفاوت قبل از راه‌اندازی نیروگاه‌های PV در مقیاس بزرگ ضروری است. عملکرد کلی PV می‌تواند بر اساس موقعیت جغرافیایی به دلیل تأثیر آلودگی تا ۷۰٪ کاهش پیدا کند [۲۴]. بنابراین، ضروری است که تمیزکاری مازول‌های PV از طریق روش‌های مختلفی مانند

(CSP^۱) شده و منجر به کاهش چشمگیر در توان خروجی می‌گردد که این مسئله یکی از عوامل اصلی تخریب سطوح بازتابنده به شمار می‌رود [۱۸]. نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز (CSP) به شدت نسبت به گرد و غبار حساس هستند (خیلی بیشتر از نیروگاه‌های فتوولتائیک (PCV)) و برای مقابله با مشکل آلودگی به نگهداری دقیق و مستمر نیاز دارند. برای پیشگیری و دفع ذرات گرد و غبار، روش‌های غیرفعال و فعال به کار گرفته شده‌اند. این فناوری‌ها به عنوان آخرین دستاوردهای علمی با مشارکت فعالان‌های فیزیکدان‌ها، شیمیدان‌ها و متخصصان علم مواد معرفی شده‌اند. سطوح فوق آب‌دوست و فوق آب‌گریز به طور مؤثر برای سطوح مرطوب و خشک به کار گرفته شده‌اند، اما برای تأیید طول عمر این پوشش‌ها نیاز به تحقیقات بیشتری است. صنعت فضایی به طور چشمگیری از این تکنولوژی دفع استفاده کرده و روش‌های اصلی برای بررسی کارایی آن‌ها از طریق مطالعات فنی و اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بهترین پوشش ضد گرد و غبار باید پیش از عرضه‌ی کامل، معیارهایی مانند شفافیت بالا در طیف نور مرئی، عمر طولانی‌تر، هزینه‌های کمتر برای تولید انبوه، عدم سمیت و قابلیت تولید در مقیاس وسیع را داشته باشد.

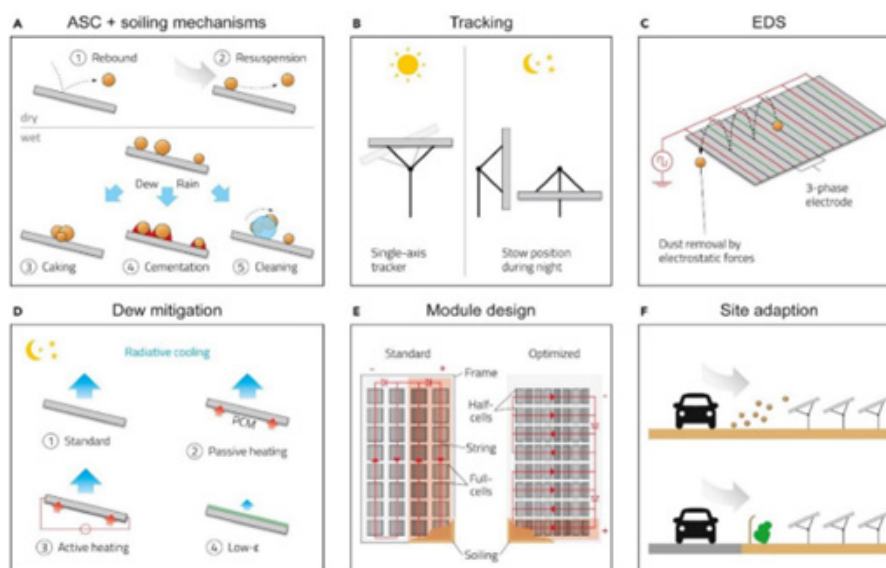
۲- پوشش ضد گرد و غبار

انباشت گرد و غبار بر روی پنل‌های شیشه‌ای سلول‌های خورشیدی (PV) به طور چشمگیری توان خروجی این ماژول‌ها را کاهش می‌دهد (شکل ۳). از این رو، صنعت PV به فعالیت در زمینه توسعه



شکل ۳. مثال‌هایی از آلودگی: مروری بر انواع مختلف آلودگی با عکس‌های نمونه‌ای از آلودگی‌های ناشی از (الف) گرد و غبار معدنی در مناطق بیابانی، (ب) فضولات پرندگان، (ج) جلبک‌ها، خزها یا قارچ‌ها و (د) گرده‌ها در آب و هوای مرطوب و معتدل، (ه) دود خروجی موتورهای مناطق صنعتی، و (و) انتشارات ناشی از فعالیت‌های کشاورزی [۲۵].

Figure 3. Examples of soiling: Overview of different soiling types with exemplary photographs of soiling by (A) mineral dust in a desert area, (B) bird droppings, (C) algae, lichen, mosses, or fungi and (D) pollen in wet and moderate climates, (E) engine exhaust from an industrial area, and (F) agricultural emissions [25].



شکل ۴. نمای شماتیکی از فناوری‌های کاهش آلودگی (الف) مکانیزم‌های مهم آلودگی که می‌توان توسط پوشش‌های ضد آلودگی (ASCs) مورد هدف قرار گیرند (ب) ردیابی محور تکی و بهینه‌سازی موقعیت قرارگیری در شب (ج) اصول کاری EDS (نسخه موج ایستا)، (د) کاهش شبنم با استفاده از پوشش‌های با ضریب انتقال حرارت پایین و گرمایش فعال و غیرفعال (ه) روش‌های طراحی مازول‌های PV برای کاهش اتلاف ناشی از آلودگی: لایه قرمز نشان‌دهنده رشته‌های سلولی است که به دلیل آلودگی از دست رفته‌اند (و) سازگاری سایت [۲۵].

Figure 4. Schematic illustration of soiling mitigation technologies: (A) Important soiling mechanisms which could be addressed by anti-soiling coatings (ASCs). (B) Single-axis tracking and optimization of night stowing position. (C) Working principle of EDS: standing wave version). (D) Dew mitigation by low- ϵ coatings and active and passive heating. (E) PV module design approaches for soiling loss reduction: the red overlay indicates lost cell strings due to soiling. (F) Site adaption [25].

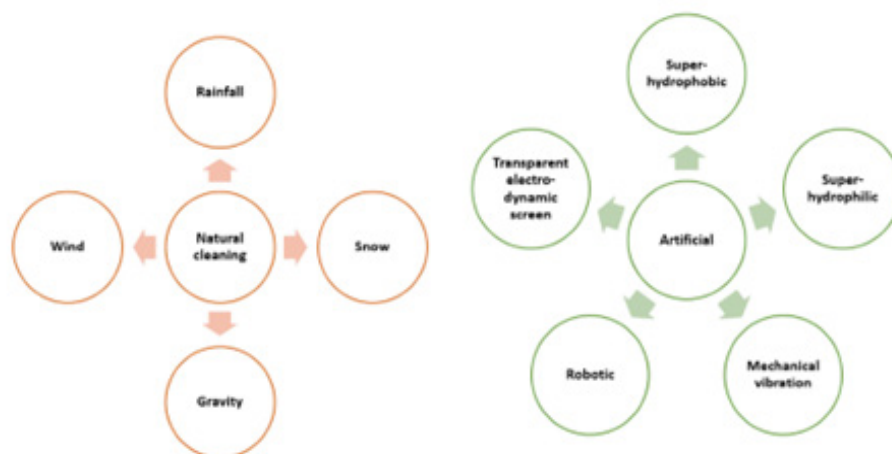
در نهایت با مدیریت بهتر نور، عملکرد را تا ۳٪ بهبود می‌بخشد. تلاش‌های قابل توجهی برای توسعه یک لایه سطحی عملکردی به عنوان پوشش ضد گرد و غبار صورت گرفته است و تحقیقات بیشتری در جریان است تا دوام این لایه‌ها را از دیدگاه اقتصادی در شرایط مختلف بررسی کنیم [۲۸].



شکل ۵. عوامل موثر بر نشست گرد و غبار.

Figure 5. Factors influencing dust settlement.

تاکنون هیچ راهکار سیستماتیکی برای رفع مشکلات آلودگی با در نظر گرفتن مصرف آب و نیاز به نیروی کار آغاز نشده است [۲۶]. به طور کلی، فرآیند تمیزکاری تنها زمانی انجام می‌گیرد که از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد، یعنی زمانی که تولید برق در مقابل اثرات آلودگی مقرون به صرفه باشد (شکل‌های ۵ و ۶). برخی از مناطق به دلیل بارش‌های طبیعی که گرد و غبار را می‌شوید، نیازی به روش‌های پیشرفته تمیزکاری ندارند [۲۷]. در دوره‌های خشک در جنوب غربی ایالات متحده، تمیزکاری ۱ تا ۲ بار در سال صورت می‌گیرد. در مقابل، در منطقه MENA که کمبود آب یک مسئله اصلی است، معمولاً از تمیزکاری خشک با برس نرم استفاده می‌شود. علاوه بر این، برای تمیز کردن پنل‌های خورشیدی از روش‌های رباتیک نیز استفاده می‌شود. استانداردسازی شیشه جلو برای پنل‌های PV به مدت زمان طولانی به کار رفته است، که می‌توان آن را برای انتخاب روش تمیزکاری مناسب تطبیق داد. هرچند که پوشش‌های سطحی به عنوان پوشش‌های ضد گرد و غبار توسعه داده شده‌اند، اما هنوز آزمایش‌های استاندارد پیری انجام نشده است. شرکت‌های بسیاری راه‌حلی را توسعه داده‌اند که شامل هر دو پوشش ضد گرد و غبار و ضد بازتاب می‌شوند، که



شکل ۶. روش‌های مختلف تمیز کردن برای حذف گرد و غبار از کلکتورهای خورشیدی [۲۹].

Figure 6. Different cleaning methods for removing dust from solar collectors [29].

شده و میزان تغییر در ضریب شکست بر اساس الگوهای مختلفی پیش می‌رود. ویژگی که یک لایه بازتاب باید داشته باشد شامل موارد ذیل است:

- پوشش‌های ضدبازتاب (ARCs) باید در یک دامنه منطقی از طول موج‌ها، خواص ضدبازتابی را ارائه دهند. در برخی کاربردهای خاص، مطلوب است که ARCs باید دامنه وسیعی از طول موج‌ها را پوشش دهند، از جمله منطقه فرابنفش (UV) یا نزدیک به منطقه مادون قرمز.
- شیشه‌ها و پلاستیک‌ها دارای ضریب شکست حدود ۱٫۵ هستند و در زاویه تابش عادی ۴٪ بازتاب نشان می‌دهند، اما در زوایای مایل تا ۱۰۰٪ می‌رسد. به طور مشابه، پوشش‌های ضدبازتاب نیز چنین پدیده‌ای را نشان می‌دهند و بسیاری از پوشش‌ها عمدتاً در زوایای تابش از ۳۰ تا ۶۰ درجه خواص ضدبازتابی عالی ارائه می‌دهند. بنابراین، ضدبازتابی همه‌جهتی یک ویژگی حیاتی است که نیاز به بهینه‌سازی دارد [۳۳].
- ARCs باید با سطح زیرلایه اتصال خوبی داشته باشند و در محیط عملیاتی پایداری عالی داشته باشند.
- چندانکاره بودن ARCs روی سلول‌های فتوولتائیک (PV) عمدتاً به کاهش اتلاف بازتاب کمک می‌کنند. در مقابل، خواص خودتمیزشوندگی که به دلیل آب‌گریزی به آن داده شده است نیز می‌تواند به حل مشکل تجمع گرد و غبار کمک کند. بنابراین، ARC چندانکاره یک جهت تحقیق امیدوارکننده در زمینه تخصصی پوشش‌های ضدبازتاب است.
- حساسیت به قطبش: همچنین لازم است تأثیر نور قطبیده s و p بر پوشش‌های ضدبازتاب را تجزیه و تحلیل کرد. قطبش s دارای میدان الکتریکی است که عمود بر صفحه تابش است، در

پوشش‌های ضد گرد و غبار که در عین حال شفاف، ضد بازتاب، ماندگار و غیر سمی بوده و قابلیت خودپاک‌کنندگی دارند، در میان جامعه پژوهشگران به عنوان «جام مقدس» شناخته می‌شوند [۲۵].

۳- پوشش ضدبازتاب

ضدبازتابی می‌تواند به روش‌های مختلفی بر روی یک زیرلایه اعمال شود [۳۰]: (۱) چیدمان لایه‌هایی با ضریب شکست متفاوت، (۲) ایجاد تخلخل در ماده پوششی، (۳) ایجاد بافت بر روی سطح، (۴) فیلم با ضریب شکست گرادپانی. چیدمان فیلم‌ها باعث کاهش نسبی بازتاب در یک دامنه طول موج مشخص می‌شود و با افزایش تعداد فیلم‌ها، کاهش اتلاف بازتاب در یک منطقه گسترده‌تر از طول موج‌ها حاصل می‌شود [۳۱]. با این حال، مشکلات چسبندگی بین زیرلایه و فیلم مجاور یا در لایه‌های پوششی به دلیل اختلاف ضریب حرارتی می‌تواند منجر به جداسازی و ناپایداری شود. روش‌های ساخت متفاوت می‌توانند تخلخل ایجاد کنند و ضریب شکست تحت تأثیر نسبت حجم هوا به ماده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، سیلیکون متخلخل ماده‌ای شبیه اسفنج با حفره‌های نانویی در درون خود است. ضریب شکست سیلیکون متخلخل با افزایش تخلخل ماده کاهش می‌یابد و بالعکس. سطوح با بافتی که فاصله آرایه آن‌ها کمتر از طول موج هدف و ارتفاع آن‌ها بخشی از طول موج است، برای کاربردهای ضدبازتاب مناسب هستند. بافت‌دار کردن هم بر روی زیرلایه و هم بر روی سطوح فیلم قابل اجرا است. روش دیگر برای کاهش بازتاب، فراهم کردن یک ضریب شکست که به تدریج در فیلم کاهش می‌یابد، است. این کاهش تدریجی در ضریب شکست فیلم می‌تواند با تغییر تراکم [۳۲] حاصل شود. چنین پیکربندی به عنوان ساختار GRIN شناخته

ماژول‌ها جمع شود و از انرژی جنبشی برای پاک‌سازی ذرات گرد و غبار استفاده کند، در حالی که یک سطح آب‌دوست باعث پخش شدن مولکول‌های آب و شستشوی ذرات گرد و غبار می‌شود. انتخاب سطح مناسب برای جلوگیری از آلودگی به طور کامل به عوامل زیست‌محیطی بستگی دارد. سطوح آب‌گریز به دلیل قابلیت دفع ذرات گرد و غبار و مولکول‌های آلی در مناطق خشک، توجه فراوانی را به خود جلب کرده‌اند، در حالی که سطوح آب‌دوست در مناطق با بارش بیشتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در هر دو حالت، این سطوح باید شرایطی مانند پایداری در برابر نور UV، مقاومت بالا در محیط‌های سخت و داشتن فیلم‌های بسیار نازک (کمتر از ۵۰۰ نانومتر) برای استفاده به عنوان لایه‌های ضد بازتاب را دارا باشند. فناوری پوشش ضد بازتاب معمولاً از موادی مانند سیلیکا، نانومواد سیلیکایی، اکسیدهای فلزی و فلوراید‌های فلزی استفاده می‌کند. مواد آلی دیگر شامل PMMA، PET و PDMS هستند [۴۳]. توسعه‌های فناورانه معتبری برای ساخت چنین لایه‌هایی روی زیرلایه‌ها وجود دارد که شامل روش‌هایی مانند انباشت مواد با شاخص‌های شکست مختلف، فیلم‌های با شاخص شکست تدریجی، بافت‌دار کردن سطح و ایجاد تخلخل است. استقرار صنعتی پوشش‌های ضد آلودگی هنوز به حداکثر ظرفیت خود نرسیده است چرا که دوره‌های تمیزکاری کوتاه‌مدت هستند (شکل ۸). در این زمینه، روش‌های تمیزکاری غیرفعال بیشترین امید را ارائه داده‌اند [۴۴]. کاهش آلودگی تا ۸۰٪ برای دوره‌های کوتاه‌مدت گزارش شده است، در حالی که برای دوره‌های طولانی‌تر، این نرخ بین ۲۰٪ تا ۵۰٪ متغیر است. این میزان به شدت به شرایط زیست‌محیطی و نوع پوشش وابسته است [۴۵].

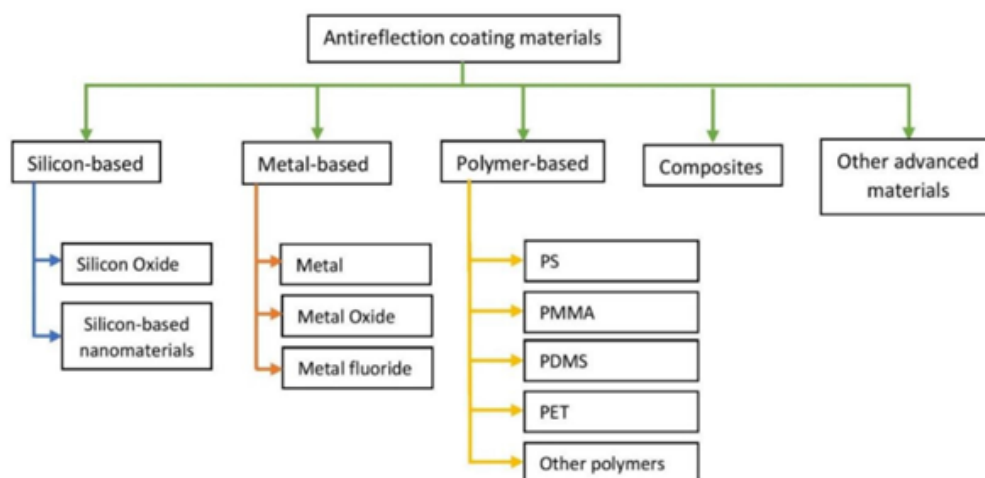
حالی که قطبش p دارای صفحه تابش موازی با میدان الکتریکی است. در کاربردهایی مانند پوشش‌های ضدتابش (AGCs)، قطبش نقش مهمی ایفا می‌کند.

۳-۱- مواد پوشش ضدانعکاس

وظیفه اصلی پوشش‌های ضدانعکاس کاهش دادن اتلاف بازتاب فرزنل و کمک به گسترش نور در مواد اصلی فتوولتائیک با بالاترین میزان انتقال نور ممکن است [۳۴]. معیارهایی که بر اساس آنها اثربخشی پوشش سنجیده می‌شود شامل ماده‌ای است که ARC از آن ساخته شده، ساختار ARC (به خصوص سطح رویی)، و روش‌های ساختی که برای تهیه پوشش ضدبازتاب به کار رفته‌اند. در این زمینه، مواد نقش کلیدی در تعیین خواص نظیر شفافیت، مقاومت مکانیکی، وزن، مقاومت در برابر خوردگی، و مقاومت در برابر حرارت و مواد شیمیایی دارند. علاوه بر این، روش ساخت به شدت به خصوصیات ماده وابسته است و بر عامل هزینه تأثیرگذار است. در این بخش، مواد پوشش ضد بازتاب با توجه به ساختارهای متفاوت، روش‌های آماده‌سازی، حداکثر یا میانگین انتقال نوری که نشان داده‌اند، و دیگر ویژگی‌ها طبقه‌بندی و بررسی می‌شوند. طبقه‌بندی مواد پوشش ضدبازتاب در شکل ۷ ارائه شده است. خلاصه‌ای از پوشش‌های ضدانعکاس مبتنی بر مواد ارایه شده در شکل ۷ در جدول شماره ۱ آورده شده است.

۴- مکانیسم‌هایی برای جلوگیری از گردوخاک با پوشش آب‌گریز و آبدوست

یک سطح آب‌گریز به آب اجازه می‌دهد تا روی سطح شیشه‌ای



شکل ۷. طبقه‌بندی مواد پوشش بازتاب.

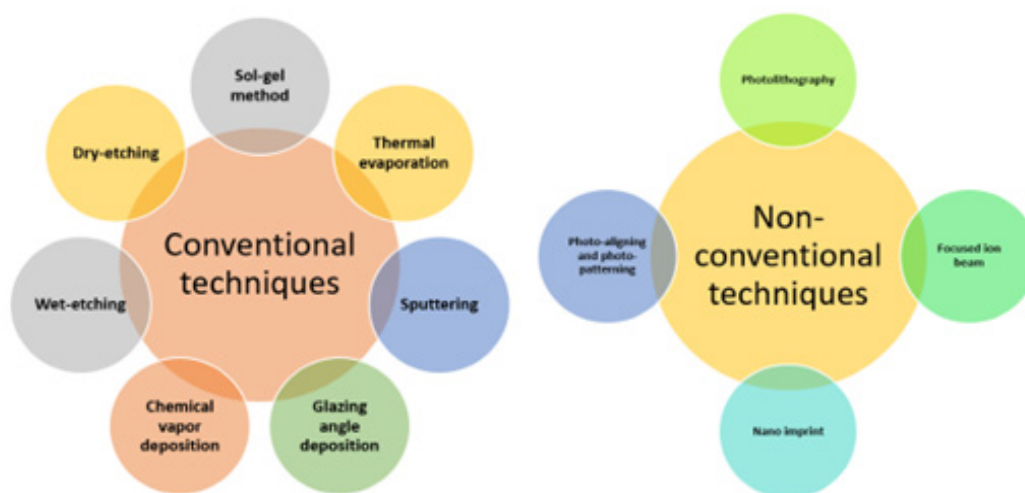
Figure 7. Classification of antireflection coating materials.

جدول ۱. مشخصات پوشش‌های ضد بازتاب ارائه شده از مواد مختلف.

Table 1. Specifications of anti-reflection coatings provided from different materials.

AR Coating Material	ARC Structure	Fabrication Technology	Reflectance (%)	Transmittance (%)	Wavelength (nm)	Features	Research Potential	Reference
Silicon	Nanowires (NWs)	Ag catalyzed chemical etching	5.6	-	250-800	Large scale SiNWs arrays can be prepared using MACE method	Experimental analysis of the increase in PCE using this coating	[35]
Silica	Five-layer hollow silica nanoparticles	Dip coating method	-	99.04	380-1600	Broadband antireflection coating	Effect of this coating on various solar cells to find its suitable application	[36]
ITO	Double layer ITO film	Long throw radio frequency magnetron sputtering technique + supercritical CO ₂ treatment	4.3	86.2	400-1000	The low optical reflectance and excellent electrical conductance make it suitable for Si-based solar cell applications	Research to improve transmittance further can be considered, and together with PCE analysis can be considered	[37]
MgF ₂	Hollow nanoparticles	Formation-deformation-reformation approach	-	96.2	300-1500	High-performance AR coating with a low index of refraction, high durability, and economical coating	Effect of this coating on various solar cells to find its suitable application	[38]
Polystyrene	Pyramid-arrayed PS film	Microinjection compression molding	5	93	400-900	PS-coated thin-film PV cell shown an improvement of 7.9% increase in PCE	Stability, reliability, and environmental effects of/on the coating can be analyzed	[39]

PMMA	Nano-cone array	Vacuum-assisted surface wetting methodology	0.64	99.4	400-800	Antireflection coating of parabola shape made of PMMA with nano-cone arrays	Effect of this coating on various solar cells to find its suitable application	[40]
SiO ₂ and TiO ₂	Five TiO ₂ and SiO ₂ thin films	Microwave-assisted reactive magnetron sputtering process	-	97	450-780	Improved hardness, high photocatalytic activity, scratch-resistant, and hydrophobic	Transmission can be analyzed and improved for broadband wavelength	[41]
Ag and SiO ₂	Nanostructured Ag and silica	Localized surface plasmon resonance	-	97.2	400-800	Low refractive index and high forward scattering is obtained	Effect of this coating on various solar cells to find its suitable application	[42]



شکل ۸. طبقه‌بندی روش‌های متداول ساخت پوشش ضدانعکاسی.

Figure 8. Classification of commonly used ARC fabrication techniques.

شاخص شکست بهینه‌سازی شده توسعه یافته‌اند. این دستگاه‌های PV در معرض محیط بیرونی قرار گرفته و قابلیت اطمینان ۳/۵ سال بدون هیچ‌گونه تخریب قابل توجهی انجام شده و سپس همان لایه بهینه‌سازی شده برای ماژول‌های PV سیلیکونی با همان بهبود عملکرد به کار رفته است.

۵- پوشش سیلیس روی ماژول با روش غوطه‌وری

در این روش، یک لایه متخلخل سیلیکا با تبخیر حلال بر روی پنل شیشه‌ای تشکیل می‌شود. این لایه سیلیکا حاوی تعداد زیادی

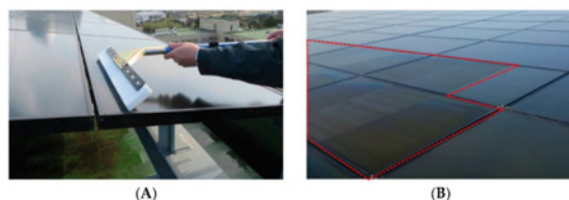
یک آزمون دقیق از قابلیت اطمینان پوشش سیلیکا به عنوان پوشش ضد گرد و غبار توسط کنسوکه برای ماژول‌های فتوولتائیک (PV) انجام شده است [۴۳]. بر اساس گزارش‌ها، از دست رفتن بخشی از طیف نور خورشیدی عمدتاً به دلیل عدم وجود پوشش‌های ضد بازتاب و ضد آلودگی است. این امر نشان‌دهنده نیاز به توسعه پوشش‌های فیلم نازک با کارکردهای دوگانه است، مانند بهبود مدیریت نور درون ماژول‌های PV با کاهش بازتاب و مقابله با مشکلات آلودگی. در این زمینه، پنل‌های PV مبتنی بر CIGS با یک لایه جلویی شفاف و پوشش‌های سیلیکایی با ضخامت و

میکروساختار با استفاده از پاشش یونی منجر شود. فیلم‌ها از نظر پارامترهای نوری و مورفولوژی مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص شده که مقادیر شاخص شکست با تغییر نرخ جریان اکسیژن متفاوت است و با افزایش نرخ جریان اکسیژن بالا می‌رود. در مطالعه دیگری [۴۷]، خصوصیات فوق آب‌گریزی و فوق آب‌دوستی برای پوشش‌های نانوساختار مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سطح فوق آب‌دوست با زاویه تماس 0° درجه بسیار بازتابنده بوده و برای سطح فوق آب‌گریز، 165° درجه بود. رشد نانوذرات سیلیکای نانوساختاری روی آینه‌ای نشان دهنده رفتار فوق‌العاده آب‌دوستی بود، که به خاطر سطح زبر آن است. نمونه دیگری با مولکول‌های لیگاند که انرژی سطحی کمتری داشتند، خصوصیات سطحی فوق‌العاده آب‌گریزی را تأیید کرد. هر دو لایه، بازتاب نور بسیار کمی داشتند و به دلیل زبری مهندسی‌شده‌ای که نیروی چسبندگی ذرات گرد و غبار را کاهش می‌داد، خاصیت دفع گرد و غبار عالی‌ای از خود نشان دادند. آزمایش‌های انجام‌شده در فضای باز نشان داد که پوشش این لایه‌ها عملکرد بهتری نسبت به شیشه‌های بدون پوشش داشت، به دلیل قابلیت خودتمیزشوندگی آن‌ها. با این حال، آزمایش‌هایی که برای مدت زمان طولانی‌تر انجام شد، تأیید کردند که سطح فوق‌آب‌دوست کمتر تحت تأثیر فرآیند سیمان‌تاسیون مولکول‌های سخت آب آلی قرار گرفته و بالاترین سطح مزیت را ارائه می‌دهد. بنابراین، لایه‌های فوق‌آب‌دوست وقتی برای برنامه‌های بهره‌برداری از انرژی خورشیدی استفاده می‌شوند، مزایای بالقوه‌ای دارند. شکل ۱۲ آینه‌های خورشیدی با بافت نانوذرات ضدآلودگی که بسیار بازتابنده هستند و بدون پوشش، با پوشش فوق‌آب‌دوست (SPH)، و با پوشش فوق‌آب‌گریز (SP) همراه با اندازه‌گیری‌های زاویه تماس آب روی آینه‌های پوشش‌دار و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) را نشان می‌دهد. جدول ۲ ترکیب شیمیایی پوشش‌های SP و SPH که با تجزیه و تحلیل اشعه ایکس توسط فوتوالکترون‌های برانگیخته (XPS) تعیین شده‌اند را خلاصه می‌کند [۴۵].

۶- کاهش نیروی چسبندگی در پوشش SHP

نیروی وان در والس بین ذرات گرد و غبار و سطح در صورت افزایش زبری سطح برای سطوح هم فوق‌آب‌دوست و هم فوق‌آب‌گریز کاهش می‌یابد. محاسبات نظری نشان می‌دهند که چسبندگی سطح SPH نسبت به سطوح SP تا 30% بیشتر است، اما اندازه‌گیری‌های عملی نشان می‌دهند که این نیرو کمی کمتر از سطوح SP است. همانطور که هر دو روش تأیید کرده‌اند، زبری سطح نقش مهمی در تعیین رابطه بین نیروی چسبندگی و

گروه‌های هیدروکسیل است که به جذب مولکول‌های آب بر روی سطح کمک می‌کند. شکل ۹ فرآیند پوشش‌دهی ساده‌ای را بر اساس رزین فاز اسفنجی و سطح پنل‌های PV پس از پوشش‌دهی نشان می‌دهد [۲۸]. شکل ۱۰ سطح ماژول‌های مختلف (PV) بر پایه فناوری (Si) را نمایش می‌دهد که دو ماژول پوشش‌دهی شده و دیگری بدون پوشش به عنوان مرجع باقی مانده‌اند. در شکل ۱۱، می‌توانیم نسبت عملکرد روزانه نرمال‌شده (PR) آرایه‌های B (بدون پوشش، که در اینجا NPRB نامیده می‌شود و C با پوشش، که در اینجا NPRC نامیده می‌شود) را مشاهده کنیم، که دو برابر نسبت PR روزانه نرمال‌شده آرایه‌های B و C است. می‌توان مشاهده کرد که نسبت NPR پوشش‌دهی شده به ماژول بدون پوشش بیش از ۱ است، که نشان‌دهنده ارزش افزوده پوشش بر عملکرد ماژول است [۲۸].



شکل ۹. (الف) روش پوشش با استفاده از رزین فاز اسفنجی. (ب) سطح ماژول‌های PV [۲۸].

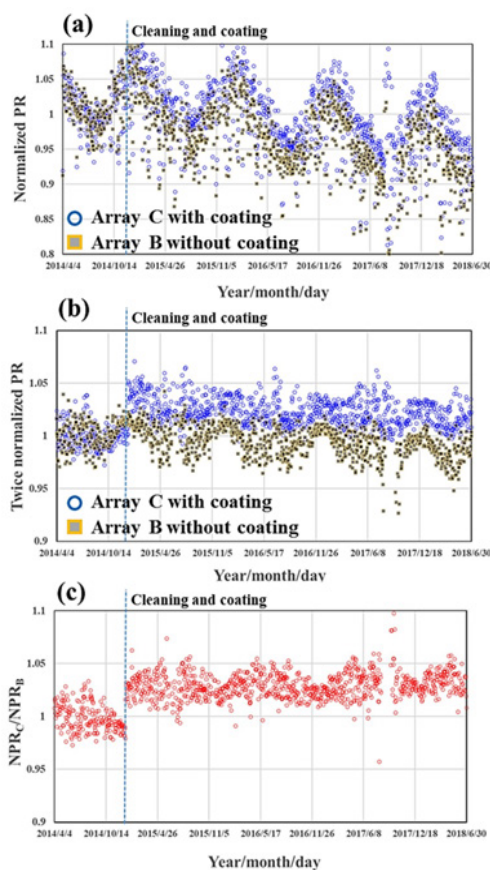
Figure 9. (A) Coating method using sponge phase resin; (B) surface of the PV modules [28].



شکل ۱۰. سطح ماژول‌های PV سیلیکونی. دو ماژول پوشش داده شدند (ماژول‌های X و X') و دو ماژول دیگر برای عمل به عنوان مرجع پوشش داده نشدند (ماژول‌های Y و Y') [۲۸].

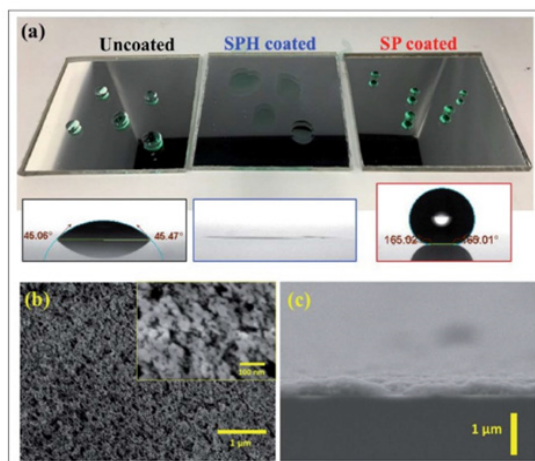
Figure 10. The surface of silicon PV modules. Two modules were coated (modules X and X') and the other two modules were not coated to act as references (modules Y and Y') [28].

در مطالعه‌ای توسط وانگ^۱ و همکاران [۴۶]، کنترل نرخ جریان اکسیژن در طول رشد فیلم‌های سیلیکا می‌تواند به تغییر



شکل ۱۱. (الف) نسبت کارایی روزانه استاندارد شده (PR) برای مجموعه‌های (NPRB) B، (NPRC) C (ب) دو برابر کردن نسبت کارایی روزانه استاندارد شده PR برای مجموعه‌های C و B، و (ج) NPRC بر NPRB [۲۸].

Figure 9. (a) Normalized daily performance ratio (PR) of arrays B (NPRB) and C (NPRC), (b) twice normalized daily PR of arrays B and C (NPRB and NPRC were divided by the normalized daily PR of reference array A), and (c) NPRC/NPRB [28].



شکل ۱۲. (الف) آینه‌های خورشیدی نانوذره‌ای با بازتاب بالا و ضد آلودگی (۶/۷ × ۶/۷ سانتی متر مربع) بدون پوشش، با پوشش ابرآبدوست (SPH) و پوشش ابرآبریز (SP) درجه‌ها میزان زاویه تماس آب را روی آینه‌های دارای پوشش نشان می‌دهند (حجم قطره آب اندازه‌گیری شده = ۵–۱۰ میکرولیتر) (ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح آینه پوشش‌دار، که ویژگی‌های نانوساختار SPH را نشان می‌دهد (ج) نمای مقطع SEM از پوشش SPH [۴۵].

Figure 12. (a) Highly reflective, anti-soiling nanoparticle texture solar mirrors (7.6 × 7.6 cm²) with no coating, super-hydrophilic (SPH) coating, and super-hydrophobic (SP) coating. Insets are water contact angle measurements on the coated mirrors (the measured water droplet volume = 5–10 μL). (b) SEM images of the coated mirror surface show characteristics of SPH nanotexturing. (c) SEM cross-sectional view of SPH coating [45].

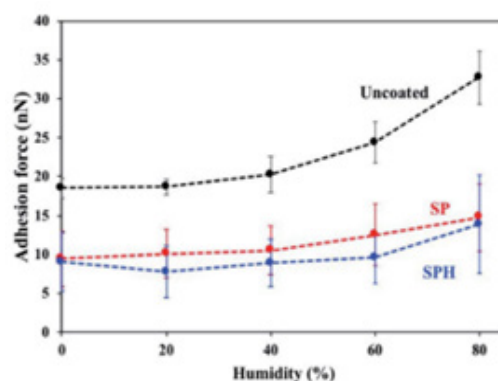
جدول ۲. ترکیب شیمیایی پوشش SP و SPH تعیین شده توسط XPS [۴۵].

Table2. Chemical composition of SP and SPH coating determined by XPS [45].

	O-Si	O	Si-O	Si	C	C-Fx	F	O-Si/Si-O	C-Fx/F
Uncoated	53.7	6	27.1	0	7.2	0	0	2.0	-
SPH	53.1	10.0	27.1	3.0	6.3	0	0	2.0	-
SP	45.8	0.4	22.5	0.0	7.7	7.0	15.5	2.0	0.45

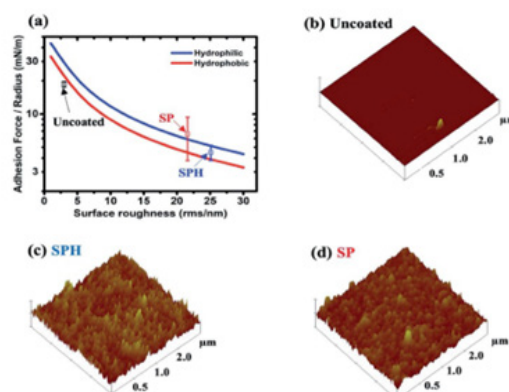
همراه با تحلیل مورفولوژی سطح AFM برای سطح بدون پوشش، و سطوح پوشش‌داده شده با SPH و SP [۴۵].
زبری سطح پنل‌های خورشیدی تأثیر مهمی بر روی تجمع و پاک‌سازی ذرات گرد و غبار دارد [۴۸]. سطحی که زبر باشد، به خصوص اگر با پوشش ابرآب‌گریز پوشیده شده باشد، مانع از

بستر پوشش‌دار دارد. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیروی چسبندگی ذرات گرد و غبار کروی که بر روی آینه‌های پوشش‌داده شده با SPH، پوشش‌داده شده با SP و بدون پوشش متناسب با رطوبت نسبی، و نیروهای چسبندگی اندازه‌گیری شده در مقابل محاسبه شده بین یک کره سیلیکا و سطوح SP و SPH را به ترتیب نشان می‌دهند،



شکل ۱۳. نیروی چسبندگی ذرات گرد و غبار کروی با قطر ۶ میلی متر بر روی آینه‌های پوشش‌داده شده با SPH، پوشش‌داده شده با SP و بدون پوشش به عنوان تابعی از رطوبت نسبی [۴۵].

Figure13. Adhesive force of spherical dust particles with 6 mm diameters on SPH-coated, SP-coated, and uncoated mirrors as a function of relative humidity [45].



شکل ۱۴. (الف) اندازه گیری و محاسبه نیروی چسبندگی بین کره سیلیسی (قطر ۱۵ میلی متر) و سطوح SP و SPH. تجزیه و تحلیل مورفولوژی سطح AFM (ب) سطح بدون پوشش، (ج) پوشش SPH، و (د) پوشش SP [۴۵].

Figure14. (a) Measured and calculated adhesion force between a silica sphere (15 mm diameter) and SP and SPH surfaces. AFM surface morphology analysis of (b) uncoated surface, (c) SPH coating, and (d) SP coating [45].

با زبری مشخص روی زیرلایه‌ای است تا شفافیت بالایی حاصل شود. ماده‌ای با انرژی سطحی کم که دارای گروه‌های CF_3 - یا CH_3 - است [۵۱، ۵۲]، با استفاده از روش رسوب‌دهی بخار شیمیایی یا غوطه‌وری بر روی فیلم متخلخل قرار گرفت تا خاصیت فوق‌هیدروفوبیک ایجاد شود. از آنجایی که لایه مولکولی با انرژی کم معمولاً بسیار نازک است و ضخامتی تنها چند نانومتر دارد، تقریباً تأثیری بر شفافیت ندارد.

شکل‌های ۱۴ الف و ب، تصاویر AFM سه‌بعدی از پوشش‌های AR فوق‌هیدروفوبیک را نشان می‌دهند که به ترتیب با استفاده از سل‌ژل‌های (PAH/PAA)^۱ در عملیات‌های حرارتی متفاوت (۹۶ و ۱۶۸ ساعت) پوشش‌دهی چرخشی شده‌اند. مقادیر زبری RMS که در شکل‌های ۱۵ الف و ب نمایش داده شده‌اند، به ترتیب ۴۷/۶ و ۲۵/۵ نانومتر هستند. مورفولوژی‌های سطحی که در شکل‌های ۱۴ الف و ب نشان داده شده‌اند، با یکدیگر متفاوت هستند. بررسی دقیق این مورفولوژی‌ها نشان می‌دهد که ساختارهای با اندازه زیر میکرومتر از تعداد زیادی ساختارهای نانومتری تشکیل شده‌اند، که این امر سطح را شبیه به سطح برگ لوتوس می‌کند.

۷- عملکرد ضد آلودگی و خود تمیز شوندگی آینه پوشش‌دار SPH

لایه‌های فوق‌آب‌دوست روی آینه‌ها خاصیت فوق‌العاده‌ای در خودتمیزشوندگی از خود نشان می‌دهند. طبق نمایش در شکل ۱۶،

نشستن ذرات گرد و غبار بر روی پنل‌های PV می‌شود. این نوع پوشش به بازپرتاب و بازمعلق شدن ذرات کمک کرده و به طور مؤثری از چسبیدن ذرات گرد و غبار به ماژول‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین، زبری سطح بر قابلیت خودتمیزکنندگی پنل‌های PV تأثیر می‌گذارد، چرا که قطرات آب می‌توانند به سرعت بر روی سطح حرکت کرده و ذرات گرد و غبار را پاک کنند [۴۹، ۵۰]. با این حال، باید توجه داشت که پوشش‌های ابرآب‌گریز ممکن است با مشکلاتی مانند استحکام مکانیکی ناکافی و سرعت تخریب بالا روبرو شوند که نیاز به تحقیقات بیشتر و راه‌حل‌های بهتر دارند. در مجموع، زبری سطح، به ویژه هنگامی که با پوشش‌های فوق‌آب‌گریز تقویت شده، نقش کلیدی در جلوگیری از تجمع گرد و غبار و حفظ بازدهی پنل‌های PV ایفا می‌کند [۴۹]. جدول ۳ خلاصه‌ای از ویژگی‌های هیدروفوبیک، پارامترهای زبری و میانگین عبور نور مرئی برخی از پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک موجود در مقالات علمی را ارائه می‌دهد. عبور نور از یک پوشش فوق‌آب‌گریز با زبری RMS بیش از چند صد نانومتر به طور واضح نمی‌تواند به ۹۵٪ برسد، زیرا پراکندگی شدید نور مرئی وجود دارد. چون یک سطح فوق‌آب‌گریز و یک پوشش با شفافیت بالا از نظر اصولی نمی‌توانند همزمان وجود داشته باشند، به نظر می‌رسد که ایجاد یک پوشش AR فوق‌هیدروفوبیک در یک مرحله امکان‌پذیر نباشد. یکی از روش‌هایی که به طور معمول برای تولید پوشش AR فوق‌هیدروفوبیک به کار می‌رود، ساخت یک فیلم متخلخل

جدول ۳. ویژگی‌های آب‌گریزی و عبوردهی نور برخی از پوشش‌های ضد بازتاب فوق‌آب‌گریز.

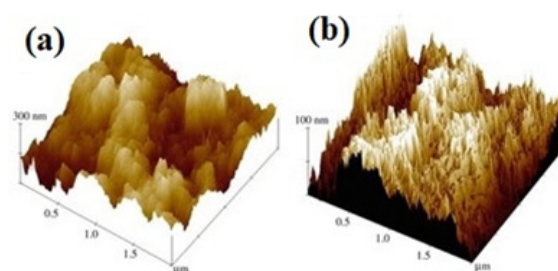
Table 3. Water repellency and transmittance characteristics of some superhydrophobic anti-reflective coatings.

Coating	Roughness(nm)	Transmittance (%)	Slide angle (°)	Contact angle hysteresis (°)	Contact angle(°)	Ref.
Hierarchical structure of zinc oxide	-	80	5	2	162	[53]
Superhydrophobic structure of silica	5.3	90-91	-	50	165	[54]
Superhydrophobic structure of silica	42.4-42.8	90-91	-	5-20	152-161	[55]
Silanized silica structure	90-120	93	<3	<5	160	[56]
Silicon nanofilament	-	94	20	-	160	[57]
Silanized silica structure	30	94	-	-	168	[58]

1- poly(allylamine hydrochloride)/poly(acrylic acid)

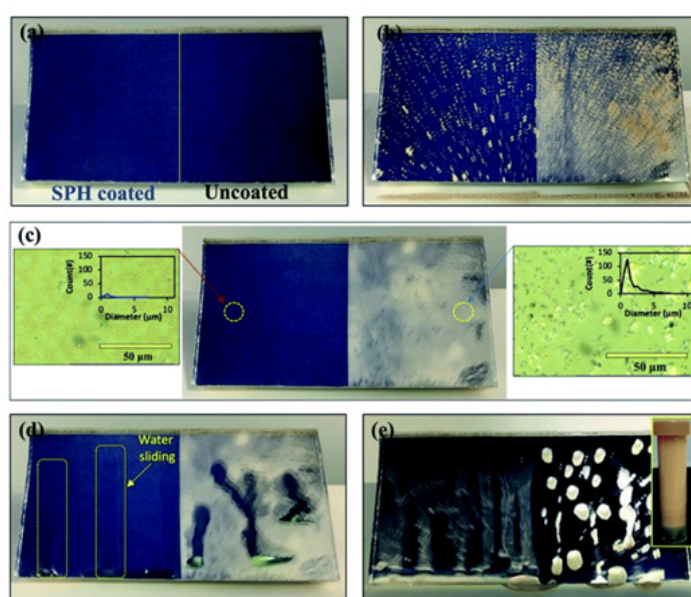
اکسید با بافت غیرمتخلخل خواص خودتمیزشوندگی برجسته‌ای را به دلیل فوق‌آبدوستی نشان داد. رفتار ترشوندگی این لایه‌ها منجر به کاهش انرژی چسبندگی سطح شد. در مقایسه با سطح فوق‌آب‌گریز، کارایی کاهش گرد و غبار $2/5$ برابر بالاتر بود و دلیل آن کاهش سیمانتاسیون آلی بود. به طور کلی، می‌توان ثابت کرد که یک سطح فوق‌آبدوست با ایجاد بافت روی سطح، آبدوست است و این مورفولوژی به شدت به فشار گاز پس‌زمینه وابسته

روی آینه‌ای با زاویه‌ی 45° درجه که نیمی از آن پوشش‌دار و نیم دیگر بدون پوشش است، ذرات گرد و غبار به ندرت روی سطح پوشش‌دار پراکنده شده‌اند، در حالی که توده‌های بزرگی از ذرات گرد و غبار فشرده بر روی سطح بدون پوشش مشاهده شدند. یک شبیه‌سازی مصنوعی انجام شد تا هوای اصلی را تقلید کند و معلوم شد که سطح به طور مؤثر با زدودن ذرات گرد و غباری که به آن به آرامی چسبیده بودند، تمیز شده است. توسعه لایه‌های سیلیکا



شکل ۱۵. تصاویر سه‌بعدی AFM از پوشش‌های AR فوق‌هیدروفوبیک که با استفاده از (الف) سل ژل (۹۶ ساعت)، (ب) سل ژل (۱۶۸ ساعت) پوشش‌دهی چرخشی شده‌اند [۵۹].

Figure 15. 3D AFM images of superhydrophobic AR coatings spin-coated using (a) sol-gel (96 h), (b) sol-gel (168 h) [59].

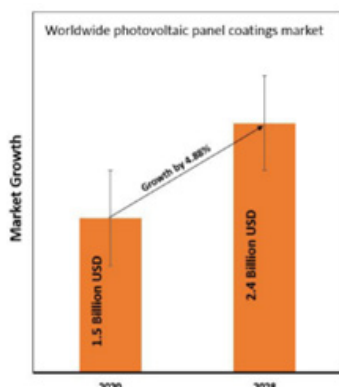


شکل ۱۶. بررسی آلودگی روی آینه‌ای ($15/2 \times 7/6$ سانتی‌متر مربع) که نیمی از سطح آن با نانوذرات پوشش داده شده تا ویژگی‌های SPH را به دست آورد (الف) آینه نیمه پوشش‌دار در زاویه 45° درجه (ب) آلودگی اولیه (۱ گرم) روی آینه، (ج) انباشت گرد و غبار روی سطح آینه پس از استفاده از ایربراش. درج‌ها تصاویر میکروسکوپ نوری (بزرگنمایی $\times 5000$) از آلودگی روی آینه با پوشش SPH و آینه بدون پوشش پس از ایربراش هستند (د) چکاندن آب روی سطح آینه‌ها. آب با رنگ‌دانه سبز رنگ شده بود (ه) آب پس از چکاندن روی سطح آینه‌ها، خاک را پراکنده می‌کند. درج نشان‌دهنده سوسپانسیون خاک است که از سوسپانسیون خاک و آب با غلظت $1/0$ گرم بر میلی‌لیتر شن درشت جمع‌آوری شده است

ISO 12103-1 A4 Coarse Sand [۴۵].

Figure 16. Observation of soiling on a mirror (15.2×7.6 cm²) with half its area coated with nanoparticles to give it SPH properties. (a) A half-coated mirror at 45° elevation, (b) initial soiling (1 g) on the mirror, (c) dust accumulation on the mirror surface after airbrushing. Insets are optical microscope ($5000\times$ magnification) images of soiling on an SPH-coated mirror and an uncoated mirror after airbrushing. (d) Water dripping on the mirror surfaces. The water was colored with a green dye. (e) Water disperses soil after dripping on the mirror surfaces. Inset is the suspended soil collected from the suspension in 0.1 g mL⁻¹ of soil and water mixture (ISO 12103-1 A4 Coarse Sand) [45].

به حدود ۲۳۱۸ میلیون دلار برسد، که این رقم از بازار ~ ۱۵۰۰ میلیون دلاری در سال ۲۰۲۰ بیشتر است. انگیزه اصلی برای این توسعه، همکاری مشترک بین شرکت‌های خصوصی و دولتی است تا به نیازهای پایداری پاسخ دهند [۶۲].



شکل ۱۷. بازار جهانی پوشش پانل‌های خورشیدی [۶۲].

Figure 17. Global solar panel coating market [62].

تحقیقات بازار تحت تأثیر چهار ویژگی مهم قرار دارد: ضدانعکاس، خودتمیزکنندگی، ضدآلودگی و ضدسایش. توسعه پوشش‌های ضدانعکاس به سرعت در حال افزایش است تا مدیریت نور بهبود یابد و در نتیجه کارایی کلی دستگاه‌ها ارتقا پیدا کند. پوشش‌های سطحی آب‌گریز انتظار می‌رود که در مناطق با ارتفاعات بالا مورد توجه قرار گیرند، چرا که اجازه نمی‌دهند آب روی سطح باقی بماند. شکل ۱۸ تحلیل تقسیم‌بندی بازار پوشش‌های پنل‌های خورشیدی را نشان می‌دهد [۶۳]. در حال حاضر، برخی تولیدکنندگان در حال توسعه تولید انبوه پوشش‌های فیلم نازک هستند، از جمله:

- Arkema
- Fenzi SpA
- NanoTech Products
- Koninklijke DSM
- PPG
- Unelko

تقاضای زیادی برای گسترش بازار وجود دارد که ناشی از ابتکارات و تشویق‌هایی است که توسط دولت‌های مختلف ارائه شده‌اند. بازار پوشش‌های پنل‌های PV تقریباً متناسب با تولید ماژول‌های PV است. انگیزه برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل نگرانی‌های مربوط به تغییرات زیست‌محیطی بسیار مهم است. آسیا پاسیفیک در سال ۲۰۱۷ بزرگترین سهم بازار را در بازار جهانی داشته است. انتظار می‌رود که بازار در سال‌های آتی به شکل چشمگیری رشد کند، که پس از آن آمریکای شمالی و اروپا قرار دارند. دوره پیش‌بینی شده برای رشد در منطقه آسیا اقیانوسیه با در نظر گرفتن

است [۶۰].

برای سطح یکنواخت،

$$\cos \theta = (\mu_1 - \mu_2) / \mu_3 \quad (۱)$$

$$\mu_3 \times \cos \theta = (\mu_1 - \mu_2) \quad (۲)$$

با بافت،

$$\mu_3 \times \cos \theta = \varphi (\mu_1 - \mu_2) - (1 - \varphi) \mu_3 \quad (۳)$$

که φ نشان‌دهنده بخش ناچیزی از سطح است که توسط بافت‌داری پوشانده شده، θ زاویه قطره، μ_3 تنش بین مایع و بخار، μ_1 تنش بین سطح و بخار، μ_2 تنش بین سطح و مایع است. این مکانیسم به خوبی مستقر شده و به عنوان نظریه ونزل و کسی-بکستر شناخته می‌شود [۶۰]. برای یک سطح فوق‌آب‌گریز، قطره آب با استفاده از نیروی گرانش، ذرات گرد و غبار را پایین می‌راند. در میان همه انواع مواد، SiO_2 به دلیل خصوصیات تجربی‌اش، پوشش ضدآلودگی برتر است. تاکنون، روش‌های متفاوتی برای افزایش دوام سطوح فوق‌آب‌گریز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها شامل ایجاد لایه‌های SiO_2 با استفاده از نانوذرات، مواد با انرژی سطحی کم، پلیمرها، لایه‌های ترکیبی سلولز SiO_2 و ساختارهای میکرو/نانوسلسله‌ای بهینه‌شده می‌باشند [۶۱]. در برخی مناطق جهان، برف به عنوان یک عامل کاهش‌دهنده عملکرد خروجی پنل‌های خورشیدی عمل می‌کند. برف به عنوان ماده‌ای با بازتاب بالا شناخته می‌شود که می‌تواند میزان تابش خورشیدی را کاهش دهد و ممکن است به کاهش عملکرد پنل‌های خورشیدی منجر شود. هر دو نوع سطح فوق‌آب‌گریز و فوق‌آب‌دوست به عنوان راه‌حل‌هایی برای جلوگیری از تشکیل یخ به همراه گرمایش سطح پیشنهاد شده‌اند، اما تا به امروز هیچ سطح کاملاً ضدیخی نشان داده نشده است.

۸- نمای کلی بازار پوشش‌های پنل خورشیدی

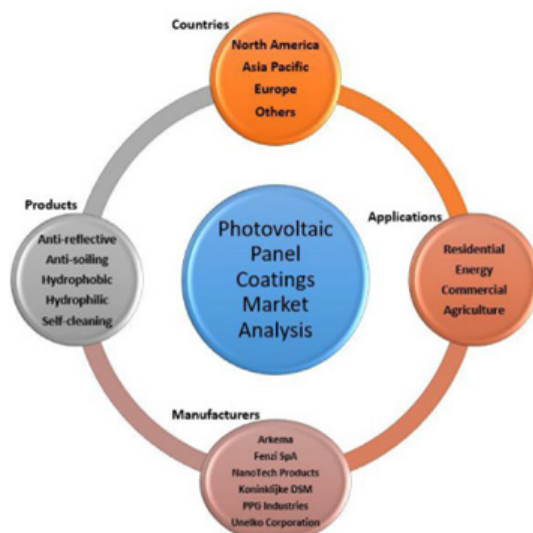
انرژی پاک حاصل از پنل‌های خورشیدی (PV) به ویژه در مناطقی که با کمبود آب مواجه هستند، بیشترین میزان توجه را به خود اختصاص داده است. هرچند که تکنولوژی‌های متفاوتی در بازار PV کنونی وجود دارند، عملکرد به شکل قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر از دست رفتن بازتاب و مشکلات آلودگی است. از این رو، روش‌های متنوعی برای توسعه فیلم‌های نازک با قابلیت‌های گوناگون نظیر ضدانعکاس، ضدآلودگی، ضدمه و غیره ایجاد شده‌اند. شکل ۱۷ بازار جهانی پوشش پنل‌های خورشیدی را نمایش می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود که بازار فناوری پوشش PV در سراسر جهان تا سال ۲۰۲۶

شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش دهند. نتایج تحقیقات نشان‌دهنده تفاوت‌های بزرگ در عملکرد ضدآلودگی پوشش‌ها بسته به مدت زمان قرارگیری و مکان هستند. به طور کلی، هم بهبود و هم کاهش عملکرد ضدآلودگی در پوشش‌ها در مقایسه با شیشه‌ی مرجع بدون پوشش مشاهده شده است. تحقیقات درباره‌ی ارتباط بین ضرر آلودگی روزانه و پارامترهای آب و هوایی نشان می‌دهد که علاوه بر بارش و غلظت ذرات در هوا، شبنم و تعامل آن با پوشش‌ها نیز پارامتر تأثیرگذار مهمی است که به شدت بر نرخ‌های آلودگی تأثیر می‌گذارد. با بررسی دو پوشش بسیار امیدوارکننده با خواص چسبندگی بسیار پایین، مزیت کلی عملکرد برای یک سطح هیدروفوبیک در مناطق با رطوبت بالا (ساحلی) و یک سطح هیدروفوبیک در مناطق خشک (بیابان مرکزی) بیشتر است. همچنین، تکنیک‌های موجود در بازار برای کاهش مشکل آلودگی

نصب ماژول‌های خورشیدی روی پشت‌بام در فضاهای مسکونی و تجاری از سال ۲۰۱۷ تا ۲۰۲۶ است. جدول ۴، شرکت‌های تجاری برتر بازار ADC را خلاصه می‌کند.

۹- نتیجه‌گیری

آلودگی در ماژول‌های PV می‌تواند به شکل قابل توجهی بازده انرژی را کاهش دهد، به خصوص در مناطق بیابانی که به دلیل بالا بودن غلظت گرد و غبار معلق در هوا، وقوع طوفان‌های گرد و غبار مکرر و بارندگی‌های نادر، این مشکل بیشتر است. استقرار گسترده‌ی فعلی PVها در بیابان‌ها نیازمند استراتژی‌های مناسب و اقتصادی برای کاهش آلودگی است. در این زمینه، پوشش‌های ضدآلودگی می‌توانند راه‌حلی امیدبخش باشند چرا که می‌توانند تجمع گرد و غبار و ضررهای ناشی از آلودگی را به



شکل ۱۸. شرکت‌های تجاری برتر در بازار ADC [۶۳].

Figure18. ADC market-dominating commercial companies [63].

جدول ۴. شرکت‌های تجاری برتر در بازار ADC [۶۳].

Table4. ADC market-dominating commercial companies [63].

Name of the Company	Name of the Product	Date of Launching the Product	Specifications	Manufacturing
MoreSun	Talus Dirt Rejection Technology	2014	-	Country
DSM	Core-shell particle technology	-	Significantly better	USA
3M	Anti-soiling liquid 600	2012	anti-soiling properties	China

The consortium comprises leading commercial and academic partners, including: Opus Materials Technologies, TWI, Only Solar, The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission (CEA) London South Bank University (LSBU), Arctic (Advanced Resins & Coatings Technologies Innovation Centre), and a supply chain capability in Millidyne.	Solar Sharec	2020	Functionalized silica nanoparticles (30–500)	USA
BASF SE	RELESTe Powder PUR Anti-Sticker c	2014	Powder coating	Germany
PPG Industries, Inc.	PPG High Performance Coatings	2012	Coating with organic material with silicon-containing compounds	USA
Rads Global Business	-	2021	To reduce cleaning cost by around 60%. The anti-reflective and anti-corrosive coating is also said to mitigate potential-induced degradation	Netherlands
Sherwin-Williams	Acrylic latex paint	2020	Self-cleaning	USA
Taypro Private Limited	Anti-dust solar shield	2020	Anti-dust thin film coating	India
HYDRASOL	HYDRASOL NANO COATING	2019	Appearance: colorless, liquid Coating thickness: less 1 micron	India

از نظر فرآیند رشد، تحلیل هزینه، تولید انبوه و انتخاب مواد را ثبت شده است. این مرور جامع نشان می‌دهد که تکنیک‌ها و مواد متنوعی وجود دارند که می‌توان بر اساس نیازهای مشخص به کار گرفت. در حال حاضر، هم تکنیک‌های تمیزکنندگی فعال و هم تکنیک‌های غیرفعال برای کاربردهای ضدآلودگی مناسب هستند. با این حال، بازار هنوز در مرحله توسعه پوشش‌های مناسبی است که ویژگی‌های چندگانه‌ای مانند ضدانعکاسی و ضدآلودگی را داشته باشند.

۱۰- مراجع

- [1] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, "A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches," *Renewable and sustainable energy Reviews*, vol. 22, pp. 698-733, 2013.
- [2] K. A. Walz, T. D. Hoege, J. W. Duensing, W. A. Zeltner, and M. A. Anderson, "Field tests of a self-sintering, anti-soiling, self-cleaning, nanoporous metal oxide, transparent thin film coating for solar photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 262, p. 112560, 2023.
- [3] A. Abhinav, R. Banavath, and S. Mallick, "Development of Mechanically Robust Antisoiling Coatings for Photovoltaic Module Efficiency Retention," *ACS Applied Engineering Materials*, vol. 1, no. 8, pp. 2050-2061, 2023.
- [4] H. K. Raut, V. A. Ganesh, A. S. Nair, and S. Ramakrishna, "Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review," *Energy & Environmental Science*, vol. 4, no. 10, pp. 3779-3804, 2011.
- [5] Y.-L. Zhang, H. Xia, E. Kim, and H.-B. Sun, "Recent developments in superhydrophobic surfaces with unique structural and functional properties," *Soft Matter*, vol. 8, no. 44, pp. 11217-11231, 2012.
- [6] R. Roth, C. Ballif, and V. Chapuis, "Effect of soiling on performances of crystalline silicon PV modules deployed in an arid climate in relation to front glass texture and treatment," *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne*, 2012.
- [7] P. D. Burton and B. H. King, "Artificial soiling of photovoltaic module surfaces using traceable soil components," in *2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2013: IEEE, pp. 1542-1545.
- [8] R. Bagnold, "The Physics of blown sand and desert dust," *Methuen and Co Ltd*, London, 1965.
- [9] J. Herrmann, T. Lorenz, K. Slamova, E. Klimm, M. Koehl, and K.-A. Weiss, "Desert applications of PV modules," in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014: IEEE, pp. 2043-2046.
- [10] J. Berghold and P. Grunow, "From the Impact of Harsh Climates and Environmental Conditions on pv-Modules-Development of a Soiling and Abrasion test," in *Proceedings of the 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands, 2014, pp. 23-25.
- [11] N. D. Papadopoulos, P. Vourna, K. Milidonis, A. Eliades, and P. Falaras, "Fostering wider application of anti-soiling strategies in existing solar power plants: A comparative study of novel quaternarized silica hybrids with commercial self-cleaning coatings," *Materials Chemistry and Physics*, p. 129046, 2024.
- [12] Y.-B. Park, H. Im, M. Im, and Y.-K. Choi, "Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, no. 3, pp. 633-636, 2011.
- [13] A. Bentouaf, R. Mebsout, H. Rached, S. Amari, A. Reshak, and B. Aïssa, "Theoretical investigation of the structural, electronic, magnetic and elastic properties of binary cubic C15-Laves phases TbX₂ (X= Co and Fe)," *Journal of alloys and compounds*, vol. 689, pp. 885-893, 2016.
- [14] G. Rossi, C. Altavilla, P. Scarfato, P. Ciambelli, and L. Incarnato, "Deposition of transparent and flexible nanolayer barrier on standard coating materials for photovoltaic devices," *Surface and Coatings Technology*, vol. 239, pp. 200-205, 2014.
- [15] B. Aïssa and M. M. Khayyat, "Self-healing materials systems as a way for damage mitigation in composites structures caused by orbital space debris," *Handbook of Research on Nanoscience, Nanotechnology, and Advanced Materials*, pp. 1-25, 2014.
- [16] J. Hu, N. Bodard, O. Sari, and S. Riffat, "CFD simulation and validation of self-cleaning on solar panel surfaces with superhydrophilic coating," *Future Cities and Environment*, vol. 1, pp. 1-15, 2015.
- [17] W. Oh and S.-I. Chan, "The performance loss by the soiling of photovoltaic modules," *Journal of*

the Korean Solar Energy Society, vol. 35, no. 2, pp. 63-71, 2015.

[18] M. K. Mazumder, M. N. Horenstein, C. Heiling, J. W. Stark, A. Sayyah, J. Yellowhair, and A. Raychowdhury, "Environmental degradation of the optical surface of PV modules and solar mirrors by soiling and high RH and mitigation methods for minimizing energy yield losses," in 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015: IEEE, pp. 1-6.

[19] A. Afzal, A. Habib, I. Ulhasan, M. Shahid, and A. Rehman, "Antireflective self-cleaning TiO₂ coatings for solar energy harvesting applications," *Frontiers in materials*, vol. 8, p. 687059, 2021.

[20] E. Fares, B. Aïssa, and R. Isaïfan, "Inkjet printing of metal oxide coatings for enhanced photovoltaic soiling environmental applications," *Global Journal of Environmental Science and Management*, vol. 8, no. 4, pp. 485-502, 2022.

[21] T. Zimmermann et al., "Sol-gel coatings for solar cover glass: Influence of surface structure on dust accumulation and removal," *Solar Energy*, vol. 267, p. 112264, 2024.

[22] M. G. Salvaggio, R. Passalacqua, S. Abate, S. Perathoner, G. Centi, M. Lanza, and A. Stassi, "Functional nano-textured titania-coatings with self-cleaning and antireflective properties for photovoltaic surfaces," *Solar energy*, vol. 125, pp. 227-242, 2016.

[23] K. K. Ilse et al., "Particle size-dependent adhesion forces and wind removal efficiency of anti-soiling coatings on textured solar glasses," *MRS Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 964-970, 2019.

[24] M. Gostein, J. R. Caron, and B. Littmann, "Measuring soiling losses at utility-scale PV power plants," in 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014: IEEE, pp. 0885-0890.

[25] K. Ilse et al., "Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation," *Joule*, vol. 3, no. 10, pp. 2303-2321, 2019.

[26] A. Gholami, A. Saboonchi, and A. A.

Alemrajabi, "Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications," *Renewable energy*, vol. 112, pp. 466-473, 2017.

[27] A. Ayaz, H. Ahmad, F. Ahmad, A. Khan, S. hasnain Tarmazi, and R. M. Gul, "Self-cleaning of glass surface to maximize the PV cell efficiency," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 899, no. 1: IOP Publishing, p. 012006.

[28] K. Nishioka, S. P. Moe, and Y. Ota, "Long-term reliability evaluation of silica-based coating with antireflection effect for photovoltaic modules," *Coatings*, vol. 9, no. 1, p. 49, 2019.

[29] P. Pandiyan, S. Saravanan, T. Chinnadurai, T. Ramji, N. Prabakaran, and S. Umashankar, "Mitigation techniques for removal of dust on solar photovoltaic system," *Electrical and Electronic Devices, Circuits, and Materials: Technological Challenges and Solutions*, pp. 373-392, 2021.

[30] A. M. Law, L. O. Jones, and J. M. Walls, "The performance and durability of Anti-reflection coatings for solar module cover glass—a review," *Solar Energy*, vol. 261, pp. 85-95, 2023.

[31] S. Manna, D. Adak, S. Manna, S. Maity, S. Jana, R. Bhattacharya, and S. K. Medda, "Antireflection cum photocatalytic with superhydrophilic based durable single layer mesoporous TiO₂-ZrO₂ coating surface for efficient solar photovoltaic application," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 57, p. 103236, 2023.

[32] J. Rayleigh, "On reflection of vibrations at the confines of two media between which the transition is gradual," *Proc. London Math. Soc.*, vol. 11, pp. 51-56, 1880.

[33] Y. Fink, J. N. Winn, S. Fan, C. Chen, J. Michel, J. D. Joannopoulos, and E. L. Thomas, "A dielectric omnidirectional reflector," *Science*, vol. 282, no. 5394, pp. 1679-1682, 1998.

[34] W. Zhao et al., "Sol-gel synthesis of TiO₂-SiO₂ hybrid films with tunable refractive index for

broadband antireflective coatings covering the visible range,” *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 107, no. 1, pp. 105-121, 2023.

[35] S. Li et al., “Structure and antireflection properties of SiNWs arrays form mc-Si wafer through Ag-catalyzed chemical etching,” *Applied Surface Science*, vol. 369, pp. 232-240, 2016.

[36] G. Jia, Z. Ji, H. Wang, and R. Chen, “Preparation and properties of five-layer graded-refractive-index antireflection coating nanostructured by solid and hollow silica particles,” *Thin Solid Films*, vol. 642, pp. 174-181, 2017.

[37] W. Tien and A. Chu, “Double-layer ITO antireflection electrodes fabricated at low temperature,” *Solar energy materials and solar cells*, vol. 100, pp. 258-262, 2012.

[38] B.-K. Shin, T.-I. Lee, J. Xiong, C. Hwang, G. Noh, J.-H. Cho, and J.-M. Myoung, “Bottom-up grown ZnO nanorods for an antireflective moth-eye structure on CuInGaSe₂ solar cells,” *Solar energy materials and solar cells*, vol. 95, no. 9, pp. 2650-2654, 2011.

[39] Y.-J. Peng, H.-X. Huang, and H. Xie, “Rapid fabrication of antireflective pyramid structure on polystyrene film used as protective layer of solar cell,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 171, pp. 98-105, 2017.

[40] K. Choi, S. H. Park, Y. M. Song, Y. T. Lee, C. K. Hwangbo, H. Yang, and H. S. Lee, “Nano-tailoring the surface structure for the monolithic high-performance antireflection polymer film,” *Advanced Materials*, vol. 22, no. 33, pp. 3713-3718, 2010.

[41] M. Mazur et al., “Functional photocatalytically active and scratch resistant antireflective coating based on TiO₂ and SiO₂,” *Applied Surface Science*, vol. 380, pp. 165-171, 2016.

[42] H.-M. Li et al., “Enhancement of light absorption using high-k dielectric in localized surface plasmon resonance for silicon-based thin film solar cells,” *Journal of Applied Physics*, vol. 109, no. 9, 2011.

[43] S. Toth et al., “Soiling and cleaning: Initial

observations from 5-year photovoltaic glass coating durability study,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 185, pp. 375-384, 2018.

[44] K. Ali, S. A. Khan, and M. Z. M. Jafri, “Structural and optical properties of ITO/TiO₂ anti-reflective films for solar cell applications,” *Nanoscale research letters*, vol. 9, pp. 1-6, 2014.

[45] G. G. Jang, D. B. Smith, G. Polizos, L. Collins, J. K. Keum, and D. F. Lee, “Transparent superhydrophilic and superhydrophobic nanoparticle textured coatings: Comparative study of anti-soiling performance,” *Nanoscale Advances*, vol. 1, no. 3, pp. 1249-1260, 2019.

[46] L. Wang et al., “Effect of oxygen flow rate on microstructure properties of SiO₂ thin films prepared by ion beam sputtering,” *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 482, pp. 203-207, 2018.

[47] B. Aïssa and M. El Khakani, “The channel length effect on the electrical performance of suspended-single-wall-carbon-nanotube-based field effect transistors,” *Nanotechnology*, vol. 20, no. 17, p. 175203, 2009.

[48] B. Nomeir, S. Lakhoul, S. Boukheir, M. A. Ali, and S. Naamane, “Recent progress on transparent and self-cleaning surfaces by superhydrophobic coatings deposition to optimize the cleaning process of solar panels,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 257, p. 112347, 2023.

[49] Z. Quan, H. Lu, W. Zhao, C. Zheng, Z. Zhu, J. Qin, and M. Yue, “A review of dust deposition mechanism and self-cleaning methods for solar photovoltaic modules,” *Coatings*, vol. 13, no. 1, p. 49, 2022.

[50] X. Bu, H. Zhang, F. Tao, Y. Xiong, and L. Liu, “A transparent superhydrophobic film with excellent self-cleaning and UV resistance for photovoltaic panels,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 183, p. 107790, 2023.

[51] S. A. Mahadik, M. S. Kavale, S. Mukherjee, and A. V. Rao, “Transparent Superhydrophobic silica coatings on glass by sol-gel method,” *Applied surface science*, vol. 257, no. 2, pp. 333-339, 2010.

- [52] K.-C. Chang, Y.-K. Chen, and H. Chen, "Fabrication of highly transparent and superhydrophobic silica-based surface by TEOS/PPG hybrid with adjustment of the pH value," *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, no. 16, pp. 3822-3831, 2008.
- [53] J. Xiong, S. N. Das, B. Shin, J. P. Kar, J. H. Choi, and J.-M. Myoung, "Biomimetic hierarchical ZnO structure with superhydrophobic and antireflective properties," *Journal of colloid and interface science*, vol. 350, no. 1, pp. 344-347, 2010.
- [54] H. Shang, Y. Wang, S. Limmer, T. Chou, K. Takahashi, and G. Cao, "Optically transparent superhydrophobic silica-based films," *Thin Solid Films*, vol. 472, no. 1-2, pp. 37-43, 2005.
- [55] J. Bravo, L. Zhai, Z. Wu, R. E. Cohen, and M. F. Rubner, "Transparent superhydrophobic films based on silica nanoparticles," *Langmuir*, vol. 23, no. 13, pp. 7293-7298, 2007.
- [56] M. Manca, A. Cannavale, L. De Marco, A. S. Arico, R. Cingolani, and G. Gigli, "Durable superhydrophobic and antireflective surfaces by trimethylsilanized silica nanoparticles-based sol-gel processing," *Langmuir*, vol. 25, no. 11, pp. 6357-6362, 2009.
- [57] J. Zimmermann, F. A. Reifler, U. Schrade, G. R. Artus, and S. Seeger, "Long term environmental durability of a superhydrophobic silicone nanofilament coating," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 302, no. 1-3, pp. 234-240, 2007.
- [58] D. Goswami, S. K. Medda, and G. De, "Superhydrophobic films on glass surface derived from trimethylsilanized silica gel nanoparticles," *ACS applied materials & interfaces*, vol. 3, no. 9, pp. 3440-3447, 2011.
- [59] S.-D. Wang and Y.-Y. Shu, "Superhydrophobic antireflective coating with high transmittance," *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 10, pp. 527-535, 2013.
- [60] M. I. Hossain, B. Aissa, A. Samara, S. A. Mansour, C. A. Broussillou, and V. B. Benito, "Hydrophilic antireflection and antidust silica coatings," *ACS omega*, vol. 6, no. 8, pp. 5276-5286, 2021.
- [61] Y. Wang, Q. Zhang, P. Li, and J.-T. Huang, "A durable and sustainable superhydrophobic surface with intertwined cellulose/SiO₂ blends for anti-icing and self-cleaning applications," *Materials & Design*, vol. 217, p. 110628, 2022.
- [62] [Online]. Available: <https://www.verifiedmarketresearch.com/wp-content/uploads/2021/04/Solar-Panel-Coatings-Market-SizeAnd-Forecast.jpg>
- [63] [Online] Available: <https://www.verifiedmarketresearch.com/wp-content/uploads/2021/04/Solar-Panel-Coatings-MarketSegmentation-Analysis.jpg>