

مروری بر روش‌های حذف گرد و غبار از سطح پنل‌های فتولتاییک

اصلان غلامی (دانشجوی دکتری)

شهاب اسلامی (دانشجوی دکتری)

آرین تاجیک (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد عامری (استاد)

رقیه گوگساز قوجانی (استادیار)

مجید زندی* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی

مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۸)
دوری ۳-۲۵، شماره ۲، ص. ۱۱۷-۱۲۷ (موزی)

بسیاری از مناطقی که پتانسیل تابشی بالایی برای نصب پنل‌های فتولتاییک دارند، مناطقی با آب و هوای خشک هستند؛ پدیده گرد و غبار در این مناطق به شدت بر عملکرد پنل‌های فتولتاییک تأثیر می‌گذارد. این معضل در اقلیم ایران، که به طور مکرر با طوفان‌های گرد و غبار و انتشار ریزگردها مواجه‌اند، بسیار جدی‌تر است. بر این اساس، آشنایی با روش‌های مختلف حذف گرد و غبار از سطح پنل‌های فتولتاییک در چنین مناطقی بسیار حیاتی است. در مطالعه‌ی حاضر به مرور جامع پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه‌ی تمیزکاری سطوح فتولتاییک و حذف گرد و غبار نشسته بر این سطوح می‌پردازیم. از نتایج این پژوهش می‌توان به‌عنوان مرجعی کامل برای استفاده‌ی پژوهش‌گران، طراحان و مهندسانی که با سامانه‌های فتولتاییک در مناطقی مانند خاورمیانه و به‌ویژه ایران، که با مشکل گرد و غبار دست و پنجه نرم می‌کنند، بهره جست.

aslan.gholami@gmail.com
shahab.eslami@gmail.com
tajikaryan@yahoo.com
m-ameri@sbu.ac.ir
r_gavagsaz@sbu.ac.ir
m_zandi@sbu.ac.ir

واژگان کلیدی: فتولتاییک، روش‌های تمیزکاری، گرد و غبار، سطوح خودتمیزشونده.

۱. مقدمه

نصب کردند. با زاویه‌ی شیب ثابت $24/6^\circ$ نسبت به افق، میزان کاهش انرژی تولیدشده ماهانه در مقایسه با سامانه‌ی مشابهی که روزانه تمیز می‌شده، گزارش شده است. کاهش میزان انرژی تولید شده در پایان ماه هشتم ۳۲٪ گزارش شده است. البته در این کار هیچ‌گونه اشاره‌ی به میزان گرد و خاک نشسته شده روی پنل‌ها و همچنین مشخصه‌های فیزیکی سایت آزمایش نشده است. بنابراین اطلاعات داده شده به نظر گمراه‌کننده می‌رسد (در سایت‌های آلوده این کاهش انرژی در چند هفته اتفاق می‌افتد نه در ۸ ماه). برای مثال در کار دیگری که توسط حسن^۲ و همکارانش^۵ در مصر انجام شده، نشان داده شده که کاهش انرژی در ۳۰ روز اول نصب سریع‌تر اتفاق می‌افتد. نتایج گزارش شده بیان می‌کنند که میزان کاهش انرژی بعد از یک ماه ۳۳/۵ درصد است و این کاهش تا ۶۵/۸ درصد بعد از شش ماه، بدون تمیز کردن، افزایش می‌یابد.

در تحقیقی مشابه، گارگ^۳ عبور عمودی^۴ تابش مستقیم^۵ از یک شیشه را در یک دوره‌ی ۳۰ روزه مورد مطالعه قرار داد؛ نتایج حاکی از آن بود که بر اثر نشست گرد و غبار، ضریب عبور برای شیشه افقی از ۹۰ درصد به ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. در مطالعه‌های دیگری در همین زمینه در کویت توسط صایغ^۶ و همکارانش^۷، مشاهده شد که برای صفحه‌های شیشه‌یی با شیب 15° ، 30°

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با تأثیر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتولتاییک نشان می‌دهد که تا قبل از سال ۲۰۰۸ مطالعه‌های بسیار محدود و پراکنده‌ی در این حوزه در دنیا انجام شده است. با این حال با توسعه‌ی سامانه‌های فتولتاییک در دنیا و به خصوص در منطقه‌هایی چون خاورمیانه و شمال آفریقا که با وجود پتانسیل بالای تابش به شدت با پدیده‌ی گرد و غبار و چالش‌های آن دست و پنجه نرم می‌کنند، مشکلات مربوط به آثار گرد و غبار بر عملکرد و کارایی این پنل‌ها آشکارتر شده است.^[۱] بنابراین افزایش قابل توجهی در تعداد پژوهش‌های منتشر شده در این حوزه به‌ویژه از سال ۲۰۰۹ قابل مشاهده است. به‌عنوان مثال، از مجموع ۵۹۰ مطالعه‌ی صورت گرفته در این زمینه، ۵۵۹ مورد در دهه‌ی گذشته منتشر شده است (شکل ۱).

در یکی از پژوهش‌های اولیه در این زمینه، سلیم^۱ و همکارانش^[۲] یک سامانه‌ی فتولتاییک آزمایشی برای بررسی تأثیر گرد و خاک بر میزان تولید انرژی الکتریکی در بلندمدت، در یک مزرعه‌ی خورشیدی در نزدیکی ریاض، در عربستان سعودی،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۸/۳/۸، پذیرش ۱۳۹۸/۳/۱۹.

DOI:10.24200/J40.2019.52496.1496

نیویورک^{۱۳} بررسی کرده‌اند. سایت مورد بررسی در این دوره در هر ۱۰ روز حداقل یک بار بارندگی داشته و از این رو نتایج آزمایش‌های آن‌ها حاکی از ۱ درصد کاهش در مقادیر به دست آمده است.

بررسی مطالعه‌های اولیه در این حوزه حاکی از آن است که تغییرات اقلیمی و محیطی به شدت بر میزان اثر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتولتائیک تأثیر دارد. به طور کلی با مرور مطالعات انجام شده در این حوزه، از میان پارامترهای مؤثر بر نشست گرد و غبار بر سطح می‌توان به میزان وزش باد و جهت آن، جنس گرد و غبار و چسبندگی ذرات غبار، فشار هوا، رطوبت موجود در جو، جنس پوشش شیشه‌یی پنل، شیب نصب پنل‌ها اشاره کرد. از این رو، انجام مطالعات تکمیلی در ارتباط با هراقلیم بسیار حائز اهمیت است. از آن‌جا که بسیاری از مناطق دنیا همچون خاورمیانه و شمال آفریقا و به خصوص ایران، از لحاظ جغرافیایی شرایط مساعدی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی دارند و در عین حال با توجه به مشکل تجمع گرد و غبار روی سطوح پنل‌های فتولتائیک دست و پنجه نرم می‌کنند، با انجام یک مطالعه‌ی کامل در این زمینه، می‌توان قدم بزرگی در رفع این مشکل برداشت.

از این رو مقاله‌ی حاضر، به بررسی پیشینه‌ی مطالعات صورت گرفته در حوزه‌ی روش‌های حذف گرد و غبار از سطح پنل‌های فتولتائیک می‌پردازد. ابتدا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات گرد و غبار و اثر آن‌ها در حوزه‌ی پژوهش حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به علاوه به صورت مختصر به معادلات حاکم بر انتقال گرما و اثر گرد و غبار بر پنل‌های فتولتائیک نیز اشاره می‌شود. در ادامه نیز، تحقیق‌هایی که به منظور تیزکاری سطوح فتولتائیک و حذف گرد و غبار از سطح آن‌ها پرداخته‌اند، مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد. به علاوه این روش‌های تیزکاری دسته‌بندی خواهد شد.

۲. خصوصیات ذرات گرد و غبار

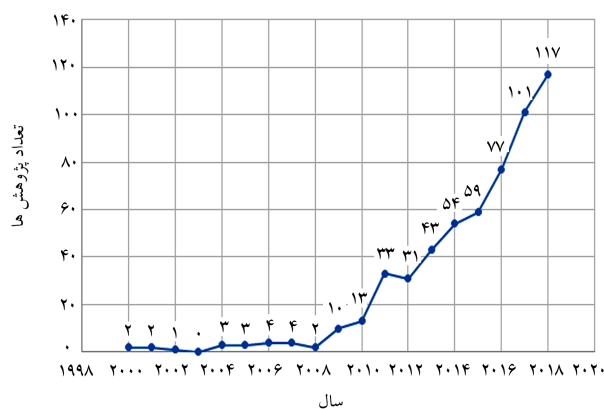
برای درک بهتر نحوه‌ی تجمع و نشست ذرات گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتولتائیک، مشخصه‌های ذرات گرد و غبار شامل اندازه ذرات، تحلیل مورفولوژی و ترکیب شیمیایی آن‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. در این بخش به بررسی برخی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه می‌پردازیم.

۱.۲. اندازه ذرات

در پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه، برای تعیین اندازه و مورفولوژی توزیع ذرات در بیشتر موارد از روش‌های نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۴} و میکروسکوپ پروب روبشی^{۱۵} بهره گرفته شده است. جدول ۱ اندازه و مورفولوژی توزیع ذرات گرد و غبار جمع‌آوری شده از کشورهای مختلف را نشان می‌دهد. بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که ذرات ریزتر نسبت به ذرات درشت، تأثیر بیشتری بر عملکرد ماژول‌های فتولتائیک دارند.

الشیکشی و حسین^[۸] تأثیر نشست خاکستر، سیمان و سه نوع سنگ آهک با قطر متوسط ۵، ۱۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ میکرومتر بر عملکرد پنل‌های فتولتائیک را تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند.

آن‌ها نشان دادند که لایه‌نشانی با چگالی گرد و غبار مساوی (۲۵ گرم بر مترمربع) اما با قطره‌های گوناگون سنگ آهک، ذرات کوچک‌تر توان خروجی را بیشتر کاهش می‌دهند. مطالعه‌ی آن‌ها همچنین نشان داد که توان خروجی سامانه‌ی فتولتائیک هنگام لایه‌نشانی ذرات خاکستر و سیمان به ترتیب، ۴۰ و ۹۰ درصد، کاهش یافت.



شکل ۱. تعداد پژوهش‌ها در حوزه تأثیر گرد و غبار بر عملکرد سامانه‌های فتولتائیک (۲۰۰۰-۲۰۲۰).^[۳]

۴۵° و ۶۰°، بعد از ۳۸ روز قرار گرفتن در محیط به ترتیب ۶۴، ۴۸، ۳۸، ۳۰، ۱۷ درصد کاهش در میزان عبور نور رخ می‌دهد. در این‌جا نیز تفسیر اطلاعات دشوار است چرا که اندازه‌گیری صفحه‌های تمیز و کثیف در روزهای متفاوتی انجام شده و به نظر نمی‌رسد تمهیداتی برای یکسان‌سازی شرایط آزمایش صورت گرفته باشد.

در مطالعه‌ی دیگر، الشیکشی^۷ و حسین^[۸] در آزمایشگاه، صفحه‌های فتولتائیک را در معرض انواع متفاوتی از گرد و غبار و آلودگی قرار دادند و تحت شرایط متفاوت میزان انرژی الکتریکی خروجی را اندازه‌گیری کردند؛ آن‌ها دریافتند که جنس گرد و غبار نیز بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتولتائیک تأثیر داشته و نمی‌توان مانند کارهای پیشین، فقط مدت زمان قرار گرفتن در محیط را مؤثر شمرد. علاوه بر این می‌توان از نتایج این تحقیق دریافت که طبیعت گرد و غبار - از جمله جنس، اندازه ذرات و چگالی نشست آن بر سطح - تأثیر زیادی بر انرژی خروجی پنل‌های خورشیدی دارند. البته این تحقیق محدودیت‌هایی نیز دارد که شاید مهم‌ترین آن این باشد که آزمایش‌ها تحت شرایط بدون وزش باد صورت گرفته‌اند. در حالی که در شرایط طبیعی وزش بادهای ملایم تأثیر قابل توجهی در میزان نشست گرد و غبار بر صفحه‌های تخت دارد.^[۱۰] علاوه بر مطالب اشاره شده، چند تحقیق دیگر نیز برای بررسی تأثیر گرد و غبار در مناطق بارانی صورت گرفته است. در یکی از مطالعه‌های اولیه، هتل و ورتز^[۱۱] در یک دوره‌ی ۳ ماهه کلکتورهایی با زاویه‌ی شیب نصب ۳۰° در یک منطقه‌ی صنعتی در کنار یک نیروگاه و در فاصله‌ی ۹۲ متری از یک خط راه‌آهن ۴ ریلی را بررسی کردند. نتایج تجربی آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که اثر گرد و غبار در عملکرد کلی کلکتورها به طور شگفت‌انگیزی (۴۷ درصد) کوچک است و محاسبه‌های انجام شده نیز حاکی از آن است که بیشینه‌ی میزان کاهش ضریب عبور پوشش شیشه‌یی ۴۷ درصد است. آن‌ها این مقادیر کوچک گزارش شده را به خاصیت خودتمیزشوندگی شیشه‌ها که ناشی از برف و باران زیاد در شهر بوستن آمریکا^۹ است، نسبت دادند.

در مطالعه‌ی مشابه دیگری اما برای زوایای بین ۰° و ۵۰°، داده‌های حاصل از تحقیقات دیتز^[۱۲] نور رسیده به صفحه‌ی جاذب به علت تجمع گرد و غبار ۵ درصد کاهش می‌یابد. این یافته‌ها بعدها توسط میچالسکی^{۱۱} و همکارانش^[۱۳] تأیید شده است. آن‌ها عملکرد دو دستگاه آفتاب‌سنج^{۱۲} را، که یکی از آن‌ها روزانه تمیز می‌شده و دیگری در طول ۲ ماه دوران آزمایش تمیز نشده است، در شهر آلبانی

جدول ۱. خصوصیات اندازه و مورفولوژی توزیع ذرات در برخی از کشورها.

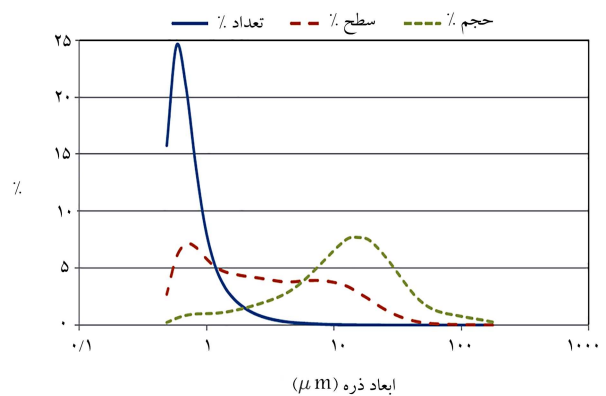
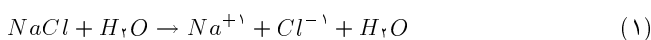
اطلاعات تکمیلی	ابعاد ذرات (μm)	محل جمع‌آوری گرد و غبار
عمده ذرات گرد و غبار در ابعاد سیلت ^۱ (ابعاد بین ماسه و رس) گزارش شده است. ذرات سیلت کوچک‌تر از جنس اسلیت ^۲ هستند و ذرات بزرگ‌تر از جنس کوآرتز ^۳ اند.	۸-۴	کویت [۱۴]
شکل‌ها مختلف و نامنظم، اما به‌طور کلی، متمایل به کروی شکل‌اند.	۱۷۶-۰٫۵	ظهران، عربستان [۱۵]
سایر نمونه‌های آزمایش شده عبارت‌اند از: سیمان ۱۰ میکرومتر، خاک رس ۶۸ میکرومتر و شن و ماسه‌ی سفید ۲۵۰ میکرومتر	۱۰-۲	پلژیک [۱۷، ۱۶]
شکل ذرات نامنظم است اما به‌طور تقریبی کروی است.	۷۸۰-۹۵	الجزیره [۱۸]
خاک رس نرم برای تهیه‌ی گرد و خاک مصنوعی	۷۸-۵۳	بانکوک، تایلند [۱۹]
اندازه ذرات گرد و غبار در ماه‌های مختلف به‌صورت متغیر	۱۰۰۰-۰٫۵	لیبی [۲۰، ۲۱]
پراکندگی گرد و غبار بر سطح از یک مکان به مکان دیگر متفاوت است	۶۳-۲	عمان [۲۲]
تعداد محدودی ذرات غیریک‌نواخت با ابعاد ۱۰ میکرومتر نیز گزارش شده است.	میانگین ۲	قطر [۲۳]
^۱ silt	^۲ slate	^۳ quartz

فراوانی، مساحت و حجم توزیع ذرات گرد و غبار در ابعاد مختلف مشاهده می‌شود.

۲.۲. تحلیل واکنش‌های شیمیایی گرد و غبار

ذرات گرد و غبار در اقلیم مرطوب، بخار آب را جذب و یک لایه گل^{۱۶} روی پنبه می‌نشانند. هنگامی که این لایه تحت حرارت و تابش آفتاب خشک می‌شود، حذف آن از سطح پنبه بسیار دشوارتر می‌شود. [۲۴، ۲۵] واکنش آب با ذرات گرد و غبار به دلیل جذب مؤثر مولکول‌های آب توسط ذرات گرد و خاک صورت می‌گیرد. این جذب مولکول‌های آب توسط خاک به سبب ایجاد ناحیه‌ی عدم تعادل نیرو بین مولکول‌های آب، یون‌های حل شده و ذرات خاک رخ می‌دهد و به اندازه ذرات گرد و غبار بستگی دارد. [۲۷] علاوه بر این، گل تشکیل شده در این حالت از منظر شیمیایی فعال است و با سطح در تماس واکنش نشان می‌دهد و تأثیر مهمی بر افزایش نیروی چسبندگی بین گل و سطح تشکیل شده دارد. [۲۸-۳۰]

حل شدن ذرات گرد و غبار مانند کلسیت^{۱۷} و هالیت^{۱۸}، طی واکنش‌های ۱ تا ۳ صورت می‌گیرد. [۳۱، ۳۲] واکنش ۱ نشان‌دهنده‌ی واکنش هالیت با مولکول‌های آب است که طی آن کلرید و سدیم به‌صورت یون‌های مجزا جدا و در مولکول‌های آب حل می‌شود. واکنش ۲ نیز، نحوه‌ی انحلال کربن‌دی‌اکسید در آب و تشکیل اسید کربنیک را نشان می‌دهد که در ادامه منجر به انحلال کلسیت در آب (واکنش ۳) می‌شود.



شکل ۲. فراوانی، مساحت و حجم توزیع ذرات گرد و غبار در ابعاد مختلف.

این تفاوت ناشی از توزیع یک‌نواخت‌تر ذرات با ابعاد کم‌تر (خاکستر) بر سطح پنبه گزارش شده است.

الشیخشی و همکاران، [۲۴] در پژوهشی دیگر عنوان داشتند که بادهایی با سرعت بالا، ذرات درشت‌تر را آسان‌تر و در نتیجه بیشتر جابه‌جا می‌کنند. به گزارش آن‌ها برای ذرات ریزتر، ۷ تا ۱۵ درصد از جرم غبار نشست‌شده بر سطح پنبه، توسط باد از روی سطح حذف می‌شود، در حالی که برای ذرات درشت‌تر حدود ۱۵-۲۰ درصد از جرم غبار نشست‌شده بر سطح ممکن است حذف شود. علاوه بر باد، جاذبه‌ی گرانش نیز به‌طور چشم‌گیری نرخ تجمع گرد و غبار بر سطح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نرخ تجمع متأثر از جاذبه برای ذرات کوچک با قطر کم‌تر از ۵ میکرون، ۵ درصد و برای ذرات درشت‌تر با قطر بیشتر از ۵ میکرون، ۷۵ درصد است. بر این اساس، در شکل ۲

و آسمان می‌توان از رابطه‌ی تشعشعی استفان بولتزمن محاسبه کرد (روابط ۶-۹).

$$Q_{rad,B,sky} = \varepsilon_B \sigma F_{B,sky} (Temp_r^{\uparrow} - T_{sky}^{\uparrow}) \quad (۶)$$

$$Q_{rad,B,ground} = \varepsilon_B \sigma F_{B,ground} (Temp_r^{\uparrow} - T_{ground}^{\uparrow}) \quad (۷)$$

$$Q_{rad,F,sky} = \varepsilon_F \sigma F_{F,sky} (Temp_r^{\uparrow} - T_{sky}^{\uparrow}) \quad (۸)$$

$$Q_{rad,F,ground} = \varepsilon_F \sigma F_{F,ground} (Temp_r^{\uparrow} - T_{ground}^{\uparrow}) \quad (۹)$$

دمای آسمان و زمین در روابط بالا را می‌توان از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه کرد.

$$T_{sky} = 0.70552 T_{amb}^{1/5} \quad (۱۰)$$

$$T_{ground} = T_{amb} \quad (۱۱)$$

میزان انتقال حرارت جابه‌جایی از سطح جلو و عقب نیز به ترتیب از رابطه‌ی سرمایش نیوتن (مطابق روابط ۱۲ و ۱۳) محاسبه می‌شود:

$$Q_{conv,F} = h_F (Temp_r - T_{f1}) \quad (۱۲)$$

$$Q_{rad,B,ground} = \varepsilon_B \sigma F_{B,ground} (Temp_r^{\uparrow} - T_{ground}^{\uparrow}) \quad (۱۳)$$

که در آن دمای فیلم در دو سطح جلو و عقب را می‌توان با کمک روابط ۱۴ و ۱۵ محاسبه کرد:

$$T_{f1} = (T_{amb} + Temp_r) / 2 \quad (۱۴)$$

$$T_{f2} = (T_{amb} + Temp_r) / 2 \quad (۱۵)$$

تعیین مقدار ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی در سطوح جلو و عقب مدول یعنی h_F و h_B که مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار بر توزیع دمای مدول در طول روز هستند، از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، انتقال حرارت جابه‌جایی بین مدول و هوای محیط به دو صورت جابه‌جایی آزاد و اجباری انجام می‌شود. ضرایب انتقال حرارت جابه‌جایی سطوح جلو و عقب مدول فتولتاییک از برهم‌نهی این دو فرایند حاصل می‌شوند. برای پیش‌بینی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد، می‌توان از روابط ۱۶ یا ۱۷ استفاده کرد.^[۳۸]

$$Nu_F = 0.56 \sqrt{Ra_{cr} \sin \gamma_m} + 0.13 (\sqrt{Ra_1} - \sqrt{Ra_{cr}}) \quad (۱۶)$$

$$Nu_B = 0.56 \sqrt{Ra_r \sin \gamma_m} \quad (۱۷)$$

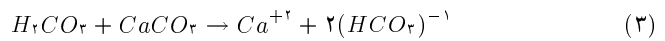
γ_m شیب مدول نسبت به افق و Ra_{cr} همان عدد رایلی بحرانی است. در انتخاب ضریب انتقال حرارت اجباری مناسب در مطالعات مختلف، باید شرایط مورد نظر مسئله در محدوده‌ی ذکر شده درمورد معادله‌ی مورد نظر صدق کند. در مطالعات گذشته، روابط زیادی برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری پیشنهاد شده، که در ادامه به برخی از این روابط اشاره شده است:

$$h = 2.8 + 3.8 V_{wind} \quad (۱۸)$$

$$h = 8.56 + 2.56 V_{wind} \quad (۱۹)$$

$$h = 11.9 + 2.2 V_{wind} \quad (۲۰)$$

$$h = 8.91 + 2 V_{wind} \quad (۲۱)$$



طی فرایند خشک شدن گل و تبخیر آب موجود، یون‌های حل شده $(Na^+, K^+, Ca^{+2}, Cl^-, SiO^-)$ ، به‌علت نیروی الکترواستاتیک و پیوند یونی جذب ساختار گل می‌شوند و بلورهایی را تشکیل می‌دهند و باعث افزایش نیروی چسبندگی می‌شوند.^[۳۲،۳۱]

۳.۲. معادلات حاکم بر انتقال گرما و اثر گرد و غبار

مرور پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتولتاییک به‌طور کلی بر میزان تابش رسیده به سطح پنل و نیز دمای سلول فتولتاییک تأثیر می‌گذارد.^[۳۳] از این رو، پیش از بررسی روش‌های تمیزکاری پنل‌های فتولتاییک، به‌صورت مختصر به برخی از معادلات حاکم بر انتقال گرما در پنل‌های فتولتاییک اشاره می‌شود.

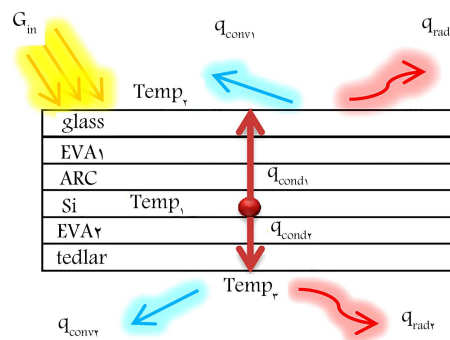
زارعی و همکاران،^[۳۴-۳۶] با مدل‌سازی حرارتی پنل‌های فتولتاییک، به بررسی فرایند انتقال حرارت از پنل در حضور و عدم حضور گرد و غبار پرداختند. در این مدل، انتقال حرارت هدایت، همرفت و تابش به‌صورت یک‌بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. برای حل عددی مدل حرارتی، لازم است تعادل انرژی برای لایه‌های مختلف از پنل فتولتاییک توسعه یابد. در این حالت فرم کلی معادله‌ی بقای انرژی به شکل رابطه‌ی ۴ است.^[۳۷]

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \frac{d}{dt} E_{sys} \quad (۴)$$

که با فرض عدم تولید انرژی ($\dot{E}_{gen} = 0$) در داخل پنل فتولتاییک به‌صورت رابطه‌ی ۵ حل می‌شود.^[۳۷]

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{d}{dt} E_{sys} \quad (۵)$$

در شکل ۳ نمایی کلی از فرایند انتقال حرارت در مدول فتولتاییک، به‌عنوان یک سامانه‌ی چندلایه نشان داده شده است. در حالت کلی، انرژی ورودی به سامانه در رابطه‌ی ۵، تابش فرودی به سطح پنل است، که توسط لایه‌های مختلف مدول جذب، بازتاب و عبور داده می‌شود. انرژی جذب شده در لایه‌های مدول تبدیل به حرارت شده و به روش انتقال حرارت به سطح جلو و عقب مدول هدایت می‌شود و به دو روش انتقال حرارت جابه‌جایی و تشعشعی به محیط منتقل می‌شود. انتقال حرارت تشعشعی از دو سطح جلو و عقب مدول و انتقال حرارت جابه‌جایی به دو صورت آزاد و اجباری صورت می‌گیرد. انتقال حرارت تشعشعی از سطوح جلو و عقب را به زمین



شکل ۳. نمایی از فرایند انتقال حرارت در یک مدول فتولتاییک.^[۳۷]

محیطی و نوع روش تمیزکاری، بستگی دارد. [۵۰] در حال حاضر روش های مختلفی برای کاهش اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل های فتوولتائیک مورد استفاده قرار گرفته است. [۵۱] روش های کاهش گرد و غبار گزارش شده را می توان به چهار دسته ی طبیعی، مکانیکی و الکترومکانیکی، محافظت الکترواستاتیک و استفاده از پوشش سطح میکرو و نانو تقسیم کرد که در ادامه به تشریح هر یک خواهیم پرداخت.

۱.۳. روش های طبیعی حذف گرد و غبار

بارندگی، باد و گرانش، روش های طبیعی پاک کردن گرد و غبار از سطح پنل فتوولتائیک هستند. از میان این سه عامل، آب مؤثرترین جزء تمیز کردن و حذف گرد و غبار است؛ میزان بالای بارندگی در یک منطقه، باعث کاهش اثر گرد و غبار می شود. به عنوان مثال، در مناطق مرطوبی مانند سنگاپور، اثر انباشت گرد و غبار فقط یک مشکل جزئی و قابل اغماض است. [۵۲] اگرچه بارندگی، موجب حذف گرد و غبار از سطح پنل می شود، اما برای تمیز کردن دوره یی و مداوم، به خصوص در مناطق خشک، تکیه بر این روش به تنهایی کافی نیست.

چنان که در جدول ۲ مشاهده می شود، در منطقه های کم بارش مانند کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا (اقلیم گرم و مرطوب) به علت افزایش نشست گرد و غبار بر سطح پنل ها و کاهش تأثیر تمیزکنندگی باران، توان خروجی پنل فتوولتائیک به میزان چشم گیری افت داشته است. به عنوان مثال در طهران^{۱۹} عربستان، بعد از ۶ ماه در معرض شرایط محیطی قرار گرفتن پنل ها، کاهش ۵۰ درصدی توان خروجی پنل ها گزارش شده است. در مطالعه یی دیگر نیز در عرب^{۲۰} عربستان، افت روزانه ۲٫۷۸ درصدی جریان اتصال کوتاه در پنل ها گزارش شده است. هنگامی^{۲۱} نیز در پژوهشی دیگر و در منطقه یی کم بارش در مصر، کاهش ۲۰ درصدی ضریب عبور پوشش شیشه یی را بعد از گذشت یک ماه در معرض شرایط محیطی بودن گزارش کرد. این افت ضریب عبور در ادامه موجب کاهش ۶۰ الی ۷۰ درصدی توان خروجی پنل فتوولتائیک نیز شد. [۵۷] البته چنان که مشاهده می شود، با وجود بارش بیشتر باران در مصر نسبت به عربستان، افت خروجی پنل ها در مصر بیشتر بوده است. این مطلب نشان می دهد که چنان که پیش تر اشاره شد، علاوه بر میزان بارش باران، عوامل متعددی دیگری نیز بر میزان نشست گرد و غبار بر سطوح فتوولتائیک تأثیرگذار است.

در مطالعه یی دیگر، [۵۸] میزان افت ضریب عبور شیشه برحسب چگالی سطحی گرد و غبار نشسته بر آن مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴) که میزان این افت مطابق رابطه ی ۲۴ محاسبه می شود. در این پژوهش ۷۰ روزه هیچ گونه بارشی گزارش نشده و نشست گرد و غبار بر سطح پنل منجر به افت ۲۵ درصد ضریب عبور در پایان

جدول ۲. افت عملکرد پنل های فتوولتائیک در مناطقی با کمبود بارش و اقلیم گرم و مرطوب.

مکان	بارش سالانه (ml)	کاهش توان خروجی پنل	بازه زمانی اندازه گیری
عربستان [۵۳]	۱۰-۶	٪۵۰	۲۶ هفته
امارات [۵۴]	۹۰-۸۰	٪۱۰	۵ هفته
قطر [۵۵]	۷۵-۷۰	٪۱۰	۱۴ هفته
فلسطین [۵۶]	۴۰-۳۰	٪۶-۵	۱ هفته
مصر [۵۷]	۵۰-۱۸	٪۷۰-۶۰	۲۶ هفته

$$h = \frac{0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} k}{l_{ch}} \quad (22)$$

$$h = \left[\left(\frac{0.33 Re^{-0.1} (\sqrt{Pr}-1)}{1+0.33 Re^{-0.1} (\sqrt{Pr}-1)} \right) \frac{0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} k}{l_{ch}} + \left(\frac{0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} k}{l_{ch}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (23)$$

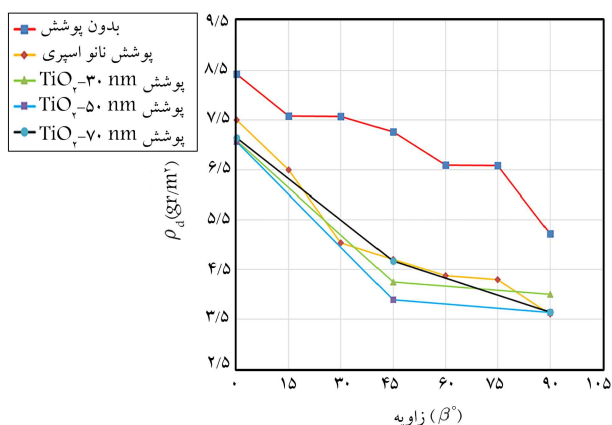
رابطه ی ۱۸ از آزمایش در تونل باد به دست آمده است؛ [۳۹] این رابطه در سرعت های بالاتر از ۰/۵ متر بر ثانیه پاسخ های دقیق تری را پیشنهاد می کند. رابطه ی ۱۹ و ۲۰ [۳۹،۴۰] بر روی مدول شیب دار، در آزمایش میدانی و با اندازه گیری سرعت باد در فاصله ی حدود ۱ متری بالای مدول به دست آمده است. این روابط در تحقیقات مختلفی [۳۳،۴۲] به اثبات رسیده اند. رابطه ی ۲۰ با باد با سرعت های بین ۰/۵ تا ۶/۷ متر بر ثانیه قابل استفاده است. رابطه ی ۲۱ در مورد مدول های موجود در محیط های باز یا روی ساختمان های بلند، مورد استفاده قرار می گیرد. [۴۴] رابطه ی ۲۲ ضریب انتقال حرارت جابه جایی را در حالت جریان آرام و رابطه ی ۲۳ ضریب انتقال حرارت جابه جایی را در حالت جریان در حال گذار بیان می کنند. [۳۶،۳۵] در روابط ۲۲ و ۲۳، l_{ch} طول مشخصه مدول فتوولتائیک مورد بررسی است. در استفاده از تمامی این روابط باید نیم نگاهی به روند تغییرات دمای محیط داشت. به عنوان مثال اگرچه استفاده از رابطه ی ۱۸ در سرعت های پایین مناسب تر است اما در صورت بالا بودن دمای محیط، به دلیل افزایش آشفتگی جریان استفاده از آن ممکن است منجر به پاسخ هایی با خطای بالا شود.

لازم به ذکر است قبل از حل مدل حرارتی فوق، ابتدا باید مدل نوری پنل فتوولتائیک حل شود؛ نتایج حاصل از مدل نوری، یعنی میزان عبور، بازتاب و جذب لایه های مختلف در مدل سازی حرارتی استفاده می شود. [۳۷،۴۵] با مرور پژوهش های صورت گرفته در این زمینه، استفاده از روش ردیابی اشعه برای مدل نوری توصیه می شود. [۴۶] به این منظور، پنل فتوولتائیک به صورت لایه هایی با ضخامت کم و طول و عرض زیاد (نسبت به ضخامت شان) در نظر گرفته می شود که به یکدیگر متصل شده اند. این روش به دلیل بزرگ تر بودن ضخامت هر لایه نسبت به طول موج نور فرودی بر سطح پنل از نظر ریاضی دقیق است و همه ی بازتاب های داخلی و خارجی احتمالی را در نظر می گیرد. یادآور می شود در این مدل از قطبش نور فرودی صرف نظر می شود.

مرور مطالعات صورت گرفته در زمینه ی مدل سازی حرارتی و نوری اثر گرد و غبار بر پنل های فتوولتائیک، حاکی از آن است که در اکثر این مطالعات، [۳۴-۳۷،۴۶] گرد و غبار به عنوان یک لایه ی اضافی بر سطح در نظر گرفته شده است. از این رو روابط عنوان شده کاملاً قابل استفاده اند.

۳. روش های تمیزکاری پنل های فتوولتائیک

در این بخش به بررسی رویکردهای کاهش اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل های فتوولتائیک می پردازیم. این روش های تمیزکاری سطح پنل ها در خاورمیانه و شمال آفریقا - دو منطقه یی که انرژی خورشیدی با توجه به سطح بالای نور خورشید ممکن است جایگزین مناسب برای سوخت های فسیلی باشد - بسیار مهم است. [۴۷] در این مناطق مهم است که برای بازیابی عملکرد پنل های فتوولتائیک که به علت نشست گرد و غبار دچار اختلال شده اند، تمیزکاری دوره یی انجام شود. [۴۸،۴۹] با این حال، دوره یی مورد نیاز تمیز کردن پنل ها به عوامل مختلف، از جمله شرایط



شکل ۵. کاهش چگالی سطحی گرد و غبار نشست بر سطح نمونه‌ها در اثر افزایش زاویه شیب نصب پنل [۵۸]

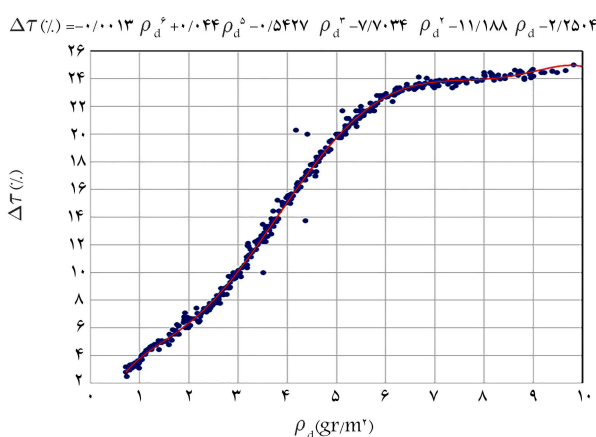
آزمایش‌هایی میدانی در تونل باد انجام دادند. نتایج حاصله نشان داد جهت وزش باد نسبت به سرعت باد تأثیر بیشتری بر توزیع گرد و غبار می‌گذارد. به علاوه بنا به گزارش آن‌ها سرعت بالای باد (بیشتر از ۲/۵۹ متر بر ثانیه) منجر به تجمع گرد و غبار بر سلول و کاهش شدید عملکرد آن می‌شود. در حالی که در سرعت‌های کم‌تر باد، تجمع گرد و غبار کاهش می‌یابد و افت عملکرد پنل نیز کم‌تر است [۹]. در پژوهشی دیگر، [۶۴] محققین نشان دادند که اثر اندازه ذرات گرد و غبار مریخ بر عملکرد فتولتاییک با سرعت باد متفاوت است و هنگامی که سرعت باد بسیار بالا باشد (۸۹-۱۱۶ متر بر ثانیه)، اختلاف قابل‌ذکری بین افت عملکرد ناشی از ذرات بزرگ (بزرگ‌تر از ۷۵ میکرومتر) و ذرات کوچک (۳۰ میکرومتر) وجود ندارد. این نتایج بعدها توسط البوسیری [۶۴] و همکاران، [۶۵] تأیید شد. طبق گزارش آن‌ها میزان چگالی سطحی گرد و غبار روی سطح، در سرعت باد بالا (بیشتر از ۲۴ متر بر ثانیه) قابل اغماض است.

افزایش زاویه‌ی شیب نصب پنل نیز به علت اثر گرانش و به‌عنوان عامل سوم، سبب کاهش تجمع گرد و غبار روی پوشش می‌شود. غلامی و همکاران، [۵۸] در مطالعه‌ی در اصفهان نشان دادند که افزایش شیب پنل‌ها به طور کلی موجب کاهش نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتولتاییک می‌شود (شکل ۵).

البته این تغییر شیب، انرژی دریافتی از خورشید را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو تعیین زاویه‌ی مطلوب شیب که میزان تجمع گرد و غبار را کاهش دهد و در عین حال مقدار تابش دریافتی از خورشید را نیز بیشینه کند، مهم است. [۶۶] البته جهت و شیب نصب پنل‌ها در یک ناحیه به‌طور کلی، با توجه به دریافت حداکثری انرژی خورشیدی تعیین می‌شود. [۶۷] از این رو زاویه و جهت‌گیری پنل‌ها، میزان بارش باران و جهت و سرعت وزش باد هیچ‌یک پارامترهای قابل کنترل و برنامه‌ریزی برای حذف گرد و غبار نیستند.

۲.۳. روش‌های مکانیکی و الکترومکانیکی حذف گرد و غبار

روش‌های مکانیکی برای حذف گرد و غبار از سطح پنل فتولتاییک شامل شست‌وشوی مکانیکی و دمیدن است. روش‌های الکترومکانیکی نیز شامل تکان دادن یا ارتعاش آرایه‌های فتولتاییک و نیز استفاده از امواج فراصوتی یا فراصوتی برای شکستن چسبندگی گرد و غبار است. [۶۸] الشهري ۲۵ و همکاران، [۶۹] سازوکار میکروکننده‌ی خشک را که از سامانه‌های رباتیک استفاده می‌کند، بررسی کردند. نتایج حاصله نشان داد که استفاده از برس نایلون و بریزگی‌های نوری پوشش شیشه‌ی فتولتاییک



شکل ۴. منحنی افت ضریب عبور شیشه بر حسب چگالی سطحی گرد و غبار. [۵۸]

دوره‌ی داده‌برداری شده است. لازم به ذکر است که با توجه به بازه داده‌های ثبت شده در طول داده‌برداری (۱۰-۳۱۲۹/۰)، رابطه‌ی ۲۴ ممکن است برای چگالی گرد و غبار بالای ۱۰ گرم بر متر مربع صادق نباشد. به علاوه افت ضریب عبور محاسبه شده از رابطه‌ی ۲۴ برای گرد و غبار کم‌تر از ۲۳۵۹/۰ گرم بر متر مربع، منفی به دست می‌آید و غیر قابل قبول است. که البته این نکته چیزی از ارزش‌های رابطه نمی‌کاهد، چرا که عموماً در این بازه از گرد و غبار می‌توان اثر گرد و غبار بر ضریب عبور صرف‌نظر کرد.

$$\Delta\tau(\%) = -0.013\rho_d^6 + 0.44\rho_d^5 - 0.5427\rho_d^4 + 3.0499\rho_d^3 - 7.7034\rho_d^2 - 11.188\rho_d - 2.250 \quad (24)$$

در پژوهشی دیگر، [۵۹] نشان داده شد که اگرچه بارش باران موجب حذف بخشی از گرد و غبار از سطح پنل می‌شود، اما ممکن است با ایجاد لکه‌هایی بر سطح پنل، خود عامل کاهش ضریب عبور شیشه از سطح پنل شود. این اثر به‌خصوص در سطوحی که دارای پوشش‌های خودتمیزشونده‌ی آب‌دوست یا آب‌گریز نیستند بسیار شدیدتر است.

وزش باد نیز به‌عنوان عامل دوم، ممکن است با حذف ذرات گرد و غبار، عملکرد پنل فتولتاییک را بهبود ببخشد. مخلف و همکاران، [۶۰] گزارش دادند که افزایش سرعت باد علاوه بر حذف گرد و غبار از سطح، منجر به انتقال بیشتر حرارت از سطح سلول فتولتاییک و کاهش رطوبت نسبی محیط می‌شود که به نوبه‌ی خود منجر به افزایش کارایی سامانه‌ی فتولتاییک می‌شود. با این وجود باد نیز نمی‌تواند به‌عنوان یک جزء مطمئن حذف گرد و غبار، به خصوص در نواحی کم‌باد، در نظر گرفته شود زیرا در سرعت‌های پایین، باد ممکن است خود عامل تجمع غبار بر سطح باشد. [۶۱] به عبارت دیگر، وزش باد بسته به جهت و سرعت وزش، اثر متفاوتی بر نشست گرد و غبار بر سطح پنل دارد. وزش باد می‌تواند گرد و خاک نشست بر سطح پنل را جابه‌جا کند و منجر به کاهش نشست گرد و غبار شود. [۶۲] به‌عنوان مثال، کاهش نشست گرد و غبار ناشی از وزش باد در زاویه‌ی خاصی از نصب پنل در مصر گزارش شده است. [۵۷] با این وجود، وزش باد ممکن است منجر به افزایش نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌ها نیز شود. در صحرای بزرگ لیبی، کلارک و همکارانش، [۴۰] افزایش نشست گرد و غبار بر سطوح را در اثر افزایش سرعت میانگین ماهانه باد گزارش کردند. در مطالعه‌ی دیگر کالوت، [۶۲] حداقل سرعت آستانه برای نشست گرد و غبار در لیبی را ۶/۷ متر بر ثانیه معرفی کرد. برای شبیه‌سازی اثر سرعت و جهت باد بر نشست گرد و غبار بر عملکرد پنل فتولتاییک، گوسنز ۲۳ و همکارانش، [۶۳]

به کمک این روش بیش از ۹۰ درصد گرد و غبار موجود در سطح پنل‌های مریخ با استفاده از ولتاژ بالا حذف شد.^[۷۷] با این وجود در مکان‌های دیگر با اندازه گرد و غبار بزرگ‌تر میزان کم‌تری از گرد و غبار حذف می‌شود. علت این پدیده آن است که ذرات گرد و غبار موجود در سطح مریخ کوچک‌ترند و برده‌های الکتریکی بر نیروهای واندروالس که وابسته به اندازه ذرات است، غلبه می‌کنند.^[۷۸]

شارما^{۲۹} و همکاران^[۷۵] نشان دادند که با تغییر چگالی گرد و غبار، متوسط مصرف انرژی صفحه‌ی الکتروستاتیک تغییر می‌کند. آن‌ها برای نمونه‌ی با ۰/۶ میلی‌گرم گرد و غبار در هر سانتی‌متر مربع، کل انرژی مورد نیاز برای حذف گرد و غبار از سطح صفحه را حدود ۱۰ وات در متر مربع گزارش کردند. برای کاهش قدرت لازم برای عملیات منبع، می‌توان از یک ریزکنترل‌کننده‌ی کم‌قدرت به جای یک سیستم کنترل سیگنال دیجیتال استفاده کرد.^[۷۹]

اگر چه این روش برای کاربردهای فضایی بسیار مورد توجه است و پژوهش‌های مختلفی برای توسعه و بهبود عملکرد آن انجام گرفته، با توجه به وجود رطوبت و تأثیر بر نیروی الکتروستاتیک، استفاده از این روش برای حذف گرد و غبار در سطح زمین امکان‌پذیر نیست.

۴.۳. استفاد از سطوح خودتمیزشونده

یکی از روش‌های بسیار مؤثر در کاهش تجمع گرد و غبار بر پنل‌های فتوولتائیک استفاده از فیلم‌های خودتمیزشونده است.^[۸۰] نانوفیلم‌های خودتمیزشونده از مواد فوق‌آب‌گریز یا فوق‌آب‌دوست تشکیل شده‌اند و این بدان معناست که سازوکار خود تمیزشوندگی نانوفیلم‌ها شامل دو راهکار است.^[۸۱]

ایده‌ی طراحی سطوح آب‌گریز از برگ نیلوفر آبی گرفته شده است. در سطوح آب‌گریز، پوشش نازکی بر سطح قرار می‌گیرد که با حذف ناصافی‌های میکرومتری و نانومتری سطح، موجب کاهش نیروی چسبندگی سطحی میان قطرات آب و سطح می‌شود. به عبارت دیگر در این نوع سطوح قابلیت خود تمیز شونده‌ی، با افزایش خاصیت آب‌گریزی ایجاد می‌شود.^[۸۲] سطوح صیقلی ذاتاً آب‌گریزند؛ پوشش‌های آب‌گریز نانو این خاصیت را تا حد فوق‌العاده‌ی بالا می‌برند و منجر به افزایش زاویه‌ی بیش از ۱۵۰ درجه‌ی قطرات آب با سطح خواهند شد. این خاصیت موجب غلتیدن قطرات کاملاً آلودگی آب یا باران روی سطح و شسته شدن آلودگی‌ها از روی آن می‌شود.^[۸۳] علاوه بر این پوشش‌های نانو دارای خصوصیات دیگری چون جلوگیری از جذب عمقی آلودگی‌های روی سطح، خاصیت آسان تمیز شونده‌ی، مقاومت در برابر باران‌های اسیدی و جلوگیری از سائیده شدن با عبور ریزگردها از روی سطح هستند.^[۸۴]

استفاده از نانوفیلم‌ها برای ایجاد سطوح فوق‌آب‌دوست، نیز رویکرد دیگری است برای ایجاد خاصیت خودتمیزشوندگی. معروف‌ترین فیلم فوق‌آب‌دوست دی‌اکسید تیتانیوم است که علاوه بر خاصیت آب‌دوستی فعالیت‌های فتوکاتالیستی هم دارد. این شیوه‌ی خودتمیزشوندگی دو مرحله دارد: در مرحله اول یک فرایند فتوکاتالیستی توسط نانوفیلم دی‌اکسید تیتانیوم تحت اثر تابش نور فرابنفش صورت می‌گیرد و باعث شکسته شدن غبارهای آلی می‌شود. در مرحله دوم، به علت فوق‌آب‌دوستی بودن سطح، قطرات باران به جای جمع شدن در یک‌جا روی تمام سطح پخش می‌شود و گرد و غبار را شست‌وشو می‌دهد.

در کاربردهای خورشیدی، هدف از تولید سطوح آب‌گریز با ابعاد میکرو و نانو، توسعه‌ی خاصیت خود تمیزشوندگی سطوح در کنار حفظ خواص اپتیکی مطلوب است.^[۸۵] سطح فوق‌آب‌گریز، دارای قابلیت ترشوندگی پایین است. چنین سطحی

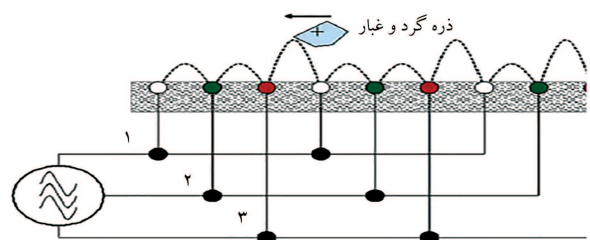
تأثیر نمی‌گذارد. در مطالعه‌ی دیگر، ویلیامز^{۲۶} و همکارانش^[۷۰] گزارش دادند که استفاده از ارتعاش مکانیکی برای حذف گرد و غبار منجر به بازایی ۹۵ درصد از ظرفیت تولیدی پنل فتوولتائیک می‌شود. فرناندز^{۲۷} و همکارانش در پژوهشی مشابه^[۷۱] به بررسی سازوکار گرد و غبار روی روباتیک با کارایی بالا به منظور استفاده در مریخ پرداختند. آن‌ها نشان دادند که کارایی این سازوکار بیش از ۹۳ درصد است.

مطالعه در حوزه‌ی روش‌های مکانیکی و الکترومکانیکی در سال‌های اخیر بسیار افزایش یافته است. به خصوص در مناطقی که با کمبود آب دست و پنجه نرم می‌کنند، از سازوکارهای خشک به شدت استقبال می‌شود. البته استفاده از این سازوکارها علاوه بر نیاز به مصرف انرژی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری سامانه‌های فتوولتائیک را نیز افزایش می‌دهد. از این رو محاسبه‌ی زمان مناسب برای استفاده از این سازوکارهای تمیزکننده از اهمیت بالایی برخوردار است.

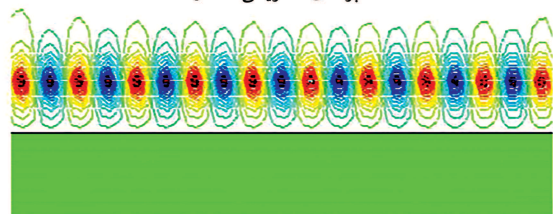
۳.۳. روش‌های الکتروستاتیک حذف گرد و غبار

استفاده از روش‌های الکتروستاتیک برای کاهش اثر منفی گرد و غبار در پنل‌های خورشیدی اولین بار توسط ناسا پیشنهاد شد.^[۷۲] در این روش، یک صفحه‌ی الکتروستاتیکی به سطح ماژول فتوولتائیک متصل می‌شود. این صفحه از ورق‌های پلاستیکی شفاف مانند پلی‌اتیلن ترفتالات^{۲۸} (که در برابر اشعه‌ی ماوراء بنفش مقاوم است) و پیکربندی موازی یا مارپیچی الکتروده‌های هادی الکتریکی (ساخته شده از اکسید قلع شفاف) تحت یک فیلم شفاف نازک ساخته شده است. چنان‌که در شکل ۶ نشان داده شده است، یک منبع تغذیه‌ی AC تک یا چندفاز به الکترودها متصل می‌شود تا میدان الکترومغناطیسی روی سطح تولید کند تا ذرات گرد و غبار را دفع کند. این روش، که به «روش پرده الکتریکی» شناخته می‌شود، یکی از بهترین استراتژی‌های حذف گرد و غبار در ماه و مریخ است.^[۷۳-۷۵]

صفحه‌ی الکتروستاتیکی حدود ۸۰ درصد گرد و غبار را از سطح حذف می‌کند و کارایی سلول خورشیدی را تا ۹۰ درصد افزایش می‌دهد. با این حال، کارایی صفحه‌ی الکتروستاتیکی بستگی به پارامترهای بسیاری، از جمله میزان انباشت گرد و غبار، نوع ذرات گرد و غبار، روش کار و ولتاژ اعمال شده دارد.^[۷۶] به‌عنوان مثال،



الف) پرده‌ی الکتریکی سه فاز؛



ب) توزیع میدان الکتریکی بین الکترودها.

شکل ۶. پرده الکتریکی.^[۷۲]

علاوه بر این، در این مطالعه نانوفیلم های خودتمیزشونده ی آبگریز و آب دوست نیز مقایسه ی تجربی شده اند.

۴. نتیجه گیری

مرور پژوهش های انجام شده در این حوزه، اهمیت بالای اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل های فتولتاییک را نشان می دهد. از سوی دیگر با توجه به پیچیدگی این پدیده و آثار آن، انجام پژوهش های تکمیلی و جامع در زمینه ی روش های مختلف حذف گرد و غبار از سطح پنل های فتولتاییک الزامی است. در نوشتار حاضر با مرور پژوهش های صورت گرفته در این حوزه، ضمن معرفی خواص گرد و غبار نشسته بر سطح و تأثیر اندازه و مورفولوژی ذرات گرد و غبار، روش های تمیزکاری سطح نیز مورد بررسی و دسته بندی قرار گرفت. به طور کلی این روش ها را می توان در ۴ دسته ی طبیعی، مکانیکی، الکترومکانیکی و محافظت الکترواستاتیک و استفاده از پوشش سطح میکرو و نانو تقسیم کرد که هر یک از آن ها به طور مفصل تشریح شد. علاوه بر این، معادلات حاکم بر انتقال حرارت به منظور مدل سازی حرارتی و نحوه ی مدل سازی نوری پنل های فتولتاییک نیز مختصراً تشریح شد. بررسی پژوهش های صورت گرفته نشانگر نیاز مبرم به پژوهش های تکمیلی در این حوزه، به خصوص در اقلیم ایران است.

می تواند کارایی تمیزکردن را به شدت افزایش دهد. در سال های اخیر پژوهش های متعددی به منظور استفاده از این سطوح برای کاهش اثر گرد و غبار بر پنل های فتولتاییک انجام شده است. پارک^{۳۰} و همکارانش^[۸۶] یک سطح فوق آبگریز با زاویه ی تماس بیش از ۱۵۰ درجه ایجاد کردند. با این حال، ایجاد یک سطح جدید با خواص مورد نیاز چسبندگی پایین، ترشوندگی پایین، ضریب عبور نور بالا و مقاومت بالا به محیط های خشن (مانند رطوبت بالا و درجه حرارت بالا) یک چالش دشوار است.

علاوه بر سطوح آبگریز، سطوح آب دوست نیز برای حذف گرد و غبار بسیار مؤثرند. به عنوان مثال، ورما^{۳۱} و همکارانش^[۸۷] شیشه یی با نانو ساختار فوق آب دوست با زاویه ی تماس کم تر از ۵ درجه ایجاد کردند. استفاده از این نانوفیلم موجب افزایش خاصیت خودتمیزشوندگی و کاهش گرد و غبار از سطح پنل و بهبود عملکرد سلول های آن به دلیل افزایش ضریب نور شد. در پژوهشی دیگر هی^{۳۲} و همکارانش^[۶۸] فیلم نازکی از دی اکسید تیتانیوم^{۳۳} با ضخامت های مختلف روی سطح شیشه نشان دهند و نشان دادند که میزان انباشت گرد و غبار بر سطح با افزایش ضخامت فیلم کاهش می یابد. در مطالعه یی دیگر^[۵۹] غلامی و همکاران رفتار خودتمیزشوندگی و حذف گرد و غبار از سطح شیشه را برای سطوح آب دوست و آبگریز در یک بازه ۷۰ روزه در شهر اصفهان بررسی کردند و نشان دادند که چگالی گرد و غبار روی سطح به علت وجود سطوح خودتمیزشونده به طور متوسط بین ۸ تا ۹۷ درصد کاهش یافت.

پانوشتها

1. Salim
2. Hassan
3. Garg
4. normal transmittance
5. direct radiation
6. sayigh
7. El-Shobokshy
8. Hottel H & Woertz M
9. Boston, USA
10. Dietz A
11. Michalsky
12. pyranometer
13. Albany, New York
14. scanning electron microscope (SEM)
15. scanning probe microscope
16. mud
17. calcite (CaCO₃)
18. halite (NaCl)
19. Dhahran
20. Arar
21. Hegazy
22. Callot
23. Goossens
24. AlBusairi
25. Al Shehri
26. Williams
27. Fernandez
28. polyethylene terephthalate (PET)
29. Sharma
30. Park

31. Verma
32. Hee
33. TiO₂

منابع (References)

1. Mostefaoui, M., Ziane, A., Bouraiou, A. and et al. "Effect of sand dust accumulation on photovoltaic performance in the saharan environment: southern algeria (adrar)", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **26**(1), pp. 259-268 (Jan 2019).
2. Zitouni, H. and et al. "Experimental investigation of the soiling effect on the performance of monocrystalline photovoltaic systems", *Energy Procedia*, **157** January, pp. 1011-1021 (Jan 2019).
3. "Scopus - Analyze Search Results", Available: <https://Www-Scopus-Com>. [Accessed: 28-Apr-2019].
4. Salim, A.A., Huraib, F.S. and Eugenio, N.N. "Pv power-study of system options and optimization", *In Ec Photovoltaic Solar Conference*, **8**, pp. 688-692 (1988).
5. Hassan, A.H., Rahoma, U.A., Elminir, H.K. and et al. "Effect of airborne dust concentration on the performance of Pv modules", *J. Astron. Soc. Egypt*, **13**(1), pp. 24-38 (2005).
6. Garg, H.P. "Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors", *Sol. Energy*, **15**(4), pp. 299-302 (1974).

7. Sayigh, A., Al-Jandal, S. and Ahmed, H. "Dust Effect on solar flat surfaces devices in kuwait", *In Proceedings Of The Workshop On The Physics Of Non-Conventional Energy Sources And Materials Science For Energy*, pp. 2-20 (1985).
8. El-Shobokshy, M.S. and Hussein, F.M. "Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells", *Sol. Energy*, **51**(6), pp. 505-511 (Dec 1993).
9. Goossens, D. and Van Kerschaever, E. "Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance", *Sol. Energy*, **66**(4), pp. 277-289 (1999).
10. Offer, Z.I. and Goossens, D. "Airborne dust in the northern negev desert (January-December 1987): general occurrence and dust concentration measurements", *J. Arid Environ.*, **18**, (1), pp. 1-19 (Jan 1990).
11. Hottel, H. and Woertz, B. "Performance of flat-plate solar-heat collectors", *Trans. Asme Am. Soc. Mech. Eng. United States*, **64** (1942).
12. Dietz A. G.H., "Diathermanous materials and properties of surfaces," Zarem AM, Erway DD, editors. *Introduction to the utilization of solar energy*. New York: McGraw-Hill, pp. 59-86 (1963).
13. Michalsky, J.J., Perez, R., Stewart, R. and et al. "Design and development of a rotating shadowband radiometer solar radiation/daylight network", *Sol. Energy*, **41**(6), pp. 577-581 (1988).
14. Qasem, Hassan, Thomas R. Betts. and et al. "Effect of shading caused by dust on cadmium telluride photovoltaic modules", *In 2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, IEEE*, pp. 003199-003204 (2011).
15. Said, S.A.M. and Walwil, H.M. "Fundamental studies on dust fouling effects on pv module performance", *Sol. Energy*, **107**, pp. 328-337 (Sep 2014).
16. Appels, R. and et al. "Effect of soiling on photovoltaic modules", *Sol. Energy*, **96**, pp. 283-291 (Oct 2013).
17. Appels, R., Muthirayan, B., Beerten, A. and et al. "The effect of dust deposition on photovoltaic modules", *In 2012 38th Ieee Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 001886-001889 (June 2012).
18. Bouaouadja, N., Bouzid, S., Hamidouche, M. and et al. "Effects of sandblasting on the efficiencies of solar panels", *Appl. Energy*, **65**(1-4), pp. 99-105 (Apr 2000).
19. Mastekbayeva, G.A. and Kumar, S. "Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate", *Sol. Energy*, **68**(2), pp. 135-141, (Feb 2000).
20. O'hara, S.L., Clarke, M.L. and Elatrash, M.S. "Field measurements of desert zandiDust deposition in libya", *Atmos. Environ.*, **40**(21), pp. 3881-3897 (2006).
21. Mohamed, A.O. and Hasan, A. "Effect of dust accumulation on performance of photovoltaic solar modules in sahara environment", *J. Basic Appl. Sci. Res.*, **2**(11), pp. 11030-11036 (2012).
22. Kazem, H.A. and Chaichan, M.T. "Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in northern oman", *Sol. Energy*, **139**, pp. 68-80, (Dec 2016).
23. Wang, J., Gong, H. and Zou, Z. "Modeling of dust deposition affecting transmittance of Pv modules", *J. Clean Energy Technol.*, **5**(3), pp. 217-221 (May 2017).
24. El-Shobokshy, M.S., Mujahid, A. and Zakzouk, A.K.M. "Effects of dust on the performance of concentrator photovoltaic cells", *Iee Proc. I Solid State Electron Devices*, **132**(1), p. 5 (1985).
25. Yilbas, B.S. and et al. "Characterization of environmental dust in the dammam area and mud after-effects on bisphenol-a polycarbonate sheets", *Sci. Rep.*, **6**(1), p. 24308 (Jul 2016).
26. Hassan, G., Yilbas, B.S., Said, S.A.M. and et al. "Chemo-mechanical characteristics of mud formed from environmental dust particles in humid ambient air", *Sci. Rep.*, **6**(1), p. 30253 (Sep 2016).
27. Fitzpatrick, E.A. and Fitzpatrick, E.A. "Soil microscopy and micromorphology", **158**. *John Wiley & Sons New York*, Length 304 pages, (1993).
28. Zhang, H., Li, X., Du, C. and et al. "Corrosion behavior and mechanism of the automotive hot-dip galvanized steel with alkaline mud adhesion", *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **16**(4), pp. 414-421 (Aug 2009).
29. Jie, Z., Chuande, Z., Fuzhong, Z. and et al. "Experimental and numerical modeling of particle levitation and movement behavior on traveling-wave electric curtain for particle removal", *Part. Sci. Technol.*, **37**(6), pp.737-745 (2019).
30. Yilbas, B.S., Hassan, G., Ali, H. and et al. "Environmental dust effects on aluminum surfaces in humid air ambient", *Sci. Rep.*, **7**(1), p. 45999, (Dec 2017).
31. Yilbas, B.S., Ali, H., Khaled, M.M. and et al. "Influence of dust and mud on the optical, chemical, and mechanical properties of a pv protective glass", *Sci. Rep.*, **5**, p. 15833, (Oct 2015).
32. Yilbas, B.S., Ali, H., Al-Sharafi, A. and et al. "Environmental mud adhesion on optical glass surface: effect of mud drying temperature on surface properties", *Sol. Energy*, **150**, pp. 73-82 (Jul 2017).
33. Salari, A. and Hakkaki-Fard, A. "A numerical study of dust deposition effects on photovoltaic modules and photovoltaic-thermal systems", *Renew. Energy*, **135**, pp. 437-449 (May 2019).
34. Abdolzadeh, M. and Zarei, T. "Optical and thermal modeling of a photovoltaic module and experimental evaluation of the modeling performance", *Environ. Prog. Sustain. Energy*, **36**(1), pp. 277-293 (2017).
35. Zarei, T. and Abdolzadeh, M. "Optical and thermal modeling of a tilted photovoltaic module with sand particles settled on its front surface", *Energy*, **95**, pp. 51-66 (2016).
36. Zarei, T. and Abdolzadeh, M. "Optical and thermal simulations of photovoltaic modules with and without sun tracking system", *J. Sol. Energy Eng.*, **138**(1), p. 11001 (2016).
37. Zarei, T. and Abdolzadeh, M. "Optical and thermal modeling of a dusty photovoltaic module", (In Persian) *In 1st International Conference On Mechanical And Aerospace Engineering*, 2016, No 01-144, (April 2016).

38. Fujii, T. and Imura, H. "Natural-convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15**(4), pp. 755-767 (1972).
39. Radziemska, E. "Thermal performance of si and caas based solar cells and modules: a review", *Prog. Energy Combust. Sci.*, **29**(5), pp. 407-424 (2003).
40. Test, F.L., Lessmann, R.C. and Johary, A. "Heat transfer during wind flow over rectangular bodies in the natural environment", *J. Heat Transfer*, **103**(2), pp. 262-267 (1981).
41. Sharples, S. and Charlesworth, P.S. "Full-scale measurements of wind-induced convective heat transfer from a roof-mounted flat plate solar collector", *Sol. Energy*, **62**(2), pp. 69-77 (1998).
42. Armstrong, S. and Hurley, W.G. "A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions", *Appl. Therm. Eng.*, **30**(11-12), pp. 1488-1495 (2010).
43. Karava, P., Jubayer, C.M., and Savory, E. "Numerical modelling of forced convective heat transfer from the inclined windward roof of an isolated low-rise building with application to photovoltaic/thermal systems", *Appl. Therm. Eng.*, **31**(11-12), pp. 1950-1963 (2011).
44. Loveday, D.L. and Taki, A.H. "Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **39**(8), pp. 1729-1742 (1996).
45. Piedra, P.G., Llanza, L.R. and Moosmüller, H. "Optical losses of photovoltaic modules due to mineral dust deposition: experimental measurements and theoretical modeling", *Sol. Energy*, **164**(September 2017), pp. 160-173 (Apr 2018).
46. Zarei, T. and Abdolzadeh, M. "Improving prediction of a photovoltaic module temperature using an optical - thermal model", *In Ecres - 3. European Conference On Renewable Energy Systems*, No (October 2015).
47. Al-Housani, M., Bicer, Y. and Koç, M. "Experimental investigations on pv cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: comparison of cleaning techniques for drone retrofitting", *Energy Convers. Manag.*, **185**(September 2018), pp. 800-815 (2019).
48. Kumar, A. and Manish, S. "Analyzing the impact of dust accumulation and different cleaning mechanism on efficiency of solar photovoltaic panel", *Therm. Sci. Eng.*, **1**(3), pp. 1-6 (Aug 2018).
49. Toth, S. and et al. "Soiling and cleaning: initial observations from 5-year photovoltaic glass coating durability study", *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **185**(December 2017), pp. 375-384 (2018).
50. Luque, E.G., Antonanzas-Torres, F. and Escobar, R. "Effect of soiling in bifacial pv modules and cleaning schedule optimization", *Energy Convers. Manag.*, **174**(August), pp. 615-625 (2018).
51. Mostefaoui, M. and et al. "Importance cleaning of pv modules for grid-connected pv systems in a desert environment", *In 2018 4th International Conference On Optimization And Applications (Icoa)*, pp. 1-6 (2018).
52. Jiang, Y., Lu, L. and Lu, H. "A novel model to estimate the cleaning frequency for dirty solar photovoltaic (Pv) modules in desert environment", *Sol. Energy*, **140**, pp. 236-240 (Dec 2016).
53. Adinoyi, M.J. and Said, S.A.M.M. "Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules", *Renew. Energy*, **60**, pp. 633-636 (Dec 2013).
54. Mohandes, B.M.A., El-Chaar, L. and Lamont, L.A. "Application study of 500 W photovoltaic (Pv) system in the uae", *Appl. Sol. Energy*, **45**(4), pp. 242-247 (Dec 2009).
55. Touati, F., Al-Hitmi, M. and Bouchech, H. "Towards understanding the effects of climatic and environmental factors on solar pv performance in arid desert regions (Qatar) for various pv technologies", *In 2012 First International Conference On Renewable Energies And Vehicular Technology*, pp. 78-83 (2012).
56. Boykiw, E. "The effect of settling dust in the arava valley on the performance of solar photovoltaic panels", *The senior thesis in department of environmental science allegheny college meadville, pennsylvania, Usa*, **36**, pp. (2011).
57. Hegazy, A.A. "Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors", *Renew. Energy*, **22**(4), pp. 525-540 (Apr 2001).
58. Gholami, A., Saboonchi, A. and Alemrajabi, A.A. "Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications", *Renew. Energy*, **112** (2017).
59. Gholami, A., Alemrajabi, A.A. and Saboonchi, A. "Experimental study of self-cleaning property of titanium dioxide and nanospray coatings in solar applications", *Sol. Energy*, **157** (2017).
60. Mekhilef, S., Saidur, R. and Kamalisarvestani, M. "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **16**(5), pp. 2920-2925 (Jun 2012).
61. Hee, J.Y., Kumar, L.V., Danner, A.J. and et al. "The effect of dust on transmission and self-cleaning property of solar panels", *Energy Procedia*, **15**(2011), pp. 421-427 (2012).
62. Callot, Y., Marticorena, B., Bergametti, G. and et al. "Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the sahara desert", *Geodin. Acta*, **13**(5), pp. 245-270 (Oct 2000).
63. Goossens, D., Offer, Z.Y. and Zangvil, A. "Wind tunnel experiments and field investigations of eolian dust deposition on photovoltaic solar collectors", *Sol. Energy*, **50**(1), pp. 75-84 (Jan. 1993).
64. Gaier, J.R. and Perez-Davis, M.E. "Effect of particle size of martian dust on the degradation of photovoltaic cell performance", *In International Solar Energy Conference*, April 4-8 pp. 1-17 (1992).
65. Albusairi, H.A. And Möller, J. "Performance evaluation of cdte pv modules under natural outdoor conditions in kuwait", *In 25th European Solar Energy Conference And Exhibition/5th World Conference On Photovoltaic Energy Conversion*, Valencia, Spain, pp. 6-10 (September 2010)

66. Xu, R., Ni, K., Hu, Y. and et al. "Analysis of the optimum tilt angle for a soiled pv panel", *Energy Convers. Manag.*, **148**(September), pp. 100-109 (Sep 2017).
67. J.A. Duffie. and Beckman, W.A. "Solar engineering of thermal processes", New York:Wiley, pp.770-772 (1991).
68. Modarres-Gheisari, S.M.M., Gavagsaz-Ghoachani, M., Malaki, M. and et al. "Ultrasonic nano-emulsification - A review", *Ultrason. Sonochem.*, **Nov**, **52**, pp.88-105 (2019).
69. Al Shehri, A., Parrott, B., Carrasco, P. and et al. "Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for pv modules applications", *Sol. Energy*, **135**, pp. 317-324 (Oct 2016).
70. Williams, R.B., Tanimoto, R., Simonyan, A. and et al. "Vibration characterization of self-cleaning solar panels with piezoceramic actuation", *In 48th Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc Structures, Structural Dynamics, And Materials Conference*, pp. 512-520 (2007).
71. Fernandez, D., Cabas, R. and Moreno, L. "Dust wiper mechanism for operation in mars. eur. sp. agency, special publ", *Esa Sp.* (Sp-653) (2007).
72. He, G., Zhou, C. and Li, Z. "Review of self-cleaning method for solar cell array", *Procedia Eng.*, **16**, pp. 640-645 (2011).
73. Sun, Q., Yang, N., Cai, X. and et al. "Mechanism of dust removal by a standing wave electric curtain", *Sci. China Physics, Mech. Astron.*, **55**(6), pp. 1018-1025 (Jun 2012).
74. Sharma, R., Wyatt, C., Zhang, J. and et al. "Performance analysis of electrodynamic self-cleaning transparent films for its applications to mars and lunar missions", *In 2007 Ieee Industry Applications Annual Meeting*, pp. 434-437 (2007).
75. Sharma, R., Wyatt, C.A., Zhang, J. and et al. "Experimental evaluation and analysis of electrodynamic screen as dust mitigation technology for future mars missions", *Ieee Trans. Ind. Appl.*, **45**(2), pp. 591-596 (2009).
76. Mazumder, M.K., Sharma, R., Biris, A.S. and et al. "Self-cleaning transparent dust shields for protecting solar panels and other devices", *Part. Sci. Technol.*, **25** (1), pp. 5-20 (Jan 2007).
77. Sims, R. and Biris, A. "Development of a transparent self-cleaning dust shield for solar panels", *Proc. ESA-IEEE Jt. Meet. Electrostat*, **814**(1), pp. 1-8 (2003).
78. Atten, P., Pang, H.L. and Reboud, J.-L. "Study of dust removal by standing-wave electric curtain for application to solar cells on mars", *Ieee Trans. Ind. Appl.*, **45**(1), pp. 75-86 (2009).
79. Bock, J.P., Robinson, J., Sharma, R. and et al. "An efficient power management approach for self-cleaning solar panels with integrated electrodynamic screens", *In Proc. Esa Annual Meeting On Electrostatics* (2008).
80. Pedrazzi, S., Allesina, G. and Muscio, A. "Are nano-composite coatings the key for photovoltaic panel self-maintenance: an experimental evaluation", *Energies*, **11**(12), p. 3448 (Dec 2018).
81. Jang, G.G., Smith, D.B., Polizos, G. and et al. "Transparent superhydrophilic and superhydrophobic nanoparticle textured coatings: comparative study of anti-soiling performance", *Nanoscale Adv.*, **1**(3), pp. 1249-1260 (2019).
82. Wang, P. and et al. "Reducing the effect of dust deposition on the generating efficiency of solar pv modules by super-hydrophobic films", *Sol. Energy*, **169**(November 2017), pp. 277-283 (Jul 2018).
83. Jang, G.G. and et al, "The anti-soiling performance of highly reflective superhydrophobic nanoparticle-textured mirrors", *Nanoscale*, **10**(30), pp. 14600-14612 (2018).
84. Ahmadipour, S. and Golzarian, M. "Photovoltaic solar panel cleaning methodes", *In 4th International Conference Of Technology And Energy Management*, Tehran, Iran (2018).
85. Cao, L.B., Cui, C.Z., Zhu, N.Y. and et al. "Study on the difference of frontal impact response among people of different sizes", *Appl. Mech. Mater.*, **34-35**, pp. 111-116 (Oct 2010).
86. Park, Y.-B., Im, H., Im, M. and et al. "Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications," *J. Mater. Chem.*, **21**(3), pp. 633-636 (2011).
87. Verma, L.K. and et al. "Self-cleaning and antireflective packaging glass for solar modules", *Renew. Energy*, **36**(9), pp. 2489-2493 (Sep 2011).