



مروری بر فعالیت‌های گرد و غبار در ایران و پارامترهای موثر بر نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتائیک

اصلان غلامی^۱، محمد عامری^۲، مجید زندی^{۳*} و رقیه گوگساز قوچانی^۳

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* صندوق پستی ۱۶۵۸۹۵۳۵۷۱، m_zandi@sbu.ac.ir، تهران

چکیده

اکثر مناطقی که دارای پتانسیل تابشی بالایی جهت توسعه پنل‌های فتوولتائیک می‌باشند، مناطقی خشک و بیابانی همچون خاورمیانه و شمال آفریقا هستند. در چنین مناطقی، پدیده گرد و غبار به شدت بر عملکرد پنل‌های فتوولتائیک تاثیر می‌گذارد. مقاله حاضر با هدف بررسی فعالیت‌های گرد و غبار در ایران و نیز پارامترهای موثر بر نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتائیک، به مرور جامع پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه پرداخته است. بررسی‌های انجام شده در این حوزه نشان داد که در سال‌های اخیر، تعدد و شدت فعالیت‌های گرد و غبار در ایران به صورت قابل توجهی افزایش یافته است. دلایل این افزایش و منشاها اصلی فعالیت‌های گرد و غبار در ایران به تفصیل تشریح گردید. در ادامه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذره‌های گرد و غبار جمع‌آوری شده از سطح پنل‌ها در مناطق مختلف تشریح گردید. علاوه بر این با مرور پیشینه پژوهش، پارامترهای موثر در فرایند نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتائیک دسته‌بندی گردید و نحوه تاثیر هر یک از این پارامترها به‌طور مفصل تشریح شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجع کاملی برای استفاده پژوهش‌گران، طراحان و مهندسان در مناطقی که با مشکل گرد و غبار دست و پنجه نرم می‌کنند، قرار گیرد.

کلیدواژه‌گان: گرد و غبار، منشا گرد و غبار، پنل فتوولتائیک، باد، رطوبت.

A Review on Dust Activities in Iran and Parameters Affecting Dust Accumulation on Photovoltaic Panels

Aslan Gholami¹, Mohammad Ameri², Majid Zandi^{3*} and Roghayeh Gavagsaz Ghoachani³

1- PhD student, Department of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Assistant professor, Department of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1658953571 Tehran, Iran, m_zandi@sbu.ac.ir

Received: 29 September 2020 Accepted: 18 January 2021

Abstract

Most of the regions with high solar potential for the development of photovoltaic systems are arid and deserted regions such as the Middle East and North Africa. In such regions, dust activities affect the output of photovoltaic panels critically. With the goal to investigate dust activities in Iran and the parameters affecting dust accumulation on the surface of photovoltaic panels, the current article conducted a comprehensive review of the related documents. Studies carried out in this regard, showed that in the recent years, the frequency and severity of dust activities in Iran have been significantly increased. The reasons for such changes and the main origins of dust activities in Iran were described in detailed. Furthermore, the physical and chemical properties of dust particles collected from the surface of panels in different regions were determined. Moreover, by reviewing the literature, the parameters affecting dust accumulation on the photovoltaic panels were categorized and the impact of each of these parameters were described in detail. The results of the current study can serve as a thorough reference for researchers, designers, and engineers in regions struggling with dust events.

Keywords: Dust, Dust origin, Photovoltaic Panel, Wind, Humidity.



۱- مقدمه

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، مشکل‌های مربوط به آثار گرد و غبار بر عمل کرد و کارایی این پنل‌ها آشکارتر شده است [17]، [18]. بنابراین افزایش قابل توجهی در تعداد پژوهش‌های منتشر شده در این حوزه به ویژه از سال ۲۰۰۹ قابل مشاهده است. به‌عنوان مثال، از مجموع ۵۹۰ مطالعه صورت گرفته در این زمینه، ۵۵۹ مورد در دهه گذشته منتشر شده است (شکل ۱).

در یکی از پژوهش‌های اولیه در این زمینه، سلیم^۳ و همکارانش [19] 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 که 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^۴ و همکارانش [20]، در مصر انجام شده است، 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٪ است و این کاهش تا ۶۵/۸٪ بعد از شش ماه، بدون تمیز کردن، افزایش می‌یابد.

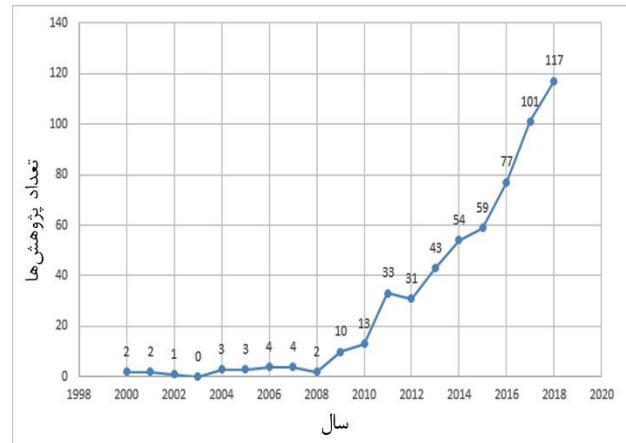
در تحقیقی مشابه، گارگ^۵ [21]، عبور عمودی^۶ تابش مستقیم^۷ از یک شیشه را در یک دوره ۳۰ روزه مورد مطالعه قرار داد و نتایج حاکی از آن بود که بر اثر نشست گرد و غبار، ضریب عبور برای شیشه افقی از ۹۰٪ به ۳۰٪ کاهش می‌یابد. در مطالعه‌های دیگری در همین زمینه در کویت توسط صایغ^۸ و همکارانش [22]، مشاهده شد که برای صفحه‌های شیشه‌ای با شیب ۰°، ۱۵°، ۳۰°، ۴۵° و ۶۰° بعد از ۲۸ روز قرار گرفتن در محیط به‌ترتیب 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 مطالعه‌های دیگر، الشبکشی^۹ و حسین [23]، 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 عمل کرد 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

بیش از ۶۰٪ از مساحت ایران با مناطق بیابانی پوشانده شده است که به‌طور عمده در قسمت‌های مرکزی فلات ایران قرار دارد و توسط کوه‌های البرز در شمال و کوه‌های زاگرس در غرب کشور احاطه شده‌اند و شامل بیش از چهارده استان می‌گردد [1]. این کوه‌ها از انتقال رطوبت به مرکز ایران جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، کمبود آب یکی از چالش‌های اصلی در بسیاری از مناطق ایران است. رطوبت ضعیف خاک، که منجر به کمبود رشد گیاهی می‌گردد، همراه با اختلاف فشار بین نواحی بیابانی و کوه‌های احاطه شده، این مناطق را مستعد فعالیت‌های گرد و غبار کرده است [2]. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌هایی توسط کرامت^۱ و همکاران [3] و نیز اشرفی و همکاران [4]، دلیل اصلی طوفان‌های گرد و غبار در قسمت‌های غربی ایران، اختلاف فشار بین این نواحی در ایران و بیابان‌های عراق و سوریه گزارش شده است.

مشایخی و همکاران [5]، گرد و غبار را به‌عنوان مهم‌ترین ریزگرد در منطقه خاورمیانه و به‌ویژه ایران معرفی کردند. علاوه بر این، پژوهش‌های جدید افزایش تعدد و شدت حوادث گرد و غبار^۲ در این مناطق و عدم تطبیق کامل مدل‌های هواشناسی ریاضی به منظور شناسایی این پدیده‌ها را نشان می‌دهند [6]. به‌عنوان مثال، در گذشته، فعالیت‌های گرد و غبار در این مناطق به‌طور عمده، در تابستان رخ می‌داد [7]، اما مطالعه‌های اخیر نشان می‌دهد که وقوع حوادث گرد و غبار در زمستان در حال افزایش است [8]. علاوه بر این با توجه به کمبود پژوهش‌های میدانی، به‌ویژه در مناطق بیابانی و کم‌جمعیت، حوادث گرد و غبار و آثار ناشی از آن‌ها در بسیاری از موارد به‌طور کافی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند [9].

شرایط اقلیمی و آب و هوایی در ایران نشانگر تابش خورشیدی بسیار مطلوب به منظور توسعه سامانه‌های خورشیدی در کشور می‌باشد [10]–[14]. با این وجود، فعالیت‌های گرد و غبار در داخل کشور به‌عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های زیست‌محیطی در راستای این توسعه در منطقه محسوب می‌شود [15].



شکل ۱- تعداد پژوهش‌ها در حوزه تاثیر گرد و غبار بر عمل کرد سامانه‌های فتوولتاییک (۲۰۱۸-۲۰۰۰) [16].

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته در ارتباط با تاثیر گرد و غبار بر عمل کرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک نشان می‌دهد که تا قبل از سال ۲۰۰۸

^۱ Normal Transmittance

^۲ Direct Radiation

^۳ Sayigh

^۴ El-Shobokshy

^۱ Keramat

^۲ Dust Events

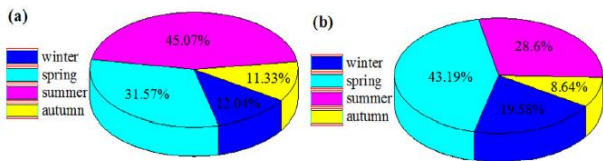
^۳ Salim

^۴ Hassan

^۵ Garg

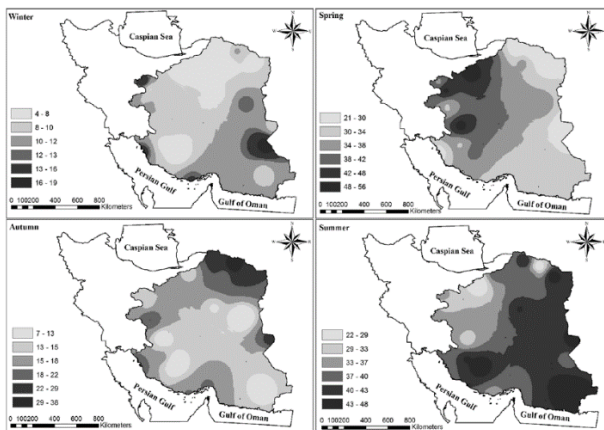


تگاتنگی با سلامت انسان دارد [38], [37]. بیماری‌های قلبی و عروقی، روی، آسم مزمن، سوزش چشم و بینی و اختلال‌های تنفسی به‌عنوان عوارض ناشی از فعالیتهای گرد و غبار در محیط‌های شهری شناخته شده‌اند [40], [39]. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای توسط گودرزی و همکاران [41]، نشان داده شد که با افزایش غلظت PM10 به بیش از $30 \mu\text{g.m}^{-3}$ ، در این حالت بیش از ۱۷ درصد از علت مرگ و میر به مشکل‌های قلبی، عروقی و تنفسی ناشی از فعالیتهای گرد و غبار مربوط می‌شود. علاوه بر این که در طول فعالیتهای گرد و غبار، غلظت ریزگردهای زیستی^۴، از جمله باکتری‌ها و قارچ‌ها، فضای داخلی و همچنین در فضای باز افزایش می‌یابد [42]، که منجر به ترویج آسم و آلرژی، و همچنین بیماری‌های عصبی و عفونی در میان افراد آسیب‌پذیر می‌گردد.



شکل ۲- توزیع درصد تعدد فصلی: (a) حوادث گرد و غبار؛ (b) رویدادهای طوفان گرد و غبار؛ در حوضه جازموریان در طول دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۳ بر اساس مطالعه انجام شده توسط رشکی و همکاران [35].

فعالیت‌های گرد و غبار را می‌توان بر اساس محدوده دید بصری به دو دسته طبقه‌بندی کرد؛ حوادث گرد و غبار^۵ (DE) با دید کمتر از ۱۰ کیلومتر و رویدادهای طوفان گرد و غبار^۶ (DSE) با دید کمتر از ۱ کیلومتر. رشکی و همکاران [35]، با ارزیابی فعالیتهای گرد و غبار در منطقه جازموریان در جنوب شرقی ایران، گزارش دادند که بیشترین تعدد حوادث گرد و غبار در ماه‌های ژوئن- جولای و کمترین میزان آن در پاییز و زمستان بوده است. به‌علاوه برای رویدادهای طوفان گرد و غبار بیش‌ترین فراوانی در ماه‌های مارس- می رخ می‌دهد (شکل ۲). پژوهش‌های آن‌ها نشان داده است که در فعالیتهای گرد و غبار یک الگوی روزانه وجود دارد و بیشترین تعدد آن در ساعت (LST) ۱۵:۳۰ تا ۱۸:۳۰ به‌علت انتقال حرارت جابه‌جایی و در ادامه انتشار گرد و غبار رخ می‌دهد. این نتایج به کمک ثبت تعداد طوفان‌های گرد و غبار در مناطق بیابانی ایران در بیش از ۲۲ ایستگاه سازمان هواشناسی، توسط مدرس و همکاران [1]، تأیید شده است (شکل ۳).



شکل ۳- طوفان‌های گرد و غبار در مناطق بیابانی ایران در هر فصل (سالهای ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰)، بر اساس مطالعه انجام شده توسط مدرس و همکاران [1].

این تحقیق محدودیت‌هایی نیز دارد که شاید مهم‌ترین محدودیت 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 روی صفحه‌های تخت دارد [24], [25].

علاوه بر مطالب اشاره شده، چند تحقیق دیگر نیز در زمینه بررسی تأثیر گرد و غبار در مناطق بارانی نیز صورت گرفته است. در یکی از مطالعه‌های اولیه، هتل و ورتز^۱ [26]، در یک دوره ۳ ماهه به بررسی کلکتورهایی با زاویه شیب نصب 30° 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 عمل کرد کلی کلکتورها به‌طور شگفت‌انگیزی (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 بوستون آمریکا^۲ است، نسبت دادند.

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. به‌علاوه تغییر اقلیمی و محیطی به شدت بر میزان اثر گرد و غبار بر عمل کرد و کارایی پنل‌های فتوولتاییک تأثیر دارد. بنابراین، اطلاعات بیشتری به منظور طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک و همچنین تعمیم میزان کاهش در عمل کرد 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 نحوه نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک و پارامترهای موثر بر این فرآیند می‌پردازد. برای این منظور در ابتدا، با هدف نگاهی بهتر در توسعه سیستم فتوولتاییک در داخل کشور، فعالیتهای گرد و غبار در ایران و منشأ آن‌ها و همچنین تأثیر این فعالیتهای بر شرایط زندگی مردم در کشور مورد بررسی جامع قرار گرفت. در ادامه نیز با مرور برخی از مهم‌ترین مطالعه‌های صورت گرفته در دنیا، پارامترهای موثر بر نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک مورد بررسی دقیق قرار گرفته می‌شوند.

۲- فعالیتهای گرد و غبار در ایران و منشأ آن‌ها

اگرچه طوفان‌های گرد و غبار به‌عنوان پدیده‌هایی طبیعی در نظر گرفته می‌شوند، اما وقوع آن‌ها ممکن است علل مستقیم و یا غیر مستقیم انسانی داشته باشد. به‌صورت کلی، فعالیتهای گرد و غبار بر شرایط آب و هوایی تأثیر منفی می‌گذارد [29]-[27]. این اثر که ممکن است از مقیاس محلی تا مقیاس‌های جهانی باشند، شامل موارد مختلفی همچون تأثیر بر مقدار تابش رسیده به زمین و اکوسیستم [33]-[30]، و همچنین مسائل اجتماعی و اقتصادی و فعالیتهای صنعتی [35], [34]، می‌گردند. در ادامه به برخی از این آثار اشاره می‌شود.

والدینگر^۳ [36]، نشان داده است که تغییر آب و هوایی و اثر آن بر زندگی مردم، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، به جای مهاجرت‌های داخلی در اکثر موارد منجر به مهاجرت بین‌المللی می‌گردد. علاوه بر این، ثابت شده است که غلظت بالای ذرات معلق (PM) ناشی از فعالیتهای گرد و غبار، ارتباط

^۴ Bioaerosols

^۵ Dust Events

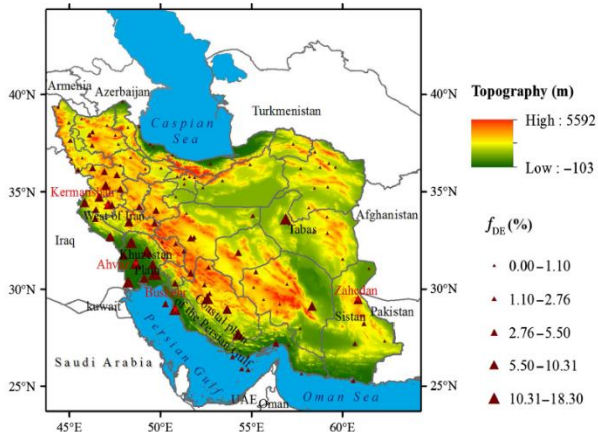
^۶ Dust Storm Events

^۱ Hottel H & Woertz M

^۲ Boston, USA

^۳ Waldinger

[62]، به بررسی ویژگی‌های گردش و ساختار جو در طول طوفان‌های گرد و غبار پرداختند.



شکل ۵- فراوانی حوادث گرد و غبار ثبت شده توسط ۱۱۱ ایستگاه هواشناسی در کشور ایران، طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ [61].

علیزاده چوبری و همکاران [61]، فراوانی حوادث گرد و غبار را طی یک دوره ۲۰ ساله ثبت شده از سوابق هواشناسی سه ساعته مورد بررسی قرار دادند. شکل ۵، توزیع فراوانی حوادث گرد و غبار در ایران را در سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. آن‌ها همچنین تأثیر توزیع گرد و غبار در شار تابشی در مقیاس جهانی را بررسی کرده و گزارش دادند که گرد و غبار معلق در هوا، تابش خورشیدی رسیده به زمین را طی مجموعه‌ای از فرایندهای جذب و انعکاس کاهش می‌دهد. آن‌ها کاهش متوسط سالانه ۲.۹۳ وات بر مترمربع را در مقیاس جهانی گزارش کردند. البته این اختلال در تابش در فصول و همچنین مکان‌های مختلف متفاوت است [63]، [64]، در این میان خاورمیانه و شمال آفریقا بیش از سایر مناطق دنیا با فعالیت‌های گرد و غبار دست و پنجه نرم می‌کنند [65].

ایران با قرار گرفتن در کمربند خورشیدی زمین، شرایط مطلوبی برای توسعه سامانه‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی مانند نیروگاه‌های فتوولتائیک دارد. با این حال، کاهش تابش رسیده به سطح زمین در طول فعالیت‌های گرد و غبار و همچنین نشست گرد و غبار بر سطوح شفاف سامانه‌های فتوولتائیک به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین چالش‌های فنی در راه توسعه این سامانه‌ها در منطقه در نظر گرفته می‌شود [66]، [67]. از این رو در بخش بعد، ابتدا با مرور پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه، به‌صورت مختصر به بررسی خصوصیات ذره‌های گرد و غبار نشست بر روی سطوح فتوولتائیک از جمله اندازه و مورفولوژی ذرات و نیز تحلیل واکنش‌های شیمیایی گرد و غبار پرداخته می‌شود.

۳- خصوصیات ذره‌های گرد و غبار

برای درک بهتر نحوه تجمع و نشست ذره‌های گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتائیک، مشخصه‌های ذره‌های گرد و غبار شامل اندازه ذرات، تحلیل مورفولوژی و ترکیب شیمیایی آن‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بخش به بررسی برخی پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه پرداخته می‌شود.

۱-۳- اندازه ذرات

در پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه، برای تعیین اندازه و مورفولوژی توزیع ذرات در بیشتر موارد از تکنیک‌های نوری، همچون استفاده از

براساس مطالعه‌های انجام شده توسط کاو و همکاران (با استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای) [43]، و نیز رضازاده و همکاران (براساس اطلاعات ثبت شده از ایستگاه‌های هواشناسی) [44]، خوزستان (در جنوب غربی کشور) و سیستان و بلوچستان (در جنوب شرقی کشور)، اصلی‌ترین مناطق آسیب دیده توسط طوفان گرد و غبار در ایران هستند. از این رو اکثر مطالعه‌های صورت گرفته در ارتباط با آثار گرد و غبار در ارتباط با این مناطق می‌باشد [34]، [35]، [40]، [45]، [51]، [52].

بنا به گزارش ویشکایی و همکاران [53]، [54]، منشأ اصلی طوفان‌های گرد و غبار در شمال غرب ایران، بیابان‌های عراق و سوریه است. نتایج پژوهش آن‌ها توسط مطالعه‌های متعدد دیگری قابل تأیید است [46]، [55]، [56]. در بسیاری از موارد، مناطق بیابانی با خاک‌های ماسه‌ای و شنی منشأ طوفان‌های گرد و غبار نمی‌باشند و مناطقی که خاک‌های آن‌ها در ابعاد رس و سیلت می‌باشد، مسئولیت عمده طوفان‌های گرد و غبار را برعهده دارند [6]. شکل ۴ مناطق اصلی بیابانی در داخل ایران و نیز ناحیه‌های نزدیک مرز ایران را که منشأ گرد و غبار در داخل ایران می‌باشند، نشان می‌دهد. از شکل ۴ می‌توان نتیجه گرفت که جنوب غربی ایران، به ویژه در نزدیکی مرز عراق، عربستان سعودی و امارات متحده عربی، از اصلی‌ترین مناطق تحت تأثیر طوفان گرد و غبار است [6]. عراق با مناطق گسترده‌ای که حدود ۴۰ درصد از این کشور را در بر می‌گیرد، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع گرد و غبار در منطقه در نظر گرفته می‌شود. چندین عامل، از جمله خشکسالی شدید در سال ۱۹۹۰، آثار ویرانگر جنگ، جنگل‌زدایی و تصمیمات نامناسب سیاسی، طی سال‌های اخیر، روند بیابان‌زایی در این کشور را افزایش داده است [59]–[57].



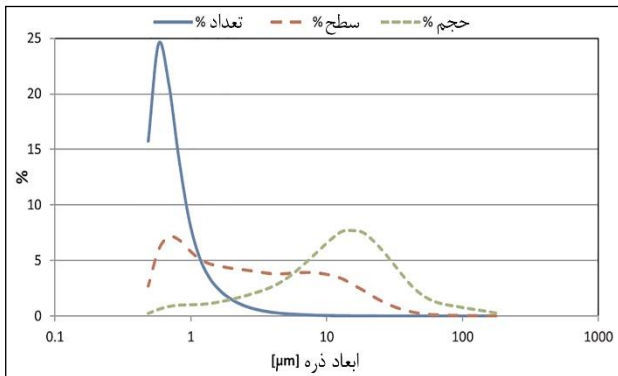
شکل ۴- منشأهای اصلی گرد و غبار در داخل ایران و در اصراف مرزها [6].

تقوی و همکاران با استفاده از تکنیک‌های سنجش از راه دور در تحقیقی [60]، به شناسایی، رصد و پیش‌بینی طوفان‌های گرد و غبار در مناطق غربی ایران پرداختند. به گزارش آن‌ها، استقرار جبهه کم فشار در سطح زمین می‌تواند یکی از علل اصلی طوفان‌های گرد و غبار در این منطقه باشد.

در شرق ایران نیز، همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، منطقه سیستان در جنوب شرقی ایران به‌عنوان یکی از منابع برجسته گرد و غبار در منطقه، به ویژه در دوره "بادهای ۱۲۰ روزه"، به حساب می‌آید [1]، [43]، [61]. بنا به مطالعه‌های انجام شده، انتقال گرد و غبار از منابع خارجی مانند بیابان ریگستان، کویر مکران و هامون ماشکیل، در کنار خشک شدن دریاچه هامون اصلی‌ترین عوامل موثر در روند افزایش طوفان‌های گرد و غبار در شرق ایران می‌باشند [43]، [48]. در مطالعه‌ای در این راستا، در دشت سیستان، کمالی و همکاران



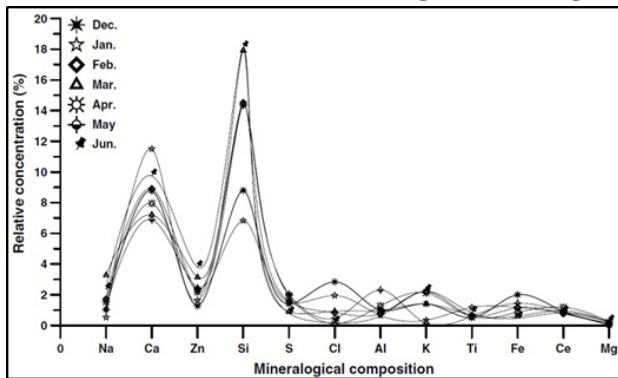
found. فراوانی، مساحت و حجم توزیع ذره‌های گرد و غبار در ابعاد مختلف قابل مشاهده است.



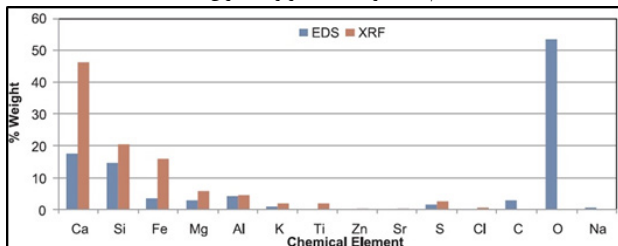
شکل ۶ - فراوانی، مساحت و حجم توزیع ذره‌های گرد و غبار در ابعاد مختلف [78]. در ادامه برخی از مطالعه‌های مرتبط با ترکیب شیمیایی مواد اشاره می‌گردد.

۲-۲- ترکیب شیمیایی ذرات:

شکل ۷، نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل XRF انجام شده توسط المینیر^۶ و همکاران [79]، بر روی گرد و غبار جمع‌آوری شده از سطح پنل را نشان می‌دهد. به گزارش آن‌ها، اجزای اصلی تشکیل دهنده گرد و غبار، سیلیکون و کلسیم بود. علاوه بر این، اجزای دیگری مانند Na، Zn، Al، Fe، Mg، K و S نیز یافت شد. در مطالعه‌ای مشابه توسط سید^۷ [69]، همان طور که در شکل ۸ دیده می‌شود، به ترتیب اکسیژن، کلسیم، سیلیکون، گوگرد و آهن به‌عنوان بیشترین عنصر موجود در گرد و غبار جمع‌آوری شده از سطح معرفی شدند. در ایران نیز غلامی و همکاران [80]، میانگین کسر جرمی عناصر موجود در گرد و غبار را در طی یک مطالعه تجربی در تهران گزارش کردند (شکل ۹).



شکل ۷ - تجزیه و تحلیل XRF گرد و غبار انباشته بر سطح بر اساس مطالعه‌های انجام شده توسط النیمیر و همکاران [79].



میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ و میکروسکوپ پروبی روبشی^۲ بهره گرفته شده است. جدول ۱ اندازه و مورفولوژی توزیع ذره‌های گرد و غبار جمع‌آوری شده از کشورهای مختلف را نشان می‌دهد.

بررسی پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که ذرات ریزتر نسبت به ذرات درشت، تاثیر بیشتری بر عمل کرد ماژول‌های فتولتاییک دارند. الشبکشی و حسین [23]، تاثیر نشست خاکستر، سیمان و سه نوع سنگ آهک با قطر متوسط ۵، ۱۰، ۵۰، ۶۰ و ۸۰ میکرومتر بر عمل کرد پنل‌های فتولتاییک 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 قطرهای گوناگون سنگ آهک، ذرات کوچک‌تر توان خروجی را بیشتر کاهش می‌دهند. مطالعه آن‌ها هم‌چنین نشان داد که توان خروجی سامانه فتولتاییک 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.

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

اطلاعات تکمیلی	ابعاد ذرات (µm)	محل جمع‌آوری گرد و غبار
عمده ذره‌های گرد و غبار در ابعاد سیلت ^۳ (ابعاد بین ماسه و رس) گزارش شده‌اند. ذرات سیلت کوچک‌تر از جنس اسلیت ^۴ می‌باشند و ذرات بزرگ‌تر از جنس کوارتز ^۵ می‌باشند.	۸-۴	کویت [68]
شکل‌های مختلف و نامنظم، اما به‌طور کلی، متماثل به کروی شکل هستند.	۱۷۶-۰/۵	ظهران، عربستان [69]
سایر نمونه‌های آزمایش شده عبارتند از: سیمان ۱۰ میکرومتر، خاک رس ۶۸ میکرومتر و شن و ماسه سفید ۲۵۰ میکرومتر	۱۰-۲	بلژیک [70]، [71]
شکل ذرات نامنظم است اما به‌طور تقریبی کروی است.	۷۸۰-۹۵	الجزیره [72]
خاک رس نرم برای تهیه گرد و خاک مصنوعی	۷۸-۵۳	بانکوک، تایلند [73]
اندازه ذره‌های گرد و غبار در ماه‌های مختلف به‌صورت متغیر	۱۰۰۰-۰/۵	لیبی [74]، [75]
پراکندگی گرد و غبار بر سطح از یک مکان به مکان دیگر متفاوت است	۶۳-۲	عمان [76]
تعداد محدودی ذرات غیریکنواخت با ابعاد ۱۰ (µm) نیز گزارش شده است	میانگین ۲	قطر [77]

الشبکشی و همکاران [78]، 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 نشست شده بر سطح پنل، توسط باد از روی سطح حذف می‌گردد، در حالی که برای ذرات درشت‌تر در حدود ۱۵-۲۰ درصد از جرم غبار نشست 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 Error! Reference source not

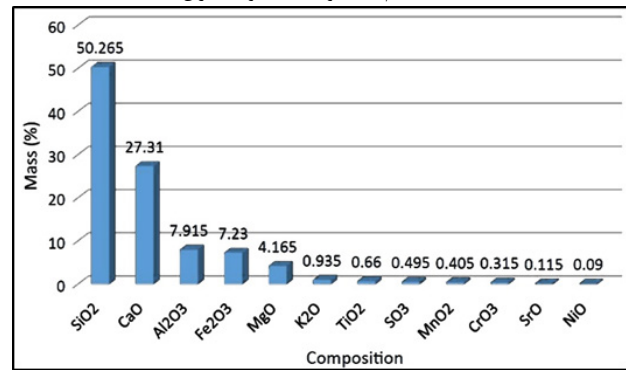


فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال هشتم، شماره دوازدهم پاییز و زمستان ۱۴۰۰

^۵ Quartz
^۶ Elminir
^۷ Said

^۱ Scanning Electron Microscope (SEM)
^۲ Scanning Probe Microscope
^۳ Silt
^۴ Slate

شکل ۸ - تجزیه و تحلیل XRF و EDS گرد و غبار انباشته بر سطح بر اساس مطالعه‌های انجام شده توسط سید و همکاران [69].



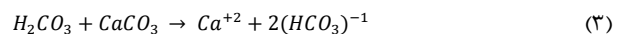
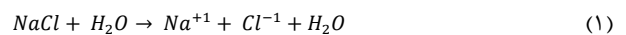
شکل ۹ - میانگین کسر جرمی گرد و غبار در تهران، گزارش شده توسط غلامی و همکاران [80].

مرور مطالعه‌های انجام شده در این حوزه نشان می‌دهد که ترکیب شیمیایی ذره‌های گرد و غبار از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. از این رو به منظور شناخت دقیق و پیش‌بینی آثار ذره‌های گرد و غبار، مطالعه و اندازه‌گیری‌های محلی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند.

۳-۳- تحلیل واکنش‌های شیمیایی گرد و غبار

ذره‌های گرد و غبار در اقلیم مرطوب، بخار آب را جذب و یک لایه گل روی پنل می‌نشانند. هنگامی که این لایه تحت حرارت و تابش آفتاب خشک می‌گردد، حذف آن از سطح پنل بسیار دشوارتر می‌گردد [81], [82]. واکنش آب با ذره‌های گرد و غبار به دلیل جذب مؤثر مولکول‌های آب توسط ذرات گرد و خاک صورت می‌گیرد. این جذب ملکول‌های آب توسط خاک به سبب ایجاد ناحیه عدم تعادل نیرو بین مولکول‌های آب، یون‌های حل شده و ذرات خاک رخ می‌دهد و به اندازه ذره‌های گرد و غبار بستگی دارد [83]. 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 [84]-[86].

حل شدن ذره‌های گرد و غبار مانند کلسیت^۲ و هالیت^۳ طی واکنش‌های (۱)، **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.** صورت می‌گیرد [87], [88]. واکنش (۱)، واکنش هالیت با مولکول‌های آب را نشان می‌دهد که طی آن کلرید و سدیم را به صورت یون‌های مجزا جدا می‌کند و در مولکول‌های آب حل می‌شوند. واکنش **Error! Reference source not found.** نیز، نحوه انحلال کربن دی‌اکسید در آب و تشکیل اسید کربنیک را نشان می‌دهد که در ادامه منجر به انحلال کلسیت در آب طی واکنش **Error! Reference source not found.** می‌گردد.



طی فرآیند خشک شدن گل و تبخیر آب موجود، یون‌های حل شده به‌دلیل نیروی الکترواستاتیک و پیوند یونی جذب ساختار گل می‌شوند و بلورهایی را تشکیل می‌دهند و باعث افزایش نیروی چسبندگی می‌شوند [87], [88].

همان‌طور که مشاهده شد خصوصیات ذره‌های گرد و غبار بر میزان اختلال در عملکرد پنل‌های فتوولتاییک اثر می‌گذارد. علاوه بر این وجود رطوبت در هوا و در ادامه برخی واکنش‌های شیمیایی منجر به افزایش این اختلال می‌گردد. به منظور بررسی دقیق‌تر فرایند نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک در بخش بعد، با مرور پژوهش‌های صورت گرفته در این حوزه، به بررسی پارامترهای مؤثر بر نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک و دسته‌بندی این پارامترها پرداخته می‌شود.

۴- پارامترهای مؤثر بر نشست گرد و غبار

با مرور پیشینه تحقیق در این حوزه، می‌توان دریافت که علاوه بر خواص فیزیکی و شیمیایی ذره‌های گرد و غبار، پارامترهای دیگری نیز بر نشست گرد و غبار بر سطوح مؤثر می‌باشند. این پارامترها را می‌توان در مواردی چون، پوشش شیشه‌ای پنل، رطوبت و چسبندگی بین ذره‌های گرد و غبار و سطح، باران، باد و گرانش دسته‌بندی کرد. در ادامه به بررسی هر یک از این موارد و نحوه تأثیر هر پارامتر بر نشست گرد و غبار پرداخته می‌شود.

۴-۱- تأثیر پوشش پنل بر نشست گرد و غبار:

میزان نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک، با توجه به خواص و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی گوناگون پوشش‌های سطحی، مختلف خواهد بود. . **Error! Not a valid bookmark self-reference.** مهم‌ترین مطالعه‌های صورت گرفته در این حوزه را نشان داده شده است.

جدول ۲- اثر پوشش سطحی بر عملکرد پنل فتوولتاییک

مکان	نوع پوشش پنل	اثر مشاهده شده
ظهران، عربستان [69], [89]	پوشش ضدانعکاسی ^۴	با استفاده از پوشش ضد انعکاس، افت عملکرد پنل ۵٪ کاهش یافت.
مالاگا، اسپانیا [90]	فیلم نازک با خواص خودتمیز شونده و پوشش ضد انعکاسی	عملکرد پنل به علت نشست گرد و غبار برای پنل بدون پوشش ۳۳٪ و برای پنل پوشش‌دار ۲۵٪ کاهش یافت.
مالاگا، اسپانیا [91]	تغییر بافت و ایجاد میکروهرم بر سطح شیشه	تفاوت محسوسی گزارش نشده است.
هورلی، بلژیک [70]	پوشش خودتمیز شونده، پوشش ضد انعکاسی و پوشش چند لایه	افت ضریب عبور در طول آزمایش بر حسب درصد: پوشش خود تمیز شونده (۱/۳۰)، پوشش ضد انعکاسی (۱/۷۵)، پوشش چندلایه (۰/۸۵) و شیشه معمولی (۲/۶۳)
شرکت طلایی، ایالات متحده آمریکا [92]	تغییر بافت و ایجاد میکروهرم بر سطح شیشه	برای سطح جاذب اصلاح شده، جریان اتصال کوتاه ۳٪ نسبت به سطح معمولی افزایش افت.
هند [93]	پوشش‌های آکرلیک، پلی‌وینیل‌کلراید و سطح شیشه‌ای	حداکثر کاهش ضریب عبور سالانه به ترتیب با زاویه شیب ۴۵، ۰ و ۹۰ درجه برای: PVC ۷/۱۱۵٪، ۵/۱۱۶٪، ۲/۳۵٪ اکرلیک ۵/۲۷٪، ۳/۹۸٪، ۱/۷۸٪ و شیشه ۴/۲۶٪، ۲/۹۴٪، ۱/۳۶٪

^۴ Anti-reflective coating

^۵ Heverlee, Belgium

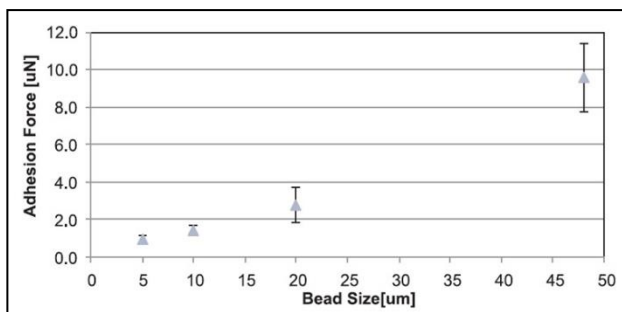
^۶ Golden CO., USA

^۱ Mud

^۲ Calcite (CaCO₃)

^۳ Halite (NaCl)





شکل ۱۰ - اثر اندازه ذرات بر نیروی چسبندگی از مطالعه‌های مختلف.

در بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، مدل‌های مختلفی از جمله مدل جی‌آرک^۸، مدل رابنویچ^۹ و مدل دی‌ام‌تی^{۱۰} برای اندازه‌گیری نیروی چسبندگی بین سطوح و ذره‌های گرد و غبار گزارش شده است [105]-[107]. نیروی چسبندگی به اندازه ذرات نیز بستگی دارد. مطابق شکل، سید و همکاران نشان دادند که نیروی چسبندگی برحسب اندازه ذره‌های گرد و غبار چگونه تغییر می‌کند [69].

کورن^{۱۱} [108]، نیروی چسبندگی بین ذرات جامد را مطالعه کرد و نشان داد که نیروی چسبندگی آن‌ها با افزایش اندازه ذرات به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، سطح تماس بین یک ذره و سطح ناهموار نیز نقش مهمی در چسبندگی بین ذرات و سطح دارد که توسط پنی^{۱۲} مورد مطالعه قرار داده شد [109]. سوماونداران^{۱۳} و همکارانش [110]، ضمن گزارش این نیروی چسبندگی در حدود میکرونیوتون، اعلام کردند که با کاهش PH یا افزایش میزان نمک، میزان نیروی چسبندگی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

کازمرسکی^{۱۴} و همکارانش [111]، [95]، با بررسی مورفولوژی و مکانیزم‌های شیمیایی گرد و غبار، گزارش دادند که نیروی چسبندگی بین ذره‌ها بیشتر از نیروی چسبندگی بین ذرات و پوشش شیشه‌ای سطح پنل است. با این وجود، حسن^{۱۵} و همکارانش [82]، نیروی چسبندگی بین ذره‌های گرد و غبار و سطح شیشه در گل خشک شده روی پوشش شیشه‌ای فتولتاییک را بیشتر از نیروی چسبندگی بین ذرات گزارش کردند.

۳-۴- تاثیر باران بر نشست گرد و غبار:

به‌طور کلی بارش باران به‌عنوان یکی از روش‌های طبیعی حذف گرد و غبار از سطح پنل‌ها معرفی می‌گردد. از این‌رو در بررسی پژوهش‌های انجام شده در این حوزه [112]، [113]، چرخاندن سلول‌های خورشیدی به حالت عمودی در شب و نیز روزهای بارانی روشی عملی برای حذف گرد و غبار از سطح پنل‌ها معرفی شده است. با این وجود چرخاندن آرایه‌های بزرگ سلول‌های خورشیدی دشوار می‌باشد و خود باعث مصرف انرژی و کاهش راندمان مجموعه می‌شود. علاوه بر آن استفاده از این روش‌ها در هزینه‌های تعمیر و نگهداری‌های فتولتاییک را افزایش می‌دهد.

جدول ۳ - افت عمل کرد پنل‌های فتولتاییک در مناطقی با کمبود بارش و اقلیم گرم و مرطوب.

مکان	بارش سالانه (ml)	کاهش توان خروجی پنل	بازه زمانی اندازه‌گیری

^۸ Rabinovich

^۹ Derjaguin, Muller and Toporov (DMT)

^{۱۰} Corn

^{۱۱} Penney

^{۱۲} Somasundaran

^{۱۳} Kazmerski

^{۱۴} Hassan

مینه سوتا، ایالات متحده آمریکا [94]	مقایسه شیشه معمولی و پوشش داده شده	بعد از ۴ ماه قرار گرفتن در شرایط محیطی، میزان افت ضریب عبور شیشه با پوشش ۲۰٪ و شیشه معمولی ۲۵٪
مطالعه آزمایشگاهی [95]	اعمال پوشش فوق‌آب‌گریز و فوق‌آب‌دوست	نیروی چسبندگی بین ذره‌های گرد و غبار و سطح به کمک اعمال پوشش از ۹۰ به ۱۲ نانونیوتن رسید.

گارگ^۲ میزان کاهش ضریب عبور شیشه و پلاستیک را در اثر نشست گرد و غبار بر سطح مورد آزمایش قرار داد و دریافت که در پوشش‌های پلاستیکی افت ضریب عبور بیشتر است [21]. هم‌چنین ناهار و گوپتا^۳ [93]، نشان دادند که میزان کاهش ضریب عبور ناشی از نشست گرد و غبار در پوشش‌های پلی‌وینیل‌کلراید^۴ بیشتر از آکرلیک و در پوشش‌های آکرلیک بیشتر از شیشه است. هم‌چنین سید^۵ و همکاران [89]، نشان دادند که با نشان دادن فیلم نازکی با خواص خود تمیزشوندگی و ضد انعکاسی، میزان توان خروجی بین ۴ تا ۸ درصد افزایش می‌یابد.

مطالعه‌های دیگری نیز در حوزه تاثیر استفاده از سطوح خود تمیز شونده به منظور کاهش میزان گرد و غبار نشسته بر سطح انجام شده است [96]-[98]. به‌عنوان مثال، در پژوهشی که توسط غلامی^۶ و همکاران در اصفهان صورت گرفت [99]، تاثیر خود تمیزشوندگی سطح شیشه با اعمال پوشش‌های فوق‌آب‌دوست و فوق‌آب‌گریز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش، حاکی از آن بود که اعمال پوشش روی سطح شیشه باعث می‌گردد که حتی بدون بارش باران، تجمع گرد و خاک روی سطح به صورت قابل توجهی کاهش یابد. در این پژوهش در یک بازه ۷۰ روزه و در عدم بارش، برای بررسی اثر نانوپوشش‌ها تحت شرایط بارانی، شبیه‌سازی باران صورت گرفت و افت ضریب عبور از ۲۲٪ به ۵٪ کاهش یافت.

۴-۲- تاثیر رطوبت و چسبندگی ذره‌های گرد و غبار:

رطوبت یکی از پارامترهای بسیار موثر در نشست ذره‌های گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتولتاییک است. به‌طور کلی، افزایش رطوبت مطلق موجب افزایش انباشت گرد و غبار می‌شود [100]. علت این افزایش آن است که میعان بخار در سطح پنل فتولتاییک، پل‌های مویرگی را در شکاف بین ذرات و سطح ایجاد می‌کند. این اثر، موجب ایجاد نیروی موئینگی و در پی آن افزایش چسبندگی بین ذره و سطح و در ادامه تسریع نشست گرد و غبار بر سطح پنل فتولتاییک می‌گردد [101]-[103]. مخلیف^۷ و همکارانش گزارش کردند که نیروی چسبندگی بین ذره‌های گرد و غبار و سطوح به شدت تحت تاثیر رطوبت جو قرار دارد. آن‌ها گزارش نمودند که با کاهش رطوبت نسبی، کارایی پانل‌های خورشیدی به علت اینکه ذره‌های گرد و غبار کمتری در سطح قرار می‌گیرند، افزایش می‌یابد [104].



فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

۱۴۰۰

فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال هشتم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۰

^۲ Minnesota, USA

^۱ Garg

^۳ Nahar and Gupta

^۴ Polyvinyl chloride (PVC)

^۵ Said

^۶ Gholami

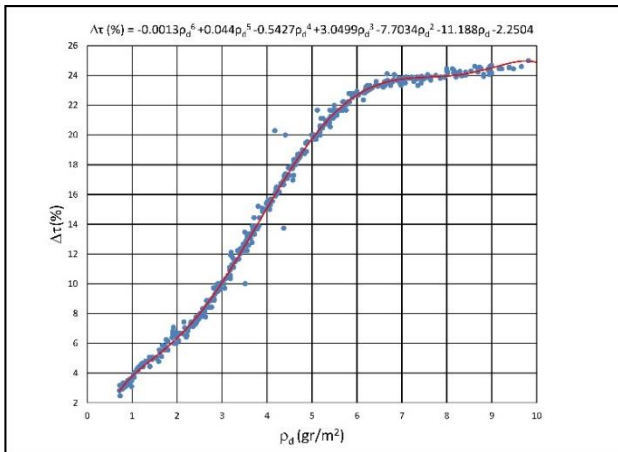
^۷ Mekhilef

^۸ JRK

غبار بر سطح پنل منجر به افت ۲۵٪ ضریب عبور در پایان دوره داده‌برداری شده است.

$$\Delta\tau(\%) = -0.0013\rho_d^6 + 0.044\rho_d^5 - 0.5427\rho_d^4 + 3.0499\rho_d^3 - 7.7034\rho_d^2 - 11.188\rho_d - 2.250 \quad (4)$$

لازم به ذکر است که با توجه به بازه داده‌های ثبت شده در طول داده‌برداری لازم به ذکر است که با توجه به بازه داده‌های ثبت شده در طول داده‌برداری (۱۰۰-۰/۳۱۲۹)، رابطه (۴) ممکن است برای چگالی گرد و بار بالای ۱۰ گرم بر مترمربع صادق نباشد. به علاوه افت ضریب عبور محاسبه شده از رابطه (۴) برای گرد و غبار کمتر از ۰/۲۳۵۹ گرم بر مترمربع، منفی بدست می‌آید و غیر قابل قبول نمی‌باشد. که البته این نکته چیزی از ارزش‌های رابطه نمی‌کاهد، چرا که عموماً در این بازه از گرد و غبار می‌توان از اثر گرد و غبار بر ضریب عبور صرفه‌نظر کرد.



شکل ۱۱- منحنی افت ضریب عبور شیشه بر حسب چگالی سطحی گرد و غبار. در پژوهشی دیگر توسط غلامی و همکاران [99]، نشان داده شد که اگر چه بارش باران موجب حذف بخشی از گرد و غبار از سطح پنل می‌شود، اما این امکان وجود دارد که با ایجاد لکه‌هایی بر سطح پنل، خود عامل کاهش ضریب عبور شیشه از سطح پنل گردند. این اثر به‌خصوص در سطوحی که دارای پوشش‌های خودتمیزشونده آب‌دوست و یا آب‌گریز نمی‌باشند بسیار شدیدتر است.

۴-۴- تاثیر باد بر نشست گرد و غبار:

گرد و غبار 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 [120]. به‌عنوان مثال در مرجع [118]، کاهش نشست گرد و غبار ناشی از وزش باد در زاویه خاصی از نصب پنل در مصر گزارش شده است. 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 [74]، افزایش نشست گرد و غبار بر سطوح را در اثر افزایش سرعت میانگین ماهانه باد گزارش کردند. در مطالعه‌ای دیگر کالوت^۴ [120]، حداقل سرعت آستانه برای نشست گرد و غبار در لیبی را ۶/۵ متر بر ثانیه را معرفی کردند.

برای شبیه‌سازی اثر سرعت و جهت باد بر نشست گرد و غبار بر عملکرد پنل فتوولتاییک، گوسنس^۵ و همکارانش [121]، آزمایش‌هایی میدانی در تونل

عربستان [114]	۱۰-۶	۵۰٪	۲۶ هفته
امارات [115]	۹۰-۸۰	۱۰٪	۵ هفته
قطر [116]	۷۵-۷۰	۱۰٪	۱۴ هفته
فلسطین [117]	۴۰-۳۰	۶-۵٪	۱ هفته
مصر [118]	۵۰-۱۸	۷۰-۶۰٪	۲۶ هفته

همان‌طور که در گارگ میزان کاهش ضریب عبور شیشه و پلاستیک را در اثر نشست گرد و غبار بر سطح مورد آزمایش قرار داد و دریافت که در پوشش‌های پلاستیکی افت ضریب عبور بیشتر است [21]. همچنین ناهار و گوپتا [93]، نشان دادند که میزان کاهش ضریب عبور ناشی از نشست گرد و غبار در پوشش‌های پلی‌وینیل‌کلراید بیشتر از آکرلیک و در پوشش‌های آکرلیک بیشتر از شیشه است. همچنین سید و همکاران [89]، نشان دادند که با نشانندن فیلم نازکی با خواص خود تمیزشوندگی و ضد انعکاسی، میزان توان خروجی بین ۴ تا ۸ درصد افزایش می‌یابد.

مطالعه‌های دیگری نیز در حوزه تاثیر استفاده از سطوح خود تمیز شونده به منظور کاهش میزان گرد و غبار نشسته بر سطح انجام شده است [96]-[98]. به‌عنوان مثال، در پژوهشی که توسط غلامی و همکاران در اصفهان صورت گرفت [99]، تاثیر خودتمیزشوندگی سطح شیشه با اعمال پوشش‌های فوق‌آب‌دوست و فوق‌آب‌گریز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش، حاکی از آن بود که اعمال پوشش روی سطح شیشه باعث می‌گردد که حتی بدون بارش باران، تجمع گرد و خاک روی سطح به صورت قابل توجهی کاهش یابد. در این پژوهش در یک بازه ۷۰ روزه و در عدم بارش، برای بررسی اثر نانوپوشش‌ها تحت شرایط بارانی، شبیه‌سازی باران صورت گرفت و افت ضریب عبور از ۲۲٪ به ۵٪ کاهش یافت.

نشان داده شده است، در منطقه‌هایی با کمبود بارش؛ مانند کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا (اقلیم گرم و مرطوب) به علت افزایش نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌ها و کاهش تاثیر تمیزکنندگی باران، توان خروجی پنل فتوولتاییک به میزان چشم‌گیری افت داشته است. به‌عنوان مثال در طهران^۱، عربستان، بعد از ۶ ماه در معرض شرایط محیطی قرار گرفتن پنل‌ها، کاهش ۵۰ درصدی توان خروجی پنل‌ها گزارش شده است. در مطالعه‌ای دیگر نیز در عرعر^۲، عربستان، افت روزانه ۲/۷۸ درصدی جریان اتصال کوتاه در پنل‌ها گزارش شده است. هگازی^۳ 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 [118]. 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 همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، علاوه بر میزان بارش باران، عوامل متعددی دیگری نیز بر میزان نشست گرد و غبار بر سطوح فتوولتاییک تاثیرگذار می‌باشند.

در مطالعه‌ای دیگر توسط غلامی و همکاران در شهر اصفهان [119]، 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 و رابطه ۴). در طول ۷۰ روزه این پژوهش هیچ‌گونه بارشی گزارش نشده است و نشست گرد و

^۴ Callot

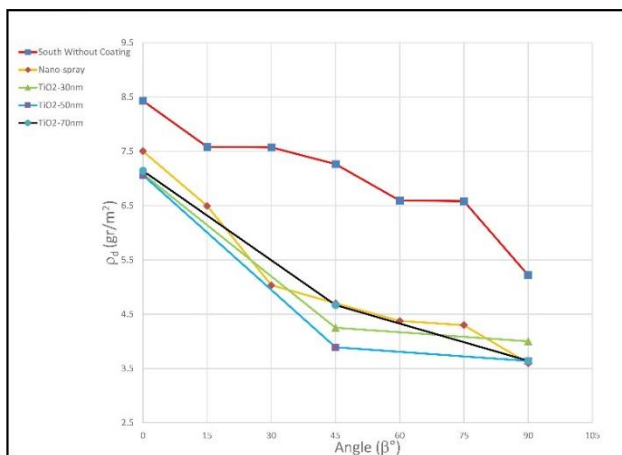
^۵ Goossens

^۱ Dhahran

^۲ Arar

^۳ Hegazy





شکل ۱۲ - کاهش چگالی سطحی گرد و غبار نشست بر سطح نمونه‌ها در اثر افزایش زاویه شیب نصب پنل.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

افزایش مشکلات و نگرانی‌های زیست‌محیطی در کنار رشد جمعیت جهان، بر نیاز هر چه بیشتر به بهره‌مندی از سوخت‌های تجدیدپذیر به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی تاکید می‌کند. از میان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، کشور ایران به علت اقلیم مناسب، دارای پتانسیل بالایی برای بهره‌مندی از انرژی خورشیدی می‌باشد. با این وجود یکی از اصلی‌ترین چالش‌های اقلیمی در ایران و منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا، وجود پدیده گرد و غبار است. اگر چه مطالعه‌های بسیار مناسبی در این حوزه انجام شده است، اما فقدان مطالعه‌ای جامع و مروری مشهود می‌باشد. از این‌رو مقاله حاضر ضمن بررسی فعالیتهای گرد و غبار در ایران، با هدف یافتن پارامترهای موثر بر نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک، به مرور مهمترین پژوهش‌های انجام شده مرتبط و دسته‌بندی آن‌ها پرداخته است.

در بخش ابتدایی پژوهش حاضر، به بررسی جامع فعالیتهای گرد و غبار در کشور ایران و منشا این فعالیت‌ها پرداخته شد. بررسی مطالعه‌ها نشان داد که تعدد فعالیتهای گرد و غبار و نیز شدت آن‌ها در کشور ایران در حال افزایش است. علاوه بر این، فعالیتهای گرد و غبار در ایران یا نشأت گرفته از منابع گرد و غبار داخلی همچون دشت کویر، دشت لوت است و یا دارای منشا خارجی می‌باشند. بیابان‌های عراق، عربستان سعودی و امارات متحده عربی و سوریه از اصلی‌ترین منشاهای گرد و غبار در جنوب و غرب ایران، می‌باشند در حالی که در شرق ایران، حوضه سیستان، بیابان ریگستان، کویر مکران و هامون ماشکیل، منابع خارجی گرد و غبار را شامل می‌شوند.

در ادامه، مرور پژوهش‌های انجام شده، اهمیت بالای اثر گرد و غبار بر کاهش تابش رسیده به زمین و نیز تغییر دمایی هوا و نحوه تاثیر بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک را نشان داد. پیچیدگی این پدیده و آثار آن تاکید می‌کند بر نیاز به پژوهش‌های تکمیلی و جامع در این زمینه است. به‌طور کلی با مرور پیشینه پژوهش می‌توان دریافت که نشست گرد و غبار بر روی پنل‌های فتوولتاییک متأثر از جنس و اندازه گرد و غبار در سایت مورد نظر، جنس پوشش شیشه‌ای سطح پنل فتوولتاییک و پارامترهای محیطی بسیاری از جمله باد، باران و رطوبت و گرانش می‌باشد، که نحوه تاثیر هر یک از آن‌ها به‌طور مفصل تشریح گردید.

باد انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که جهت وزش باد نسبت به سرعت باد تاثیر بیشتری بر توزیع گرد و غبار می‌گذارد. به‌علاوه بنا به گزارش آن‌ها سرعت بالای باد (بیشتر از ۲/۵۹ متربرثانیه) منجر به تجمع گرد و غبار بر سلول و کاهش شدید عملکرد آن می‌گردد. در حالی که در سرعت‌های کمتر باد، تجمع گرد و غبار کاهش می‌یابد و افت عملکرد پنل نیز کمتر است [24]. در پژوهشی دیگر گایر [113]، عنوان داشت که اثر اندازه ذره‌های گرد و غبار مریخ بر عملکرد فتوولتاییک 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^۱ و همکاران [122]، تایید گشت. طبق گزارش آن‌ها میزان چگالی سطحی گرد و غبار روی سطح، در سرعت باد بالا (بیشتر از ۲۴ متر بر ثانیه) قابل‌صرفه‌نظر کردن است.

۴-۵- گرانش

جاذبه گرانشی نیز از جمله دیگر عوامل طبیعی حذف گرد و غبار از سطح پنل‌های فتوولتاییک می‌باشد. غلامی و همکاران [119]، در مطالعه‌ای در اصفهان نشان دادند که تحت تاثیر گرانش زمین، افزایش شیب پنل‌ها به‌طور کلی موجب کاهش نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک می‌گردد (شکل ۱). البته تغییر شیب نصب پنل‌ها موجب تغییر میزان تابش رسیده به سطح پنل نیز می‌گردد که تاثیر بسیار زیادی بر عملکرد پنل‌های خورشیدی دارد. از این‌رو یافتن شیب بهینه نصب پنل‌ها در یک محل بسیار با اهمیت است. به منظور تعیین زاویه بهینه نصب پنل‌های فتوولتاییک در کرمان، روح‌الامینی و همکاران [123]، 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 عوامل محیطی نظیر گرد و غبار، به منظور تعیین زاویه بهینه نصب پنل، باید مورد توجه قرار گیرد. در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر گرد و غبار بر زاویه بهینه نصب پنل و در ادامه مطالعه‌های قبلی، با انجام مطالعه‌ای تجربی، گزارش کردند که با توجه به تاثیر گرانش بر 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 [124].



- Engineering: ICAME 2018*, 2018, pp. 3–12.
- [15] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R. G. Ghoachani, S. Eslami, and S. Pierfederici, "Photovoltaic Potential Assessment and Dust Impacts on Photovoltaic Systems in Iran: Review Paper," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 10, no. 3, pp. 824–837, May 2020.
- [16] "Scopus - Analyze search results." [Online]. Available: <https://www-scopus-com>. [Accessed: 28-Apr-2019].
- [17] A. Gholami, S. Eslami, A. Tajik, M. Ameri, R. Gavagsaz Ghoachani, and M. Zandi, "A review of dust removal methods from the surface of photovoltaic panels," *Mech. Eng. Sharif J.*, vol. 35, no. 2, pp. 117–127, Dec. 2019.
- [18] A. Gholami *et al.*, "A Review of the Effect of Dust on the Performance of Photovoltaic Panels," *Iran. Electr. Ind. J. Qual. Product.*, vol. 8, no. 15, pp. 93–102, 2019.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] H. Hottel and B. Woertz, "Performance of flat-plate solar-heat collectors," *Trans. ASME (Am. Soc. Mech. Eng.) (United States)*, vol. 64, 1942.
- [27] J. M. Prospero and P. J. Lamb, "African droughts and dust transport to the Caribbean: Climate change implications," *Science (80-.)*, vol. 302, no. 5647, pp. 1024–1027, 2003.
- [28] S. Rodríguez *et al.*, "Modulation of Saharan dust export by the North African dipole," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, no. 13, pp. 7471–7486, 2015.
- [29] F. Solmon, V. S. Nair, and M. Mallet, "Increasing Arabian dust activity and the Indian summer monsoon," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 15, no. 14, pp. 8051–8064, 2015.
- [30] M. Antón *et al.*, "Evaluation of the aerosol forcing efficiency in the UV erythemal range at Granada, Spain," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 116, no. D20, 2011.
- [31] P. J. Prakash, G. Stenchikov, S. Kalenderski, S. Osipov, and H. Bangalath, "The impact of dust storms on the Arabian Peninsula and the Red Sea," *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, vol. 14, no. 13, 2014.
- [32] A. Valenzuela *et al.*, "Aerosol scattering and absorption Angström exponents as indicators of dust and dust-free days over Granada (Spain)," *Atmos. Res.*, vol. 154, pp. 1–13, 2015.
- [33] M. Gharibzadeh, K. Alam, A. A. Bidokhti, Y. Abedini, and A. Masoumi, "Radiative Effects and Optical Properties of Aerosol during Two Dust Events in 2013 over Zanjan, Iran," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 17, no. 3, pp. 888–898, 2017.
- [34] M. Sharifikia, "Environmental challenges and drought hazard assessment of Hamoun Desert Lake in Sistan region, Iran, based on the time series of satellite imagery," *Nat. hazards*, vol. 65, no. 1, pp. 201–217, 2013.
- [35] A. Rashki, M. Arjmand, and D. G. Kaskaoutis, "Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran," *Aeolian Res.*, vol. 24, pp. 145–160, 2017.
- بررسی پژوهش‌های صورت گرفته، نیاز مبرم به پژوهش‌های تکمیلی به منظور شناخت دقیق‌تر پدیده گرد و غبار و نحوه اثر آن بر عمل‌کرد پنل‌های فتولتاییک به خصوص در اقلیم ایران را نشان می‌دهد. علاوه بر این یافتن زمان و روش مناسب برای شست و شوی پنل‌های فتولتاییک به منظور حذف گرد و غبار از سطح پنل‌ها نیز امری الزامی است.
- ### ۶- تقدیر و تشکر
- نویسندگان پژوهش حاضر، تشکر و قدردانی فراوان خود را از همکاری‌های صمیمانه و پشتیبانی مالی آزمایشگاه انرژی‌های تجدید پذیر دانشگاه شهید بهشتی (REDSBU)، صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) و مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران اعلام می‌دارند.
- ### ۷- مراجع
- [1] R. Modarres and S. Sadeghi, "Spatial and temporal trends of dust storms across desert regions of Iran," *Nat. Hazards*, pp. 1–14, 2018.
- [2] P. Broomandi, B. Dabir, B. Bonakdarpour, and Y. Rashidi, "Identification of dust storm origin in South–West of Iran," *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 15, no. 1, p. 16, Dec. 2017.
- [3] A. Keramat, B. Marivani, and M. Samsami, "Climatic change, drought and dust crisis in Iran," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, pp. 10–13, 2011.
- [4] K. Ashrafi, M. Shafiepour-Motlagh, A. Aslemand, and S. Ghader, "Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT," *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 1, p. 9, 2014.
- [5] R. Mashayekhi, P. Irannejad, J. Feichter, and A. A. Bidokhti, "Implementation of a new aerosol HAM model within the Weather Research and Forecasting (WRF) modeling system," *Geosci. Model Dev. Discuss.*, vol. 2, no. 2, pp. 681–707, 2009.
- [6] F. Taghavi, E. Owlad, and S. A. Ackerman, "Enhancement and identification of dust events in the south-west region of Iran using satellite observations," *J. Earth Syst. Sci.*, vol. 126, no. 2, p. 28, 2017.
- [7] S. Movahedi and S. M. Afzali, "Analysis of the Number of Dusty days in the West and South West of Iran," vol. 2, no. 10, pp. 18–21, 2013.
- [8] F. Taghavi, F. Taghavi, and A. Asadi, "The use of Satellite Images to monitor the position of Dust Storm over Persian Gulf region," in *37th COSPAR Scientific Assembly*, 2008, vol. 37, pp. 3117–3124.
- [9] M. R. Jamalizadeh, A. Moghaddamnia, J. Piri, V. Arbabi, M. Homayounifar, and A. Shahryari, "Dust Storm Prediction Using ANNs Technique (A Case Study: Zabol City) 1," 2008.
- [10] E. Akrami, A. Gholami, M. Ameri, and M. Zandi, "Integrated an innovative energy system assessment by assisting solar energy for day and night time power generation: Exergetic and Exergo-economic investigation," *Energy Convers. Manag.*, vol. 175, pp. 21–32, Nov. 2018.
- [11] E. Akrami, I. Khazaei, and A. Gholami, "Comprehensive analysis of a multi-generation energy system by using an energy-exergy methodology for hot water, cooling, power and hydrogen production Comprehensive analysis of a multi-generation energy system by using an energy-exergy methodology for h," *Appl. Therm. Eng.*, 2017.
- [12] A. Gholami, A. Tajik, S. Eslami, and M. Zandi, "Feasibility Study of Renewable Energy Generation Opportunities for a Dairy Farm," *J. Renew. Energy Environ.*, vol. 6, no. 2, pp. 8–14, 2019.
- [13] A. Aryanfar, A. Gholami, M. Pourgholi, S. Shahroozi, M. Zandi, and A. Khosravi, "Multi-criteria photovoltaic potential assessment using fuzzy logic in decision-making: A case study of Iran," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 42, no. April, p. 100877, Dec. 2020.
- [14] Y. Gholami, A. Gholami, M. Ameri, and M. Zandi, "Investigation of Applied Methods of Using Passive Energy In Iranian Traditional Urban Design, Case Study of Kashan," in *4th International Conference on Advances In Mechanical*



- city in Northwest Iran," *Atmos. Res.*, vol. 120, pp. 343–355, 2013.
- [56] M. Notaro, Y. Yu, and O. V. Kalashnikova, "Regime shift in Arabian dust activity, triggered by persistent Fertile Crescent drought," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 120, no. 19, 2015.
- [57] V. K. Sissakian, N. Al-Ansari, and S. Knutsson, "Sand and Dust storm events in Iraq," *Nat Sci*, vol. 5, 2013.
- [58] A. Zarasvandi, E. J. M. Carranza, F. Moore, and F. Rastmanesh, "Spatio-temporal occurrences and mineralogical--geochemical characteristics of airborne dusts in Khuzestan Province (southwestern Iran)," *J. Geochem Explor.*, vol. 111, 2011.
- [59] A. A. Kazem, M. T. Chaichan, and H. A. Kazem, "Dust effect on photovoltaic utilization in Iraq," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 37, pp. 734–749, 2014.
- [60] F. Taghavi, E. Owlad, T. Safarrad, and P. Irannejad, "Identifying and monitoring dust storm in the western part of Iran using remote sensing techniques," *Earth Sp. Phys.*, vol. 1, no. May, pp. 83–96, 2013.
- [61] O. Alizadeh-Choobari, A. Sturman, and P. Zawar-Reza, "Global distribution of mineral dust and its impact on radiative fluxes as simulated by WRF-Chem," *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol. 127, no. 6, pp. 635–648, 2015.
- [62] S. Kamali, A. Mofidi, A. Zarrin, and H. Nazarpour, "Sensitivity studies of the forth-generation regional climate model simulation of dust storms in the Sistan plain, Iran," *Model. Earth Syst. Environ.*, pp. 1–13, 2017.
- [63] M. Gharibzadeh, K. Alam, Y. Abedini, A. A. Bidokhti, and A. Masoumi, "Monthly and seasonal variations of aerosol optical properties and direct radiative forcing over Zanjan, Iran," *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, vol. 164, pp. 268–275, 2017.
- [64] M. Khoshshima, A. A. Bidokhti, and F. Ahmadi-Givi, "Variations of aerosol optical depth and Angstrom parameters at a suburban location in Iran during 2009–2010," *J. earth Syst. Sci.*, vol. 123, no. 1, pp. 187–199, 2014.
- [65] S. Farhadipour, M. Azadi, A. Aliakbari Bikhokhti, O. Alizadeh-Choobari, and H. Allah Sayari, "Dust storms in west and southwest Iran and their impact on radiation fluxes: A case study," *Iran. J. Geophys.*, vol. 11, no. 3, pp. 75–90, 2017.
- [66] S. Eslami, A. Gholami, A. Bakhtiari, M. Zandi, and Y. Noorollahi, "Experimental investigation of a multi-generation energy system for a nearly zero-energy park: A solution toward sustainable future," *Energy Convers. Manag.*, vol. 200, no. May, p. 112107, Nov. 2019.
- [67] S. Eslami, A. Gholami, H. Akhbari, M. Zandi, and Y. Noorollahi, "Solar-based multi-generation hybrid energy system; simulation and experimental study," *Int. J. Ambient Energy*, pp. 1–13, Jul. 2020.
- [68] T. R. B. and R. G. H. Qasem*, "EFFECT OF SHADING CAUSED BY DUST ON CADMIUM TELLURIDE PHOTOVOLTAIC MODULES," 2011.
- [69] 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.
- [70] R. Appels *et al.*, "Effect of soiling on photovoltaic modules," *Sol. Energy*, vol. 96, pp. 283–291, Oct. 2013.
- [71] 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.
- [72] 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.
- [73] 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.
- [74] 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.
- [75] A. O. Mohamed and A. Hasan, "Effect of dust accumulation on performance of photovoltaic solar modules in Sahara
- [36] M. Waldinger, "The effects of climate change on internal and international migration: implications for developing countries," *Cent. Clim. Chang. Econ. Policy Work. Pap.*, vol. 217, 2015.
- [37] A. Neisi *et al.*, "Study of heavy metal levels in indoor dust and their health risk assessment in children of Ahvaz city, Iran," *Toxin Rev.*, vol. 35, no. 1–2, pp. 16–23, 2016.
- [38] Y. O. Khaniabadi *et al.*, "Hospital admissions in Iran for cardiovascular and respiratory diseases attributed to the Middle Eastern Dust storms," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, pp. 1–9, 2017.
- [39] W. W. S. Tam, T. W. Wong, A. H. S. Wong, and D. S. C. Hui, "Effect of dust storm events on daily emergency admissions for cardiovascular diseases," *Respirology*, vol. 17, no. 3, pp. 655–660, 2012.
- [40] A. Miri, H. Ahmadi, A. Ghanbari, and A. Moghaddamnia, "Dust storms impacts on air pollution and public health under hot and dry climate," *Int. J. Energy Env.*, vol. 2, no. 1, pp. 101–105, 2007.
- [41] G. Goudarzi, S. Geravandi, M. J. Mohammadi, S. Saeidimehr, A. Ghomaishi, and S. H. Salmazadeh, "Health endpoints caused by PM10 Exposure in Ahvaz, Iran," *Iran J. Heal. Saf. Env.*, vol. 1, 2014.
- [42] Z. Soleimani, G. Goudarzi, A. Sorooshian, M. B. Marzouni, and H. Maleki, "Impact of Middle Eastern dust storms on indoor and outdoor composition of bioaerosol," *Atmos. Environ.*, vol. 138, pp. 135–143, 2016.
- [43] H. Cao, J. Liu, G. Wang, G. Yang, and L. Luo, "Identification of sand and dust storm source areas in Iran," *J. Arid Land*, vol. 7, no. 5, pp. 567–578, 2015.
- [44] M. Rezazadeh, P. Irannejad, and Y. Shao, "Climatology of the Middle East dust events," *Aeolian Res.*, vol. 10, pp. 103–109, 2013.
- [45] A. Zarasvandi, "Environmental impacts of dust storms in the Khuzestan province," *Environ. Prot. Agency Khuzestan Prov. Intern. Report*, 375p, 2009.
- [46] M. S. Najafi, F. Khoshakhlagh, S. M. Zamanzadeh, M. H. Shirazi, M. Samadi, and S. Hajikhani, "Characteristics of TSP loads during the Middle East springtime dust storm (MESDS) in Western Iran," *Arab. J. Geosci.*, vol. 7, no. 12, pp. 5367–5381, 2014.
- [47] A. Rashki, D. G. Kaskaoutis, P. G. Eriksson, M. Qiang, and P. Gupta, "Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran," *Aeolian Res.*, vol. 5, pp. 51–62, 2012.
- [48] A. Rashki, D. G. Kaskaoutis, A. S. Goudie, and R. A. Kahn, "Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: the case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran," *Sci. Total Environ.*, vol. 463, pp. 552–564, 2013.
- [49] A. Rashki, C. J. deW Rautenbach, P. G. Eriksson, D. G. Kaskaoutis, and P. Gupta, "Temporal changes of particulate concentration in the ambient air over the city of Zahedan, Iran," *Air Qual. Atmos. Heal.*, vol. 6, no. 1, pp. 123–135, 2013.
- [50] A. Rashki, D. G. Kaskaoutis, P. Francois, P. G. Kosmopoulos, and M. Legrand, "Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: seasonality, transport characteristics and affected areas," *Aeolian Res.*, vol. 16, pp. 35–48, 2015.
- [51] D. G. Kaskaoutis *et al.*, "Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran," *Clim. Dyn.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 407–424, 2015.
- [52] D. G. Kaskaoutis *et al.*, "The Caspian Sea–Hindu Kush Index (CasHKI): a regulatory factor for dust activity over southwest Asia," *Glob. Planet. Change*, vol. 137, pp. 10–23, 2016.
- [53] F. Abdi Vishkaee, C. Flamant, J. Cuesta, P. Flamant, and H. R. Khaledifard, "Multiplatform observations of dust vertical distribution during transport over northwest Iran in the summertime," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 116, no. D5, 2011.
- [54] F. Abdi Vishkaee, C. Flamant, J. Cuesta, L. Oolman, P. Flamant, and H. R. Khaledifard, "Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter Shamal: A case study," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 117, no. D3, 2012.
- [55] A. Masoumi, H. R. Khaledifard, A. Bayat, and R. Moradhaseli, "Retrieval of aerosol optical and physical properties from ground-based measurements for Zanjan, a



- Specialists Conference*, 2012, pp. 001881–001885.
- [95] L. L. Kazmerski *et al.*, "Fundamental Studies of Adhesion of Dust to PV Module Surfaces: Chemical and Physical Relationships at the Microscale," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 3, pp. 719–729, May 2016.
- [96] R. E. Cabanillas and H. Munguía, "Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 4, p. 043114, Jul. 2011.
- [97] P. Grunow, D. Sauter, V. Hoffmann, D. Huljić, B. Litzenburger, and L. Podlowski, "The Influence of Textured Surfaces of Solar Cells and Modules on the Energy of PV Systems," *Pvsec 20*, no. June, pp. 2–5, 2005.
- [98] 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.
- [99] 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, pp. 559–565, Nov. 2017.
- [100] K. J. McLean, "Cohesion of precipitated dust layer in electrostatic precipitators," *J. Air Pollut. Control Assoc.*, vol. 27, no. 11, pp. 1100–1103, 1977.
- [101] X. Zhang, F. Shi, J. Niu, Y. Jiang, and Z. Wang, "Superhydrophobic surfaces: from structural control to functional application," *J. Mater. Chem.*, vol. 18, no. 6, pp. 621–633, 2008.
- [102] L. Jing, Z. Zhi-Jun, Y. Ji-Lin, and B. Yi-Long, "A Thin Liquid Film and Its Effects in an Atomic Force Microscopy Measurement," *Chinese Phys. Lett.*, vol. 26, no. 8, p. 086802, Aug. 2009.
- [103] L. K. Verma *et al.*, "Self-cleaning and antireflective packaging glass for solar modules," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 2489–2493, Sep. 2011.
- [104] S. Mekhilef, R. Saidur, and M. Kamalisarvestani, "Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2920–2925, Jun. 2012.
- [105] A. Kumar, T. Staedler, and X. Jiang, "Role of relative size of asperities and adhering particles on the adhesion force," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 409, pp. 211–218, 2013.
- [106] P. G. C. Petean and M. L. Aguiar, "Determining the adhesion force between particles and rough surfaces," *Powder Technol.*, vol. 274, pp. 67–76, 2015.
- [107] S. A. M. Said, G. Hassan, H. M. Walwil, and N. Al-Aqeeli, "The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. May 2017, pp. 743–760, Feb. 2018.
- [108] M. Corn, "The Adhesion of Solid Particles to Solid Surfaces II," *J. Air Pollut. Control Assoc.*, vol. 11, no. 12, pp. 566–584, 1961.
- [109] G. W. Penney and E. H. Klingler, "Contact potentials and the adhesion of dust," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part I Commun. Electron.*, vol. 81, no. 3, pp. 200–204, 1962.
- [110] P. Somasundaran, H. K. Lee, E. D. Shchukin, and J. Wang, "Cohesive force apparatus for interactions between particles in surfactant and polymer solutions," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 266, no. 1–3, pp. 32–37, Sep. 2005.
- [111] L. Kazmerski, S. C. Costa, M. Machado, and A. S. A. C. Diniz, "Dust in the wind: Soiling of solar devices : Is there a Holy Grail solution? (Conference Presentation)," 2016, vol. 9938, p. 993807.
- [112] J. R. Gaier, M. E. Perez-Davis, and M. Marabito, "Aeolian removal of dust from photovoltaic surfaces on Mars," 1990.
- [113] J. R. Gaier and M. E. Perez-davis, "Effect of Particle Size of Martian Dust on the Degradation of Photovoltaic Cell Performance," in *International Solar Energy Conference*, 1992, no. April 4-8, pp. 1–17.
- [114] 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.
- [115] B. M. A. Mohandes, L. El-Chaar, and L. A. Lamont, "Application study of 500 W photovoltaic (PV) system in the environment," *J. Basic Appl. Sci. Res.*, vol. 2, no. 11, pp. 11030–11036, 2012.
- [76] 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.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] A. Gholami, I. Khazaei, S. Eslami, M. Zandi, and E. Akrami, "Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance," *Sol. Energy*, vol. 159, pp. 346–352, 2018.
- [81] 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.
- [82] 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 Humid Ambient Air," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. 1, p. 30253, Sep. 2016.
- [83] E. A. FitzPatrick and E. A. Fitzpatrick, *Soil microscopy and micromorphology*, Illustrate., vol. 158, the University of Michigan: John Wiley & Sons New York, 1993.
- [84] 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.
- [85] 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. 37, no. 6, pp. 737–745, Aug. 2019.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] M. Piliouguine *et al.*, "Comparative analysis of energy produced by photovoltaic modules with anti-soiling coated surface in arid climates," *Appl. Energy*, vol. 112, pp. 626–634, Dec. 2013.
- [91] A. Bianchini, M. Gambuti, M. Pellegrini, and C. Saccani, "Performance analysis and economic assessment of different photovoltaic technologies based on experimental measurements," *Renew. Energy*, vol. 85, pp. 1–11, Jan. 2016.
- [92] M. Duell *et al.*, "IMPACT OF STRUCTURED GLASS ON LIGHT TRANSMISSION, TEMPERATURE AND POWER OF PV MODULES," in *25th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition*, 2010, pp. 3867–72.
- [93] N. M. Nahar and J. P. Gupta, "Effect of dust on transmittance of glazing materials for solar collectors under arid zone conditions of India," *Sol. Wind Technol.*, vol. 7, no. 2–3, pp. 237–243, Jan. 1990.
- [94] 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*



- UAE,” *Appl. Sol. Energy*, vol. 45, no. 4, pp. 242–247, Dec. 2009.
- [116] 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.
- [117] 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.
- [118] 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.
- [119] 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, pp. 466–473, Nov. 2017.
- [120] Y. Callot, B. Marticorena, G. Bergametti, and D. De, “Geomorphologic approach for modelling the surface features of arid environments in a model of dust emissions: application to the Sahara desert,” *Geodin. Acta*, vol. 13, no. 5, pp. 245–270, Oct. 2000.
- [121] D. Goossens, Z. Y. Offer, and A. Zangvil, “Wind tunnel experiments and field investigations of eolian dust deposition on photovoltaic solar collectors,” *Sol. Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 75–84, Jan. 1993.
- [122] H. A. AlBusairi and H. J. Möller, “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, September, 2010*, pp. 6–10.
- [123] 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.
- [124] 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.

