Archive of SID

مروری بر اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک

اصلان غلامی[۱]، شهاب اسلامی[۲]، آرین تاجیک[۳]، محمد عامری[۴]، رقیه گوگساز قوچانی[۵]، مجید زندی[۶،*]

۱- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، aslan.gholami@gmail.com
۲- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، shahab.eslami@gmail.com
۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، tajikaryan@yahoo.com
۴- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_ameri@sbu.ac.ir
۵- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، r_gavagsaz@sbu.ac.ir
۶- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران، m_zandi@sbu.ac.ir

چکیده: **استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک یکی از رایج‌ترین روش‌های برداشت انرژی خورشیدی به منظور تولید برق است. عملکرد این سامانه‌ها در تبدیل انرژی خورشیدی به برق، به شدت تابعی از شرایط محیطی همچون میزان تابش خورشیدی، دمای محیط، باد، رطوبت و سایر پارامترهای محیطی می‌باشد. بسیاری از مناطقی که دارای پتانسیل تابشی بالایی جهت نصب پنل‌های فتوولتاییک می‌باشند، مناطقی با آب و هوای خشک هستند و پدیده گرد و غبار در این مناطق به شدت بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک تاثیر می‌گذارد. این معضل در اقلیم ایران، که به طور مکرر با طوفان‌های گرد و غبار و انتشار ریزگردها مواجه بوده، بسیار جدی‌تر است. اولین گام در حل این مشکل، آشنایی با نحوه نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک و پارامترهای موثر بر این فرایند است. از این‌رو مقاله حاضر به مرور جامع پژوهش‌های صورت گرفته در حوزه تاثیر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های خورشیدی می‌پردازد. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان مرجع کاملی برای استفاده پژوهشگران، طراحان و مهندسانی که با سامانه‌های فتوولتاییک در مناطقی مانند خاورمیانه و به ویژه ایران، که با مشکل گرد و غبار دست و پنجه نرم می‌کنند، قرار گیرد.**

واژه های کلیدی: **انرژی خورشیدی؛ گرد و غبار؛ پنل فتوولتاییک؛ باد؛ دما؛ رطوبت.**

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۷/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۷/۱۲/۰۶

نام نویسنده‌ی مسئول : مجید زندی

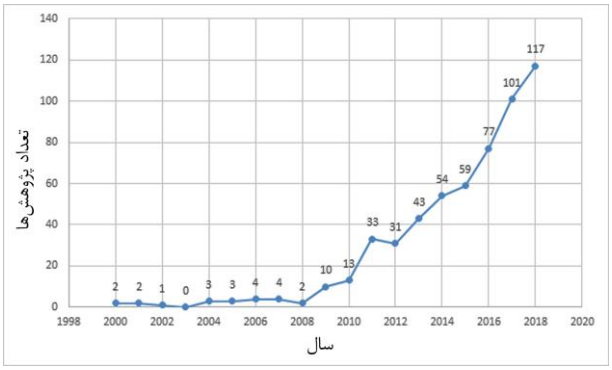
نشانی نویسنده‌ی مسئول : حکیمیه – بلوار بهار – پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور دانشگاه شهید بهشتی تهران – ساختمان جابربن‌حیان | کدپستی ۱۶۵۸۹۵۳۵۷۱

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با تاثیر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک نشان می‌دهد که تا قبل از سال ۲۰۰۸ مطالعه‌های بسیار محدود و پراکنده‌ای در این حوزه در دنیا انجام شده است. با این حال با توسعه سامانه‌های فتوولتاییک در دنیا و به خصوص در منطقه‌های چون خاورمیانه و شمال آفریقا که با وجود پتانسیل بالای تابش به شدت با پدیده 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. بنابراین افزایش قابل توجهی در تعداد پژوهش‌های منتشر شده در این حوزه به ویژه از سال ۲۰۰۹ قابل مشاهده است. به عنوان مثال، از مجموع ۵۹۰ مطالعه صورت گرفته در این زمینه، ۵۵۹ مورد در دهه گذشته منتشر شده است (**شکل ۱**).



شکل ۱- تعداد پژوهش‌ها در حوزه تاثیر گرد و غبار بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک (۲۰۰۰-۲۰۱۸).

در یکی از پژوهش‌های اولیه در این زمینه، سلیم[1] و همکارانش [1]، یک سامانه فتوولتاییک آزمایشی برای بررسی تاثیر گرد و خاک بر میزان تولید انرژی الکتریکی در درازمدت، در یک مزرعه خورشیدی در نزدیکی ریاض، عربستان سعودی، نصب کردند. با زاویه شیب ثابت ۲۴/۶° نسبت به افق، میزان کاهش انرژی تولید شده ماهانه در مقایسه با یک سامانه مشابه که روزانه تمیز می‌شده است، گزارش گردیده است. کاهش میزان انرژی تولید شده در پایان ماه هشتم ۳۲٪ گزارش شده است. البته در این کار هیچ‌گونه اشاره‌ای به میزان گرد و خاک نشسته شده روی پنل‌ها و همچنین مشخصه‌های فیزیکی سایت آزمایش نشده است، بنابراین اطلاعات بیان شده به‌نظر گمراه کننده می‌رسد (در سایت‌های آلوده این کاهش انرژی در چند هفته اتفاق می‌افتد نه در ۸ ماه). برای مثال در کار دیگری که توسط حسن[2] و همکارانش [2]، در مصر انجام شده است، نشان داده شده که کاهش انرژی در ۳۰ روز اول نصب سریع‌تر اتفاق می‌افتد. نتایج گزارش شده بیان می‌کند که میزان کاهش انرژی بعد از یک ماه ٪۳۳/۵ است و این کاهش تا ٪۶۵/۸ بعد از شش ماه، بدون تمیز کردن، افزایش می‌یابد.

در تحقیقی مشابه، گارگ[3] [3]، عبور عمودی[4] تابش مستقیم[5] از یک شیشه را در یک دوره ۳۰ روزه مورد مطالعه قرار داد و نتایج حاکی از آن بود که بر اثر نشست گرد و غبار، ضریب عبور برای شیشه افقی از ٪۹۰ به ٪۳۰ کاهش می‌یابد. در مطالعه‌های دیگری در همین زمینه در کویت توسط صایغ[6] و همکارانش [4]، مشاهده شد که برای صفحه‌های شیشه‌ای با شیب °۰، °۱۵، °۳۰، °۴۵ و °۶۰، بعد از ۳۸ روز قرار گرفتن در محیط به ترتیب ٪۶۴، ٪۴۸، ٪۳۸، ٪۳۰ و ٪۱۷ کاهش در میزان عبور نور رخ می‌دهد. در اینجا نیز تفسیر اطلاعات دشوار می‌باشد چرا که اندازه‌گیری صفحه‌های تمیز و کثیف در روزهای متفاوتی صورت گرفته است و به نظر نمی‌رسد که تمهیداتی برای یکسان‌سازی شرایط آزمایش صورت گرفته باشد.

در مطالعه‌ای دیگر، الشبکشی[7] و حسین [5]، در آزمایشگاه، صفحه‌های فتوولتاییک را در معرض انواع متفاوتی از گرد و غبار و آلودگی قرار دادند و تحت شرایط متفاوت میزان انرژی الکتریکی خروجی را اندازه‌گیری نمودند. از این مطالعه دریافتند که جنس گرد و غبار نیز بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک تاثیر داشته است و نمی‌توان مانند کارهای پیشین، فقط به مدت زمان قرار گرفتن در محیط ارتباط داد. 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، تاثیر زیادی روی انرژی خروجی پنل‌های خورشیدی دارند. البته این تحقیق محدودیت‌هایی نیز دارد که شاید مهم‌ترین محدودیت این باشد که آزمایش‌ها تحت شرایط بدون وزش باد صورت گرفته‌اند. در حالی‌که در شرایط طبیعی وزش بادهای ملایم تاثیر قابل توجهی در میزان نشست گرد و غبار روی صفحه‌های تخت دارد [6] ,[7].

علاوه بر مطالب اشاره شده، چند تحقیق دیگر نیز در زمینه بررسی تاثیر گرد و غبار در مناطق بارانی صورت گرفته است. در یکی از مطالعه‌های اولیه، هتل و ورتز[8] [8]، در یک دوره ۳ ماهه به بررسی کلکتورهایی با زاویه شیب نصب °۳۰ در یک منطقه صنعتی در کنار یک نیروگاه و در فاصله ۹۲ متری از یک خط راه آهن ۴ ریلی، پرداختند. نتایج تجربی آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که اثر گرد و غبار در عملکرد کلی کلکتورها به طور شگفت انگیزی (٪۴/۷) کوچک می‌باشد و محاسبه‌های انجام شده نیز حاکی از آن است که حداکثر میزان کاهش ضریب عبور پوشش شیشه‌ای ٪۴/۷ می‌باشد. آن‌ها این مقادیر کوچک گزارش شده را به خاصیت خود تمیزشوندگی شیشه‌ها که ناشی از برف و باران زیاد در شهر بوستن آمریکا[9] است، نسبت دادند.

[1] Salim
[2] Hassan

[2] Garg
[3] Normal Transmittance
[4] Direct Radiation
[5] Sayigh
[6] El-Shobokshy
[7] Hottel H & Woertz M
[1] Boston, USA

www.SID.ir

Archive of SID

در مطالعه مشابه دیگر اما برای زوایای بین ۰° و ۵۰°، داده‌های حاصل از تحقیقات دیتز[1] [9]، کاهش ۵٪ در نور رسیده به صفحه جاذب به علت تجمع گرد و غبار را نشان می‌دهد. این یافته‌ها بعدها توسط میچالسکی[2] و همکارانش [10]، تایید شده است. آن‌ها عملکرد دو دستگاه پیرانومتر[3]، که یکی از آن‌ها روزانه تمیز می‌شده و دیگری در طول ۲ ماه دوران آزمایش تمیز نگشته است، را در شهر آلبانی در نیویورک[4]، بررسی کرده‌اند. سایت مورد بررسی در این دوره در هر ۱۰ روز حداقل یک بار بارندگی داشته است و از این رو نتایج آزمایش‌های آن‌ها، ۱٪ کاهش در مقادیر به‌دست آمده را نشان می‌دهد.

بررسی مطالعه‌های اولیه در این حوزه حاکی از آن است که پژوهش‌های محدود صورت گرفته در این زمینه، داده‌های کافی در ارتباط با نرخ نشست گرد و غبار و نیز شرایط جوی حاکم در سایت‌های مورد آزمایش ارائه نمی‌دهند. به علاوه تغییرات اقلیمی و محیطی به شدت بر میزان اثر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک تاثیر دارد. بنابراین، اطلاعات بیشتری به منظور طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک و همچنین تعمیم میزان کاهش در عملکرد و کارایی آن‌ها به دلیل تجمع گرد و غبار در مناطق مختلف مورد نیاز است.

از این‌رو مقاله حاضر، به بررسی پیشینه مطالعه‌های صورت گرفته در حوزه تاثیر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک می‌پردازد. ابتدا خصوصیات فیزیکی و شیمیایی ذرات گرد و غبار و اثر آن‌ها در حوزه پژوهش حاضر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه نیز، تحقیق‌هایی که به اثر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک پرداخته‌اند، مورد بررسی دقیق قرار گرفته می‌شوند. در انتها نیز روش‌های حذف گرد و غبار از سطح پنل‌های فتوولتاییک مورد مطالعه قرار خواهند گرفت.

۲- خصوصیات ذرات گرد و غبار

برای درک بهتر تاثیر تجمع و نشست ذرات گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک، مشخصه‌های ذرات گرد و غبار شامل اندازه ذرات، تحلیل مورفولوژی[5] و ترکیب شیمیایی آن‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بخش به بررسی برخی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه پرداخته می‌شود.

۲-۱- اندازه ذرات

در پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه، برای تعیین اندازه و مورفولوژی توزیع ذرات در بیشتر موارد از تکنیک‌های نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی[6] و میکروسکوپ پروبی روبشی[7] بهره گرفته شده است. **جدول ۱** اندازه و مورفولوژی توزیع ذرات گرد و غبار جمع‌آوری شده از کشورهای مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خصوصیات اندازه و مورفولوژی توزیع ذرات در برخی از کشورهای دنیا.

محل جمع‌آوری گرد و غبار	ابعاد ذرات (μm)	اطلاعات تکمیلی
کویت [11]	۸-۴	عمده ذرات گرد و غبار در ابعاد سیلت[8] (ابعاد بین ماسه و رس) گزارش شده‌اند. ذرات سیلت کوچک‌تر از جنس اسلیت[9] می‌باشند و ذرات بزرگ‌تر از جنس کوارتز[10] می‌باشند.
ظهران، عربستان [12]	۱۷۶-۰/۵	شکل‌های مختلف و نامنظم، اما به‌طور کلی، متمایل به کروی شکل هستند.
بلژیک [13], [14]	۱۰-۲	سایر نمونه‌های آزمایش شده عبارتند از: سیمان ۱۰ میکرومتر، خاک رس ۶۸ میکرومتر و شن و ماسه سفید ۲۵۰ میکرومتر
الجزیره [15]	۷۸۰-۹۵	شکل ذرات نامنظم است اما به‌طور تقریبی کروی است.
بانکوک، تایلند [16]	۷۸-۵۳	خاک رس نرم برای تهیه گرد و خاک مصنوعی
لیبی [17], [18]	۰.۵- ۱۰۰۰	اندازه ذرات گرد و غبار در ماه‌های مختلف به‌صورت متغیر
عمان [19]	۶۳-۲	پراکندگی گرد و غبار بر سطح از یک مکان به مکان دیگر متفاوت است.
قطر[20]	میانگین ۲	تعداد محدودی ذرات غیریکنواخت با ابعاد (μm)۱۰ نیز گزارش شده است.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که ذرات ریزتر نسبت به ذرات درشت، تاثیر بیشتری بر عملکرد ماژول‌های فتوولتاییک دارند. الشبکشی و حسین [5]، تاثیر نشست خاکستر، سیمان و سه نوع سنگ آهک با قطر متوسط ۵، ۱۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ میکرومتر بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک را تحت شرایط کنترل شده آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که در لایه‌نشانی با چگالی گرد و غبار مساوی (۲۵ گرم بر مترمربع) اما با قطرهای گوناگون سنگ آهک، ذرات کوچک‌تر توان خروجی را بیشتر کاهش می‌دهند. مطالعه

[2] Dietz A
[3] Michalsky
[4] Pyranometer
[5] Albany, New York
[5]Morphology

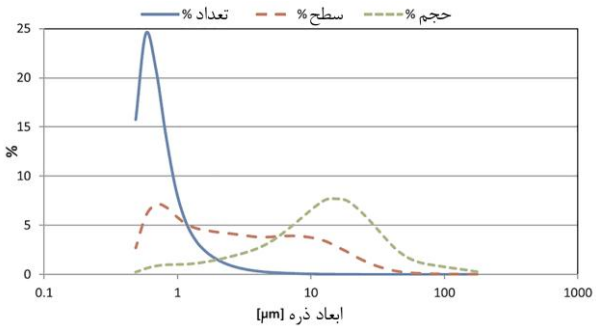
[6] Scanning Electron Microscope (SEM)
[7] Scanning Probe Microscope
[8] Silt
[9] Slate
[10] Quartz

www.SID.ir

Archive of SID

آن‌ها هم‌چنین نشان داد که توان خروجی سامانه فتوولتاییک هنگام لایه‌نشانی ذرات خاکستر و سیمان به ترتیب، ۴۰ و ۹۰ درصد، کاهش یافت. این تفاوت ناشی از توزیع یکنواخت‌تر ذرات با ابعاد کم‌تر (خاکستر) بر سطح پنل گزارش شده است.

الشبکشی و همکاران[21]، در پژوهشی دیگر عنوان داشتند که بادهایی با سرعت بالا، ذرات درشت‌تر را آسان‌تر و درنتیجه بیشتر جابه‌جا می‌کنند. به گزارش آن‌ها برای ذرات ریزتر، ۷ تا ۱۵ درصد از جرم غبار نشسته شده بر سطح پنل، توسط باد از روی سطح حذف می‌گردد، در حالی‌که برای ذرات درشت‌تر در حدود ۱۵-۲۰ درصد از جرم غبار نشسته بر سطح ممکن است حذف شود. علاوه بر باد، جاذبه گرانش نیز به‌طور چشم‌گیری نرخ تجمع گرد و غبار بر سطح را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نرخ تجمع متاثر 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 می‌باشد. مطابق کار آن‌ها در **شکل ۲** فراوانی، مساحت و حجم توزیع ذرات گرد و غبار در ابعاد مختلف قابل مشاهده است.



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

۲-۲- تحلیل واکنش‌های شیمیایی گرد و غبار

ذرات گرد و غبار در اقلیم مرطوب، بخار آب را جذب و یک لایه گل[1] روی پنل می‌نشاند. هنگامی‌که این لایه تحت حرارت و تابش آفتاب خشک می‌گردد، به علت افزایش چسبندگی، حذف آن از سطح پنل بسیار دشوارتر می‌گردد [22], [23]. واکنش آب با ذرات گرد و غبار به دلیل جذب مؤثر مولکول‌های آب توسط ذرات گرد و خاک صورت می‌گیرد. این جذب ملکول‌های آب توسط خاک به‌سبب ایجاد ناحیه عدم تعادل نیرو بین مولکول‌های آب، یون‌های حل شده و ذرات خاک رخ می‌دهد و به اندازه ذرات گرد و غبار بستگی دارد[24]. علاوه بر این، گل تشکیل شده در این حالت از منظر شیمیایی فعال است و با سطح در تماس، واکنش می‌دهد و تاثیر مهمی بر افزایش نیروی چسبندگی بین گل و سطح دارد [25]–[27].

حل شدن ذرات گرد و غبار مانند کلسیت[2] و هالیت[3]، طی واکنش‌های (۱)، (۲) و (۳) صورت می‌گیرد. واکنش (۱)، واکنش هالیت با مولکول‌های آب را نشان می‌دهد که طی آن کلرید و سدیم را به‌صورت یون‌های مجزا جدا می‌کند و در مولکول‌های آب حل می‌شوند. واکنش (۲) نیز، نحوه انحلال کربن‌دی اکسید در آب و تشکیل اسید کربنیک را نشان می‌دهد که در ادامه منجر به انحلال کلسیت در آب طی واکنش (۳) می‌گردد.

(۱)

$$NaCl + H_2O \rightarrow Na^{+1} + Cl^{-1} + H_2O$$

(۲)

$$H_2O + CO_2 \rightarrow H_2CO_3$$

(۳)

$$H_2CO_3 + CaCO_3 \rightarrow Ca^{+2} + 2(HCO_3)^-$$

طی فرآیند خشک شدن گل و تبخیر آب موجود، یون‌های حل شده (Na^+, K^+, Ca^{+2}, Cl^-, SiO^-) به‌دلیل نیروی الکترواستاتیک و پیوند یونی جذب ساختار گل می‌شوند و بلورهایی را تشکیل می‌دهند که باعث افزایش نیروی چسبندگی می‌شوند [28], [29].

۳- اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک

در مناطق و اقلیم‌های مختلف، تاثیر نشست گرد و غبار روی سطح پنل متفاوت است. این میزان تاثیر می‌تواند متاثر از سرعت باد، میزان رطوبت و بارش، فن‌آوری استفاده شده در پنل فتوولتاییک، منبع ذرات گرد و غبار، نوع گرد و غبار و جنس پوششی که روی سطح پنل فتوولتاییک کشیده شده است، باشد.

با مرور مطالعه‌های انجام شده در زمینه تاثیر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک می‌توان نحوه این تاثیر را به دو دسته کلی تقسیم کرد. در وهله اول، ذرات غباری که در هوا وجود دارند و بزرگتر از طول موج تابش خورشید می‌باشند، می‌توانند جلوی تابش خورشید را بگیرند و میزان تابش ورودی به هر پنل را کاهش دهند [30]. این پدیده هنگامی‌که با آلودگی هوا ترکیب شود، مضرتر خواهد بود [31]. در این شرایط افزایش دمای محیط و نیز کاهش تابش خورشیدی رسیده به سطح پنل‌ها، هر دو باعث کاهش عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک می‌شود. برای بررسی شدت این کاهش، اصل سلیمانی[4] و همکاران [32]، به بررسی تأثیر آلودگی هوا بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک در تهران پرداختند. بر اساس مطالعه‌های تجربی آنها، کاهش ۶۰ درصدی تولید انرژی پنل‌ها تحت گرد و غبار همراه با آلودگی هوا گزارش شده است. اثر دوم مربوط نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌ها و تشکیل لایه‌ای با ضخامت و شفافیت متفاوت بر سطح است [33]. این لایه تشکیل شده، می‌تواند مشخصه‌های نوری پنل را تغییر داده و باعث انعکاس نور و درنهایت کاهش توان خروجی پنل فتوولتاییک گردد [34]–[36]. علاوه بر این وجود لایه‌ای از گرد و غبار انتقال حرارت از

[1] Mud
[2] Calcite ($CaCO_3$)
[3] Halite ($NaCl$)
[4] Asl-Soleimani

www.SID.ir

Archive of SID

سطح پنل را نیز دچار اختلال خواهد کرد و دمای سلول را افزایش می‌دهد [37]. **جدول ۲** برخی از مطالعه‌های صورت گرفته در ارتباط با تاثیر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک را نشان می‌دهد.

جدول ۲ – برخی از پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با تاثیر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک.

مکان انجام آزمایش	مدت زمان	تاثیر گزارش شده در پژوهش
عربستان [38]	شش ماه	افت بیش از ۵۰٪ عملکرد در پایان آزمایش
عربستان [12]	پنج هفته	متوسط افت عملکرد ۶٪ در طول دوره آزمایش
عربستان [39]	یک ماه	متوسط افت عملکرد ۷٪ در ماه
عربستان [40]	شش هفته	متوسط افت عملکرد ۱۳٪ در طول دوره آزمایش
قطر [41]	صد روز	افت ۱۰٪ عملکرد در پایان آزمایش
فلسطین [42]	یک هفته	افت ۵-۶٪ عملکرد در پایان آزمایش
مصر [43]	بیست و یک روز	افت ۵٪ عملکرد در پایان آزمایش
مصر [44]	یک ماه	متوسط افت عملکرد پنل ۱۷.۴٪ در ماه
امارات [45]	پنج هفته	افت ۱۰٪ عملکرد در پایان آزمایش
اسپانیا [46]	دو ماه	افت بیش از ۴٪ عملکرد پنل بعد از ۱۵ روز و افت ۱۵٪ عملکرد در پایان آزمایش
آمریکا [47]	دو ماه	متوسط ماهانه افت عملکرد ۱٪ در مکان‌های کویری کم تا ۱۱/۵٪ در زمین‌های کشاورزی در دره مرکزی کالیفرنیا
یونان [48]	هشت هفته	افت ۶/۵٪ عملکرد در پایان آزمایش

مرور پژوهش‌های ارائه شده در **جدول ۲**، بار دیگر به اهمیت شرایط اقلیمی و محیطی بر عملکرد پنل‌های خورشیدی تاکید می‌کند. به علاوه اکثر مطالعه‌های صورت گرفته در این حوزه در بازه زمانی کمتر از ۶ ماه صورت گرفته‌اند، که این نکته را می‌توان به عنوان نقطه ضعف بسیاری از آن‌ها عنوان داشت.

همان‌طور که در **جدول ۳** نشان داده شده است، در منطقه‌هایی با کمبود بارش؛ مانند کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا (اقلیم گرم و مرطوب) توان خروجی پنل فتوولتاییک به میزان چشم‌گیری افت داشته است. به‌عنوان مثال در ظهران[1]، عربستان، بعد از ۶ ماه قرار دادن پنل‌ها در معرض شرایط محیطی، کاهش ۵۰ درصدی توان خروجی پنل‌ها گزارش شده است. در مطالعه‌ای دیگر نیز در عرعر[2]، عربستان، افت روزانه ۲/۷۸ درصدی جریان اتصال‌کوتاه در پنل‌ها گزارش شده است. هگازی[3] نیز در پژوهشی دیگر و در منطقه‌ای کم بارش در مصر، کاهش ۲۰ درصدی ضریب عبور پوشش شیشه‌ای 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 فتوولتاییک نیز گشت [49].

البته همان‌طور که در جدول مشاهده می‌گردد، با وجود بارش بیشتر باران در مصر نسبت به عربستان، افت خروجی پنل‌ها در مصر بیشتر بوده است. این مطلب نشان می‌دهد که علاوه بر میزان بارش باران، عوامل متعددی دیگری نیز بر میزان نشست گرد و غبار بر سطوح فتوولتاییک تاثیرگذار می‌باشند. از میان پارامترهای موثر بر نشست گرد و غبار بر سطح می‌توان به میزان وزش باد و جهت آن، جنس گرد و غبار، چسبندگی ذرات غبار، فشار هوا، رطوبت موجود در جو، جنس پوشش شیشه‌ای پنل و شیب نصب پنل‌ها اشاره کرد. از این‌رو، انجام مطالعات تکمیلی در ارتباط با هر اقلیم بسیار حائز اهمیت است.

جدول ۳ – افت عملکرد پنل‌های فتوولتاییک در مناطقی با کمبود بارش و اقلیم گرم و مرطوب.

مکان	بارش سالانه (ml)	کاهش توان خروجی پنل	بازه زمانی اندازه‌گیری
عربستان [38]	۱۰-۶	٪۵۰	۲۶ هفته
امارات [45]	۹۰-۸۰	٪۱۰	۵ هفته
قطر [41]	۷۵-۷۰	٪۱۰	۱۴ هفته
فلسطین [42]	۴۰-۳۰	٪۶-۵	۱ هفته
مصر [49]	۵۰-۱۸	٪۷۰-۶۰	۲۶ هفته

۳-۱- اثر گرد و غبار بر ضریب عبور پوشش شیشه‌ای پنل

برای بررسی اثر نشستن گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک و کاهش ضریب عبور پوشش شیشه‌ای و به عبارت دیگر تابش رسیده به سطح پنل، پژوهش‌های مختلفی در دنیا صورت گرفته است که خلاصه‌ای از مهم‌ترین آن‌ها در **جدول ۴** نشان داده شده است.

اگر چه بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که با افزایش میزان گرد و غبار روی سطح، عملکرد پنل به‌طور چشم‌گیری کاهش می‌یابد [54]–[50]، به دلیل ماهیت توزیع گرد و غبار و نیز جنس متفاوت گرد و غبار در اقلیم‌های مختلف، این رابطه به‌صورت کامل

[1]Dhahran
[2]Arar
[3]Hegazy

www.SID.ir

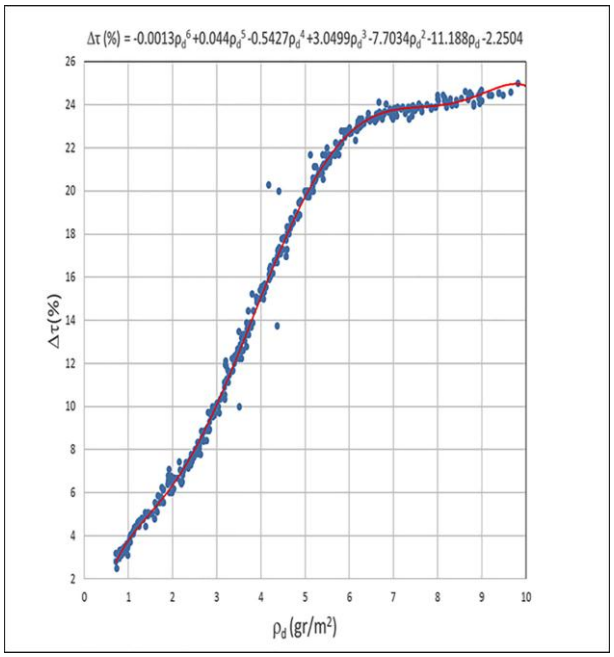
Archive of SID

خطی نیست [56] ,[55]. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای توسط کومار[1] و همکاران [57]، در چگالی گرد و غبار نشسته بر سطح ۱۲/۵، ۲۵ و ۳۷/۵ گرم در هر مترمربع، افت عملکرد پنل‌ها به‌ترتیب، ۱۰، ۱۶ و ۲۰ درصد گزارش شده است. هم‌چنین در مطالعه‌ای دیگر [35]، کاهش ۲۶ درصدی خروجی عملکرد پنل فتوولتاییک در چگالی گرد و غبار ۲۲ گرم در هر مترمربع گزارش شده است.

جدول ۴ - خلاصه‌ای از برخی پژوهش‌های بررسی اثر گرد و غبار بر ضریب عبور پوشش شیشه‌ای.

مکان انجام پژوهش	بازه زمانی	افت کلی ضریب عبور ناشی از نشست گرد و غبار در پایان آزمایش
عربستان [12]	۴۰ روز	٪۳۷
عربستان [40]	۴۵ روز	٪۲۰
بلژیک [13]	۵ هفته	٪۴-۳
مصر [49]	۳۰ روز	٪۲۰
الجزیره [15]	۲ ساعت (تحت شرایط کنترلی آزمایشگاهی)	٪۱۶
تایلند [16]	۳۰ روز	٪۱۳ (کاهش ضریب عبور شیشه از مقدار ٪۸۷/۹ به ٪۷۵/۸)
انگلیس [58]	گزارش نشده است	٪۵ (ابعاد گرد و غبار در حدود ۱-۵۰۰ میکرومتر)
آمریکا [59]	۴ ماه	٪۲۵
نوروژ [60]	۱ هفته	٪۲-۱
چین [61]	۸ روز	٪۲۰
ایران (اصفهان) [62]	۱۰ هفته	٪۲۵ (افت ضریب عبور در جهات مختلف جغرافیایی و شیب‌های مختلف نصب متفوت گزارش شده است)

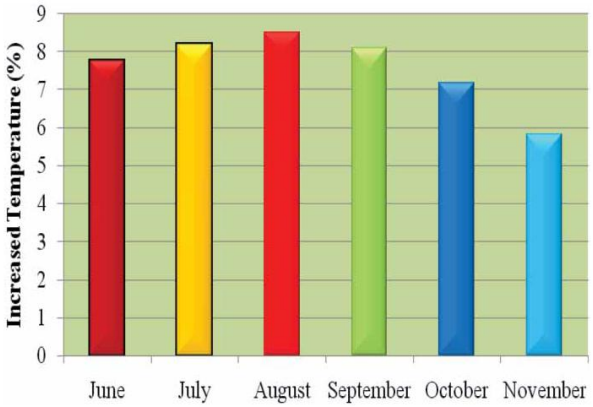
در مطالعه‌ای دیگر توسط غلامی و همکاران در شهر اصفهان [62]، میزان افت ضریب عبور شیشه بر حسب چگالی سطحی گرد و غبار نشسته بر آن مورد بررسی قرار گرفت و رابطه‌ای برای این افت ارائه گردید (**شکل ۳**). در بازه زمانی ۷۰ روزه این پژوهش هیچ‌گونه بارشی گزارش نشده است و نشست گرد و غبار بر سطح پنل منجر به افت ۲۵٪ ضریب عبور در پایان دوره داده‌برداری شده است.



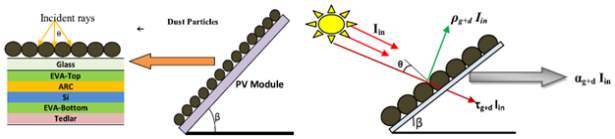
شکل ۳ - منحنی افت ضریب عبور شیشه بر حسب چگالی سطحی گرد و غبار.

۳-۲- اثر گرد و غبار بر دمای پنل‌های فتوولتاییک

نشست گرد و غبار بر سطح پنل فتوولتاییک منجر به تغییر نرخ انتقال حرارت از سطح پنل نیز می‌گردد. در این راستا، روح‌الامینی[2] و همکاران [63]، به صورت تجربی به بررسی اثر تجمع گرد و غبار بر دمای سلول‌های فتوولتاییک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که دمای سلول‌هایی که گرد و غبار بر آن‌ها نشسته است، به طور متوسط ۶-۸٪ بالاتر از سلول تمیز است و با افزایش تجمع گرد و غبار، دمای سلول نیز بالاتر می‌رود (**شکل ۴**).



شکل ۴ - افزایش دمای سلول به علت نشست گرد و غبار بر سطح.



شکل ۵ - لایه های مختلف ماژول فتوولتاییک و لایه گرد و غبار نشسته بر سطح پنل.

[1] Kumar

[2] Rouholamini

www.SID.ir

Archive of SID

به منظور بررسی اثر گرد و غبار بر دمای پنل‌های فتوولتاییک، یک مدل نوری و حرارتی برای یک پنل با لایه‌ای از گرد و غبار در سطح آن توسط زارعی[1] و همکاران [66]–[64]، توسعه داده شد (شکل ۵). در این مدل، برای توسعه مدل نوری، از مدل زنگ[2] [67]، و راستی‌آزمایی به‌وسیله نتایج تجربی مطالعه الحسن[3] [68]، و هگازی [49]، بهره گرفته شد. مدل حرارتی نیز با استفاده از تعادل انرژی برای لایه‌های مختلف از ماژول توسعه داده شد. اگر چه نتایج آن‌ها دقت قابل قبول را در مقایسه با پژوهش قبلی [69]، نشان می‌دهد، طبق نتایج ارائه شده درجه حرارت پنلی که گرد و غبار بر سطح آن نشسته است به علت کاهش تابش خورشیدی، کاهش یافته است که با نتایج تجربی گزارش شده توسط روح‌الامینی و همکاران [63]، در تناقض است. وجود چنین تناقض‌ها و کمبودهایی در این حوزه تاکیدی بر نیاز به پژوهش‌های بیشتر و دقیق‌تر می‌باشد.

۳-۳- اثر گرد و غبار بر شیب بهینه نصب پنل‌های فتوولتاییک

به منظور تعیین زاویه بهینه نصب پانل‌های فتولتاییک در کرمان، روح‌الامینی و همکاران [70]، در یک مطالعه تجربی دریافتند که با توجه به تاثیر انباشت گرد و غبار، توان خروجی اندازه‌گیری شده سامانه فتوولتاییک، کمتر از مقدار پیش‌بینی شده مدل نظری بود. آن‌ها پیشنهاد کردند که با توجه به این نکته که رسوب گرد و غبار در سطح پنل‌ها تاثیر زیادی بر دریافت تابش خورشیدی دارد، مدل‌های محاسباتی دقت کافی برای پیش‌بینی زاویه بهینه را ندارند. از این‌رو تاثیر عوامل محیطی نظیر گرد و غبار، به منظور تعیین زاویه بهینه نصب پنل، باید مورد توجه قرار گیرد. آن‌ها به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر گرد و غبار بر زاویه بهینه نصب پنل و در ادامه مطالعه‌های قبلی، با بررسی تجربی گزارش کردند که با توجه به تأثیر نشست گرد و غبار بر سطح پنل، برای سامانه فتوولتاییک پایه ثابت، زاویه بهینه نصب در شهر کرمان ۱۰ درجه بیشتر از مقدار زاویه ۳۰ درجه تئوری می‌باشد. همچنین برای پنل‌های نصب شده در شیب ۴۰ درجه توان خروجی سامانه حدود ۳ درصد افزایش یافت [71].

۴- روش‌های حذف گرد و غبار از سطح پنل‌ها

در حال حاضر روش‌های مختلفی برای کاهش اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک مورد استفاده و توسعه قرار گرفته‌اند. روش‌های کاهش گرد و غبار گزارش شده را می‌توان به چهار دسته طبیعی، مکانیکی و الکترومکانیکی، محافظت الکترواستاتیک و استفاده از پوشش سطح میکرو و نانو تقسیم کرد.

بارندگی، باد و گرانش، روش‌های طبیعی پاک‌کردن گرد و غبار از سطح پنل فتوولتاییک می‌باشند. روش‌های مکانیکی برای حذف گرد و غبار از سطح پنل فتوولتاییک شامل شست و شوی مکانیکی و دمیدن می‌باشد. روش‌های الکترومکانیکی نیز شامل تکان دادن یا ارتعاش آرایه‌های فتوولتاییک و نیز استفاده از امواج فراصوتی یا فروصوتی برای شکستن چسبندگی گرد و غبار است [72].

روش محافظت الکترواستاتیک فقط برای کاربردهای فضایی قابل استفاده است و با توجه به وجود رطوبت و تاثیر بر نیروی الکترواستاتیک، استفاده از این روش برای حذف گرد و غبار در جو زمین امکان‌پذیر نمی‌باشد.

یکی از بهترین روش‌های حذف گرد و غبار از سطوح و افزایش راندمان آن‌ها، استفاده از نانو پوشش‌های خودتمیز شونده می‌باشد. این روش در حال حاضر به شدت مورد توجه می‌باشد و تحقیقات گسترده‌ای در این حوزه صورت گرفته است. به عنوان مثال در مطالعه‌ای توسط غلامی و همکاران [73]، رفتار خودتمیزشوندگی و حذف گرد و غبار از سطح شیشه برای سطوح آب‌دوست و آب‌گریز در یک بازه ۷۰ روزه در شهر اصفهان مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که چگالی گرد و غبار روی سطح به علت وجود سطوح خود تمیز شونده به طور متوسط بین ۸۰٪ تا ۹۷٪ کاهش یافت.

۵- نتیجه

مرور پژوهش‌های انجام شده در این حوزه، اهمیت بالای اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک را نشان می‌دهد. به علاوه پیچیدگی این پدیده و آثار آن تاکیدی بر نیاز به پژوهش‌های تکمیلی و جامع در این زمینه است. **شکل ۶** خلاصه‌ای از نتایج بررسی‌های صورت گرفته در مورد اثر گرد و غبار بر پنل فتوولتاییک را نشان می‌دهد.

به‌طور کلی گرد و غبار از یک سو، به‌صورت پراکنده شدن در هوا و از سوی دیگر، با نشست بر روی پنل‌ها، بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک تاثیر می‌گذارد. بخشی از گرد و غبار موجود در هوا، به‌علت جذب و یا انکسار تابش خورشید، میزان انرژی نورانی رسیده به سطح پنل را کاهش می‌دهند. علاوه بر این، ریزگردهای موجود در هوا باعث تغییر دمای محیط می‌گردند که در ادامه بر عملکرد پنل‌ها تاثیر خواهد داشت. این اثر به‌خصوص در همراهی با آلودگی‌های موجود در هوا تشدید می‌گردد. نشست گرد و غبار بر روی پنل متاثر از پارامترهای محیطی بسیاری از جمله باد، باران و رطوبت می‌باشد. لایه گرد و غبار نشسته بر سطح پنل، نیز به دو صورت بر عملکرد پنل فتوولتاییک تاثیر می‌گذارد. در اثر اول، با کاهش ضریب عبور پوشش شیشه‌ای، نشست گرد و غبار منجر به تغییر تابش رسیده به پنل می‌گردد. در اثر دوم، با تغییر ضریب انتقال حرارت پنل، منجر به تغییر دمای سلول می‌گردد. این دو اثر منجر به افت کارایی و عملکرد پنل می‌گردد.

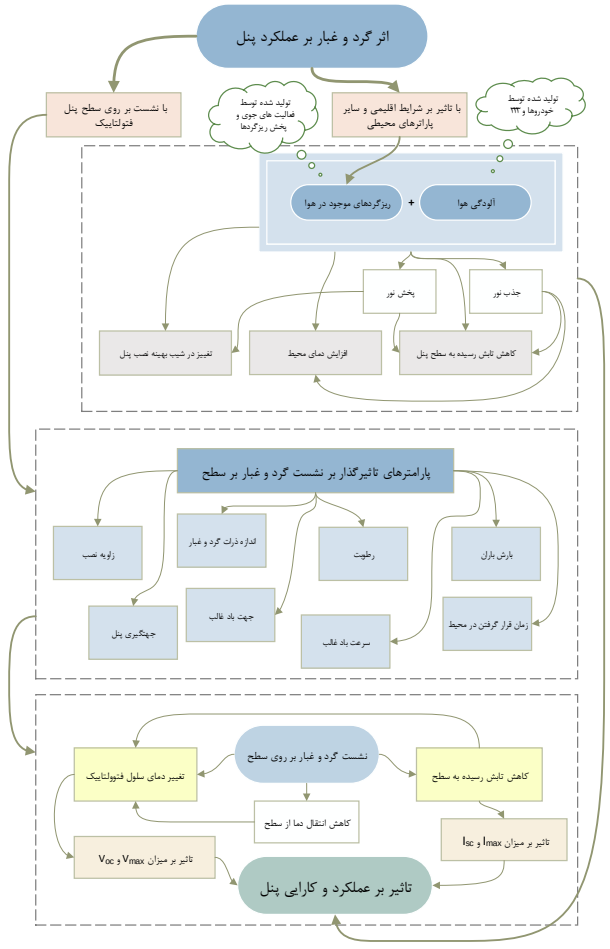
بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، نیاز مبرم به پژوهش‌های تکمیلی در این حوزه به خصوص در اقلیم ایران را نشان می‌دهد. علاوه بر این، بر

[1] Zarei
[2] Zang
[3] Al-Hasan

www.SID.ir

Archive of SID

یافتن زمان و روش مناسب برای شست و شوی پنل‌های فتولتاییک به منظور حذف گرد و غبار از سطح پنل‌ها تاکید دارد.



شکل ۶ – فلوچارت خلاصه‌ای از اثر گرد و غبار بر عملکرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک.

مراجع

[1] A. A. Salim, F. S. Huraib, and N. N. Eugenio, “PV power-study of system options and optimization,” in *EC photovoltaic solar conference. 8*, 1988, pp. 688–692.

[2] A. H. Hassan, U. A. Rahoma, H. K. Elminir, and A. M. Fathy, “Effect of airborne dust concentration on the performance of PV modules,” *J. Astron. Soc. Egypt*, vol. 13, no. 1, pp. 24–38, 2005.

[3] H. P. Garg, “Effect of dirt on transparent covers in flat-plate solar energy collectors,” *Sol. Energy*, vol. 15, no. 4, pp. 299–302, 1974.

[4] A. Sayigh, S. Al-Jandal, and H. Ahmed, “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*, 1985, pp. 2–20.

[5] M. S. El-Shobokshy and F. M. Hussein, “Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells,” *Sol. Energy*, vol. 51, no. 6, pp. 505–511, Dec. 1993.

[6] D. Goossens and E. Van Kerschaever, “Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance,” *Sol. Energy*, vol. 66, no. 4, pp. 277–289, 1999.

[7] Z. I. Offer and D. Goossens, “Airborne dust in the Northern Negev Desert (January–December 1987): general occurrence and dust concentration measurements,” *J. Arid Environ.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–19, Jan. 1990.

[8] H. Hottel and B. Woertz, “Performance of flat-plate solar-heat collectors,” *Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.);(United States)*, vol. 64, 1942.

[9] A. Zarem and D. Erway, “Introduction to the utilization of solar energy,” 1963.

[10] J. J. Michalsky, R. Perez, R. Stewart, B. A. LeBaron, and L. Harrison, “Design and development of a rotating shadowband radiometer solar radiation/daylight network,” *Sol. Energy*, vol. 41, no. 6, pp. 577–581, 1988.

[11] T. R. B. and R. G. H. Qasem*, “EFFECT OF SHADING CAUSED BY DUST ON CADMIUM TELLURIDE\nPHOTOVOLTAIC MODULEL,” 2011.

[12] S. A. M. Said and H. M. Walwil, “Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance,” *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 328–337, Sep. 2014.

[13] R. Appels *et al.*, “Effect of soiling on photovoltaic modules,” *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 283–291, Oct. 2013.

[14] R. Appels, B. Muthirayan, A. Beerten, R. Paesen, J. Driesen, and J. Poortmans, “The effect of dust deposition on photovoltaic modules,” in *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2012, no. June, pp. 001886–001889.

[15] N. Bouaouadja, S. Bouzid, M. Hamidouche, C. Bousbaa, and M. Madjoubi, “Effects of sandblasting on the efficiencies of solar panels,” *Appl. Energy*, vol. 65, no. 1–4, pp. 99–105, Apr. 2000.

[16] G. A. Mastekbayeva and S. Kumar, “Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate,” *Sol. Energy*, vol. 68, no. 2, pp. 135–141, Feb. 2000.

[17] S. L. O’Hara, M. L. Clarke, and M. S. Elatrash, “Field measurements of desert dust deposition in Libya,” *Atmos. Environ.*, vol. 40, no. 21, pp. 3881–3897, 2006.

[18] A. O. Mohamed and A. Hasan, “Effect of dust accumulation on performance of photovoltaic solar modules in Sahara environment,” *J. Basic Appl. Sci. Res.*, vol. 2, no. 11, pp. 11030–11036, 2012.

[19] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, “Experimental analysis of the effect of dust’s physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman,” *Sol. Energy*, vol. 139, pp. 68–80, Dec. 2016.

[20] J. Wang, H. Gong, and Z. Zou, “Modeling of Dust Deposition Affecting Transmittance of PV Modules,” *J. Clean Energy Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 217–221, May 2017.

[21] M. S. El-Shobokshy, A. Mujahid, and A. K. M. Zakzouk, “Effects of dust on the performance of concentrator photovoltaic cells,” *IEE Proc. I Solid State Electron Devices*, vol. 132, no. 1, p. 5, 1985.

[22] B. S. Yilbas *et al.*, “Characterization of Environmental Dust in the Dammam Area and Mud After-Effects on Bisphenol-A Polycarbonate Sheets,” *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 24308, Jul. 2016.

[23] G. Hassan, B. S. Yilbas, S. A. M. Said, N. Al-Aqeeli, and A. Matin, “Chemo-Mechanical Characteristics of Mud Formed from Environmental Dust Particles in

www.SID.ir

Archive of SID

Humid Ambient Air," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 30253, Sep. 2016.
[24] E. A. FitzPatrick and E. A. Fitzpatrick, *Soil microscopy and micromorphology*, vol. 158. John Wiley & Sons New York, 1993.
[25] H. Zhang, X. Li, C. Du, and H. Qi, "Corrosion behavior and mechanism of the automotive hot-dip galvanized steel with alkaline mud adhesion," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 16, no. 4, pp. 414–421, Aug. 2009.
[26] Z. Jie, Z. Chuande, Z. Fuzhong, L. Shuhua, F. Miao, and T. Yike, "Experimental and numerical modeling of particle levitation and movement behavior on traveling-wave electric curtain for particle removal," *Part. Sci. Technol.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–9, Apr. 2018.
[27] B. S. Yilbas, G. Hassan, H. Ali, and N. Al-Aqeeli, "Environmental dust effects on aluminum surfaces in humid air ambient," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 45999, Dec. 2017.
[28] B. S. Yilbas, H. Ali, M. M. Khaled, N. Al-Aqeeli, N. Abu-Dheir, and K. K. Varanasi, "Influence of dust and mud on the optical, chemical, and mechanical properties of a pv protective glass," *Sci. Rep.*, vol. 5, p. 15833, Oct. 2015.
[29] B. S. Yilbas, H. Ali, A. Al-Sharafi, and N. Al-Aqeeli, "Environmental mud adhesion on optical glass surface: Effect of mud drying temperature on surface properties," *Sol. Energy*, vol. 150, pp. 73–82, Jul. 2017.
[30] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, "Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1267–1278, Nov. 2016.
[31] H. Pang, J. Close, and K. Lam, "Study on Effect of Urban Pollution to Performance of Commercial Copper Indium Diselenide Modules," in *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, vol. 2, no. 1977, pp. 2195–2198.
[32] E. Asl-Soleimani, S. Farhangi, and M. . Zabihi, "The effect of tilt angle, air pollution on performance of photovoltaic systems in Tehran," *Renew. Energy*, vol. 24, no. 3–4, pp. 459–468, Nov. 2001.
[33] H. R. Moutinho *et al.*, "Adhesion mechanisms on solar glass: Effects of relative humidity, surface roughness, and particle shape and size," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 172, no. February, pp. 145–153, Dec. 2017.
[34] L. Boyle, H. Flinchpaugh, and M. P. Hannigan, "Natural soiling of photovoltaic cover plates and the impact on transmission," *Renew. Energy*, vol. 77, no. 1, pp. 166–173, May 2015.
[35] H. Jiang, L. Lu, and K. Sun, "Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules," *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 25, pp. 4299–4304, Aug. 2011.
[36] A. Ghosh and S. Neogi, "Impact of dust and other environmental factors on glass transmittance in warm and humid climatic zone," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 19, no. 4, pp. 1215–1221, May 2017.
[37] B. Hammad, M. Al–Abed, A. Al–Ghandoor, A. Al–Sardeah, and A. Al–Bashir, "Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. April 2017, pp. 2218–2234, Feb. 2018.
[38] M. J. Adinoyi and S. A. M. M. Said, "Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules," *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 633–636, Dec. 2013.
[39] S. A. M. Said, "Effects of dust accumulation on performances of thermal and photovoltaic flat-plate collectors," *Appl. Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 73–84, Jan. 1990.
[40] S. A. M. Said, N. Al-Aqeeli, and H. M. Walwil, "The potential of using textured and anti-reflective coated glasses in minimizing dust fouling," *Sol. Energy*, vol. 113, pp. 295–302, Mar. 2015.
[41] F. Touati, M. Al-Hitmi, and H. Bouchech, "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*, 2012, pp. 78–83.
[42] E. Boykiw, "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.
[43] E. Abdeen, E.-S. Hasaneen, and M. Orabi, "Real study for Photovoltaic system performance in desert environment - Upper Egypt - case study," in *2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, 2016, pp. 843–847.
[44] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, R. H. Hamid, F. El-Hussainy, M. M. Beheary, and K. M. Abdel-Moneim, "Effect of dust on the transparent cover of solar collectors," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 18–19, pp. 3192–3203, Nov. 2006.
[45] B. M. A. Mohandes, L. El-Chaar, and L. A. Lamont, "Application study of 500 W photovoltaic (PV) system in the UAE," *Appl. Sol. Energy*, vol. 45, no. 4, pp. 242–247, Dec. 2009.
[46] M. P. Rocha *et al.*, "Comparative Analysis of the Dust Losses in Photovoltaic Modules With Different Cover Glasses," *23rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf.*, no. September, pp. 2698–2700, 2008.
[47] J. R. Caron and B. Littmann, "Direct Monitoring of Energy Lost Due to Soiling on First Solar Modules in California," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 3, no. 1, pp. 336–340, Jan. 2013.
[48] J. K. Kaldellis and A. Kokala, "Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal," *Energy*, vol. 35, no. 12, pp. 4862–4869, Dec. 2010.
[49] A. A. Hegazy, "Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors," *Renew. Energy*, vol. 22, no. 4, pp. 525–540, Apr. 2001.
[50] M. Abderrezek and M. Fathi, "Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield," *Sol. Energy*, vol. 142, no. July, pp. 308–320, Jan. 2017.
[51] M. Saidan, A. G. Albaali, E. Alasis, and J. K. Kaldellis, "Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment," *Renew. Energy*, vol. 92, pp. 499–505, Jul. 2016.
[52] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezadad, and S. Hajighorbani, "Power loss due to soiling on solar panel: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1307–1316, Jun. 2016.
[53] D. S. Rajput and K. Sudhakar, "Effect of dust on the performance of solar PV panel," *Int. J. ChemTech Res.*, 2013.

www.SID.ir

Archive of SID

[54] J. K. Kaldellis, P. Fragos, and M. Kapsali, "Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 2717–2724, Oct. 2011.

[55] U. Mehmood, F. A. Al-Sulaiman, and B. S. Yilbas, "Characterization of dust collected from PV modules in the area of Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, and its impact on protective transparent covers for photovoltaic applications," *Sol. Energy*, vol. 141, pp. 203–209, Jan. 2017.

[56] B. R. Paudyal and S. R. Shakya, "Dust accumulation effects on efficiency of solar PV modules for off grid purpose: A case study of Kathmandu," *Sol. Energy*, vol. 135, pp. 103–110, Oct. 2016.

[57] E. S. Kumar, B. Sarkar, and D. K. Behera, "Soiling and Dust Impact on the Efficiency and the Maximum Power Point in the Photovoltaic Modules," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–9, 2013.

[58] S. Ghazi and K. Ip, "The effect of weather conditions on the efficiency of PV panels in the southeast of UK," *Renew. Energy*, vol. 69, pp. 50–59, Sep. 2014.

[59] K. Brown, T. Narum, and N. Jing, "Soiling test methods and their use in predicting performance of photovoltaic modules in soiling environments," in *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2012, pp. 001881–001885.

[60] H. Pedersen, J. Strauss, and J. Selj, "Effect of Soiling on Photovoltaic Modules in Norway," *Energy Procedia*, vol. 92, no. 1876, pp. 585–589, Aug. 2016.

[61] Y. Guan, H. Zhang, B. Xiao, Z. Zhou, and X. Yan, "In-situ investigation of the effect of dust deposition on the performance of polycrystalline silicon photovoltaic modules," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 1273–1284, Feb. 2017.

[62] 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," *Renew. Energy*, vol. 112, 2017.

[63] A. Rouholamini, H. Pourgharibshahi, R. Fadaeinedjad, and M. Abdolzadeh, "Temperature of a photovoltaic module under the influence of different environmental conditions – experimental investigation," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 266–272, May 2016.

[64] T. Zarei and M. Abdolzadeh, "Optical and thermal modeling of a dusty photovoltaic module (in Persian)," in *1st International Conference on Mechanical and Areospace Engineering*, 2016, no. April 2016.

[65] T. Zarei and M. Abdolzadeh, "Optical and thermal modeling of a tilted photovoltaic module with sand particles settled on its front surface," *Energy*, vol. 95, pp. 51–66, 2016.

[66] T. Zarei and M. Abdolzadeh, "Optical and Thermal Simulations of Photovoltaic Modules With and Without Sun Tracking System," *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 138, no. 1, p. 11001, 2016.

[67] J. Zang and Y. Wang, "Analysis of Computation Model of Particle Deposition on Transmittance for Photovoltaic Panels," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 554–559, 2011.

[68] A. Y. Al-Hasan, "A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface," *Sol. Energy*, vol. 63, no. 5, pp. 323–333, Nov. 1998.

[69] M. Abdolzadeh and T. Zarei, "Optical and thermal modeling of a photovoltaic module and experimental evaluation of the modeling performance," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 277–293, 2017.

[70] A. Rouholamini, H. Pourgharibshahi, R. Fadaeinedjad, and G. Moschopoulos, "Optimal tilt angle determination of photovoltaic panels and comparing of their mathematical model predictions to experimental data in Kerman," in *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2013 26th Annual IEEE Canadian Conference on*, 2013, pp. 1–4.

[71] P. Talebizadeh, M. A. Mehrabian, and M. Abdolzadeh, "Prediction of the optimum slope and surface azimuth angles using the genetic algorithm," *Energy Build.*, vol. 43, no. 11, pp. 2998–3005, 2011.

[72] S. M. M. Modarres-Gheisari, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Malaki, P. Safarpour, and M. Zandi, "Ultrasonic nano-emulsification – A review," *Ultrason. Sonochem.*, Nov. 2018.

[73] A. Gholami, A. A. Alemrajabi, and A. Saboonchi, "Experimental study of self-cleaning property of titanium dioxide and nanospray coatings in solar applications," *Sol. Energy*, vol. 157, 2017.

www.SID.ir