DOR: 20.1001.1.24234931.1402.10.1.15.3
DOI: 10.52547/jrenew.10.1.198

Review Article
Received: 01/18/22
Accepted: 11/07/22

Volume 10, Issue 1, Spring & Summer 2023, p. p. 198-211
Journal of Renewable and New Energy
jrenew.ir
Print ISSN 2423-4931 Online ISSN 2676-2994

A Review on The Effect of Dust Properties on Photovoltaic Solar Panels' Performance

Maryam Rezvani[1], Aslan Gholami[2], Roghayeh Gavagsaz-Ghoachani[3], and Majid Zandi[4*]

1- Master student, Renewable Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2- Ph.D., Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
4- Associate Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1658953571 Tehran, Iran, m_zandi@sbu.ac.ir

Received: 18 January 2022 Revised: 7 September 2022 Accepted: 7 November 2022

Abstract

Nowadays, due to the increasing demand for energy and the problems of non-renewable energies, renewable energies are growing. In a country like Iran with a radiation potential higher than the global average, utilizing solar energy is a priority among other renewable energy sources. In areas affected by the dust phenomenon, one of the main challenges is the performance reduction of photovoltaic solar panels due to dust accumulation. By conducting a comprehensive review of related studies, the present study categorized the properties of dust and how they affect the performance of photovoltaic solar panels. Also, the dust origins in Iran and the frequency of dust phenomena in the country were studied. It was shown that the different physical properties and chemical composition lead to different effects on the performance of photovoltaic solar panels. Therefore, the effect of physical properties (color, temperature, dust accumulation rate, adhesion, concentration, moisture content, specific gravity, and plastic index) and chemical composition (size, charge, shape, material, and distribution of particles) of dust on the performance of photovoltaic solar panels were studied and classified. The present study can be used as a general reference for additional research in this field according to the dominant dust type in the target region.

Keywords: Photovoltaic solar panels, Dust, Dust Origin, Physical properties, Chemical composition

1. INTRODUCTION

Today, the energy demand is increasing due to global population growth and technological advances [1]. On the other hand, due to the problems and disadvantages of non-renewable energies, environmental concerns and the need for sustainable energy security have led to the growing use of renewable energies [2–8]. In a region like Iran, which has high solar radiation even more than the global average, using solar energy becomes more important than all other types of renewable energy. Especially due to solar energy unlimited source, easy access, producing no noise and pollution, growing research and development in this field, and also the global decline in the price of photovoltaic solar systems in recent years, the necessity of using this energy is completely clear [2,9,10]. However, due to the prevailing climate in Iran, dust is a challenging issue for the use of solar energy; Because the deposition of dust on the photovoltaic solar panel significantly reduces its performance [11]. According to a study in Iran, during the 70 days, the light transmission coefficient decreased by 25% due to dust settling [9]. Therefore, it is necessary to study this issue in particular. The following figure shows the upward trend of research in this field and clarifies the need to study this issue more than before.

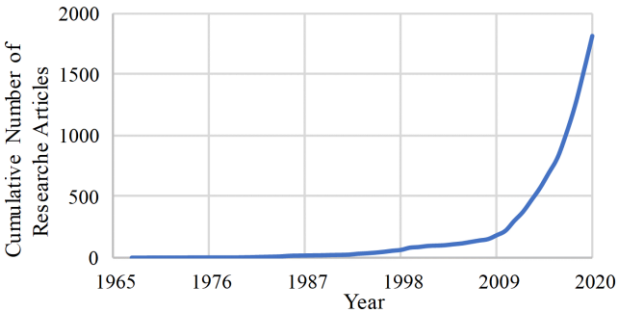


Figure 1 Line chart of the cumulative number of article researches by year [12]

Based on figure 1, the research on the effect of dust on the performance of photovoltaic solar panels started about six decades ago by realizing the effect of dust on the amount of light reached by the solar panel surface [12]. Al-Shubokshi and Hussein were among the pioneers, who studied the effect of physical and chemical properties of dust particles on photovoltaic solar panels [13]. With the development of photovoltaic systems and the emergence of the dust challenge, especially in areas with high radiation potential such as the Middle East and parts of China, the research trend has been growing from 2009 onwards [12]. The present study reviews the research conducted on the effect of physical properties and chemical composition of dust on the performance of photovoltaic solar panels.

Check for updates

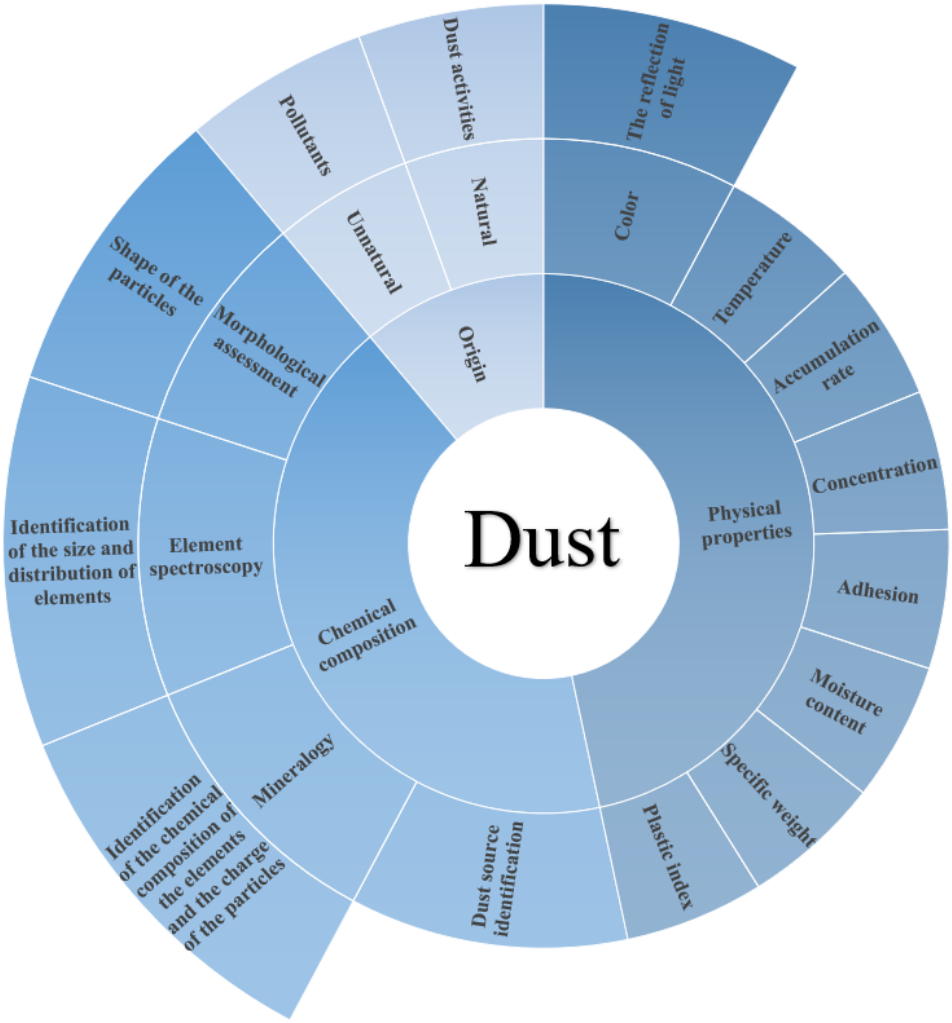


Figure 2 Dust Properties

2. MATERIAL AND METHOD

Since the purpose of this article is to achieve how the properties of dust affect the performance of photovoltaic solar panels, it is necessary to study the characteristics of the dust and its source in the first place. Therefore, after discussing the necessity and background of this issue, the origin of dust was investigated. Also, internal and external sources of dust in Iran and the frequency of this phenomenon were studied. Afterward, articles related to the effect of physical properties such as color, temperature, dust accumulation rate, adhesion, concentration, moisture content, specific gravity, and plastic index were reviewed. Moreover, documents about properties related to chemical composition such as size, charge, shape, material, and distribution of dust particles on the performance of photovoltaic solar panels were studied. Figure 2 shows the classification of dust properties, which is a summary of the topics discussed in this article.

3. Results and Discussion

The main sources of dust are deserts. Dust Origins can be natural or unnatural. There are internal and external dust sources for any country. Since The effect of dust deposition strongly depends on the local area where the photovoltaic solar system is installed, dust sources are described in detail for Iran in this article.

It was found that each parameter of physical properties and chemical composition of dust affects the performance of the solar panel. Therefore, considering the effectiveness of these parameters and conducting additional research in this field according to the prevailing dust in the target region is necessary. This way, not only it is possible to find suitable areas for the construction of photovoltaic solar systems, but also the appropriate time and method for cleaning are determined, and thus the reduction of the photovoltaic solar system lifetime prevented as much as possible. The necessity of this issue is becoming more and more apparent due to the lack of enough data and research in this field in Iran.

4. Conclusions

The results of the current study can use as a general reference for researchers, designers, and engineers who deal with photovoltaic systems in regions struggling with dust events such as the Middle East, and in particular, Iran.

5. Reference

[1] E. Rosenberg, A. Lind, and K. A. Espegren, The impact of future energy demand on renewable energy production - Case of Norway, *Energy*, Vol. 61, pp. 419–431, 2013.

[2] Z. Tasneem *et al.*, An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges, *Developments in the Built Environment*, Vol. 4, p. 100033, 2020.

[3] 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 Journal of Photovoltaics*, Vol. 10, No. 3, pp. 824–837, 2020.

[4] V. Gupta, M. Sharma, R. K. Pachauri, and K. N. Dinesh Babu, Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques, *Solar Energy*, Vol. 191, No. May, pp. 596–622, 2019.

[5] A. K.R, H. Ajimotokan, and W. Raji, Global Warming and Environmental Change Problems: Renewable Energy and Cleaner Fossil Fuels Technology as a Solution, *Proceedings of 10th International Conference on Clean Energy (ICCE-2010), Famagusta, N. Cyprus.*, 2010.

[6] A. G. Chmielewski, Enviromental effects of fossil fuels, *An End to Global Warming*, No. January 2005, pp. 1–31, 2014.

[7] E. Akyuz, Advantages and Disadvantages of Nuclear Energy in Turkey: Public Perception, *Eurasian Journal of Environmental Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–11, 2017.

[8] C. J. Axon and R. C. Darton, Sustainability and risk – a review of energy security, *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 27, pp. 1195–1204, 2021.

[9] A. Gholami, A. Saboonchi, A. A. Alemrajabi, and A., Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications, *Renewable Energy*, Vol. 112, pp. 466–473, 2017.

[10] S. C. S. Costa, A. S. A. C. Diniz, and L. L. Kazmerski, Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 63, pp. 33–61, 2016.

[11] M. Rajaee and K. Challasi, Experimental study of the effect of dust and sandon photovoltaic modules, *Journal of Environmental Science and Technology*, 2020.

[12] Scopous, Accessed 1 January 2021; https://www.scopus.com/.

[13] Z. A. Darwish, K. Sopian, and A. Fudholi, Reduced output of photovoltaic modules due to different types of dust particles, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 280, 2021.

سال دهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۲، ص ص ۱۹۸-۲۱۱
فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
jrenew.ir
مقاله مروری
تاریخ دریافت: ۰۰/۱۰/۲۸
تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۸/۱۶

مروری بر اثر ویژگی‌های گرد و غبار روی عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی

مریم رضوانی[۱]، اصلان غلامی[۲]، رقیه گوگ‌ساز قوچانی[۳] و مجید زندی[۴*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی انرژی‌های تجدیدپذیر، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
* تهران، صندوق‌پستی ۱۶۵۸۹۵۳۵۷۱، m_zandi@sbu.ac.ir

چکیده

امروزه با توجه به تقاضای روزافزون انرژی و مشکل‌های انرژی‌های تجدیدناپذیر، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر روبه‌رشد است. در کشوری هم‌چون ایران با پتانسیل تابشی بالاتر از میانگین جهانی بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در میان سایر انرژی‌های تجدیدپذیر در اولویت است. در مناطقی که درگیر پدیده گرد و غبار هستند، یکی از چالش‌های اساسی کاهش عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی در اثر تجمع گرد و غبار است. با مرور جامع پژوهش‌های مرتبط، مطالعه حاضر به دسته‌بندی ویژگی‌های گرد و غبار و نحوه اثرگذاری آن‌ها بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی پرداخته‌است. هم‌چنین منابع گرد و غبار کشور ایران و میزان فراوانی پدیده گرد و غبار در آن بررسی گردید. در این مطالعه مروری با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده، نشان داده شد که ویژگی‌های فیزیکی و ترکیب شیمیایی متفاوت گرد و غبار منجر به ایجاد آثار متفاوتی در عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی می‌گردد. از این‌رو اثرپذیری عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی از خواص فیزیکی (رنگ، دما، نرخ نشست گرد و غبار، میزان چسبندگی، غلظت، میزان رطوبت، وزن مخصوص و شاخص پلاستیکی) و شیمیایی (اندازه، میزان بار، شکل، جنس و توزیع ذره‌ها) گرد و غبار مطالعه و دسته‌بندی گردید. پژوهش حاضر می‌تواند مرجعی جامع برای انجام پژوهش‌های تکمیلی در این زمینه با توجه به جنس گرد و غبار غالب در منطقه مدنظر قرار گیرد.

کلیدواژگان: پنل فتوولتاییک خورشیدی، گرد و غبار، منبع گرد و غبار، خواص فیزیکی، ترکیب شیمیایی

A Review on The Effect of Dust Properties on Photovoltaic Solar Panels' Performance

Maryam Rezvani[1], Aslan Gholami[2], Roghayeh Gavagsaz-Ghoachani[3], and Majid Zandi[4*]

1- Master student, Renewable Energy Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2- Ph.D., Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
4- Associate Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
* P.O.B. 1658953571 Tehran, Iran, m_zandi@sbu.ac.ir

Received: 18 January 2022 Accepted: 7 November 2022

Abstract

Nowadays, due to the increasing demand for energy and the problems of Non-renewable energies, renewable energies are growing. In a country like Iran with a radiation potential higher than the global average, utilizing solar energy is a priority among other renewable energy sources. In areas affected by the dust phenomenon, one of the main challenges is the performance reduction of photovoltaic solar panels due to dust accumulation. By conducting a comprehensive review of related studies, the present study categorized the properties of dust and how they affect the performance of photovoltaic solar panels. Also, the dust origins in Iran and the frequency of dust phenomena in the country were studied. It was shown that the different physical properties and chemical composition lead to different effects on the performance of photovoltaic solar panels. Therefore, the effect of physical properties (color, temperature, dust accumulation rate, adhesion, concentration, moisture content, specific gravity, and plastic index) and chemical composition (size, charge, shape, material, and distribution of particles) of dust on the performance of photovoltaic solar panels were studied and classified. The present study can be used as a general reference for additional researches in this field according to the dominant dust type in the target region.

Keywords: Photovoltaic solar panels, Dust, Dust Origin, Physical properties, Chemical composition

۱- مقدمه

امروزه با توجه به افزایش جمعیت جهان و پیشرفت فن‌آوری، تقاضای انرژی روند فزاینده‌ای دارد [۱]. از طرفی با توجه به چالش‌های پیش‌روی تامین انرژی هم‌چون محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی و اتمام آن در حدود صد سال آینده (در صورت بهره‌گیری از آن با نرخ کنونی)، وابستگی قابل‌توجه تولید برق به انرژی‌های فسیلی، نرخ متغیر و حتی فزاینده سوخت‌های فسیلی در آینده‌ای نزدیک و نیز نگرانی‌های زیست‌محیطی[1]، نیازمند منبع جایگزینی برای انرژی‌های فسیلی هستیم [۲،۳]. انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی‌هوا و حتی آب و خاک، تغییرات آب و هوایی گسترده، گرم شدن کره زمین، بالا آمدن سطح آب و از بین رفتن برخی گونه‌های گیاهی و جانوری که نمونه‌هایی از مشکل‌های زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی هستند، ضرورت به‌کارگیری انرژی‌های دیگر را بیش از پیش روشن می‌سازد[۴،۲–۶]. هم‌چنین مسئله چالش‌برانگیز ایمنی انرژی هسته‌ای با توجه به تولید زباله هسته‌ای و خطر ایجاد حادثه؛ در کنار مشکلات انرژی فسیلی سبب شده تا سمت و سوی تحقیق و توسعه در راستای انرژی‌های تجدیدپذیر قرار گیرد [۷]. انرژی‌های تجدیدپذیر از جهت تجدیدپذیر بودن منابع آن، امکان دسترسی ساده به آن‌ها در هر نقطه زمین با توجه به پتانسیل آن منطقه، سازگاری با محیط‌زیست و نیز از نظر ایجاد تنوع در سبد تولید انرژی و ایجاد امنیت پایدار انرژی دارای اهمیت هستند [۲،۸].

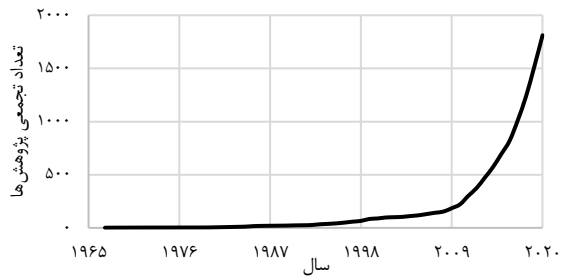
انرژی خورشیدی در میان تمام انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، با توجه به نامحدود بودن منبع آن، دسترسی آسان، نداشتن آلودگی صوتی، تحقیق و توسعه روبه‌رشد در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر به‌خصوص انرژی خورشیدی، کاهش جهانی قیمت سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی در سال‌های اخیر و هم‌چنین پتانسیل تابشی بالای کشور ایران نسبت به میانگین جهانی؛ در این منطقه بیش از انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر دارای اهمیت است [۲،۹،۱۰]. گرچه با توجه به اقلیم غالب کشور ایران، گرد و غبار مسئله‌ای چالش‌برانگیز در جهت بهره‌گیری از انرژی خورشیدی می‌باشد؛ چراکه نشست گرد و غبار بر پنل فتوولتاییک خورشیدی سبب کاهش قابل‌توجه عملکرد آن می‌شود [۱۱،۱۲]. از این‌رو لازم است به‌طور ویژه این مسئله بررسی گردد. شکل ۱ روند صعودی پژوهش‌ها در این زمینه را نشان‌می‌دهد و ضرورت بررسی این موضوع را بیش از پیش روشن می‌سازد.

گرد و غبار از آن جهت که هم بر سایر عوامل محیطی تاثیر می‌گذارد و هم تاثیر می‌پذیرد، یکی از پیچیده‌ترین عوامل محیطی موثر بر عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی به‌شمار می‌آید. غلامی و همکاران در این باره مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در ایران داشتند که البته در آن به تاثیر ویژگی‌های گرد و غبار بر عملکرد پنل پرداخته نشده بود [۳]. طبق پژوهشی در ایران، طی بازه ۷۰ روزه ضریب انتقال نور به‌علت نشست گرد و غبار ٪۲۵ کاهش یافت [۹]. بنابراین لازم است تا به‌دقت اثرگذاری گرد و غبار مورد بررسی قرار گیرد.

بر اساس شکل ۱، پیشینه پژوهشی موضوع اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی به حدود شش دهه قبل با پی بردن به اثرگذاری گرد و غبار در میزان نور رسیده به سطح پنل می‌رسد [۱۳]. الشوبوکشی و حسین در سال ۱۹۹۳ مطرح کردند که در مطالعه ادبیات فتوولتاییک، نگرانی کمی برای مسئله گرد و غبار مشاهده می‌شود. آثار محدود منتشر شده در آن زمان نشان‌می‌دهد که این مسئله حتی به‌خوبی بررسی نشده است [۱۴].

به‌عنوان‌مثال نیمو و سِید[2] در سال ۱۹۷۹ به‌دلیل تجمع گرد و غبار طی یک دوره شش‌ماهه، به‌ترتیب ٪۲۶ و ٪۴۰ کاهش راندمان پنل‌های حرارتی و سلول‌های فتوولتاییک را مشاهده کردند؛ اگرچه اطلاعاتی در مورد میزان آلودگی گرد و غبار و ذره‌های آن در طول دوره آزمایش داده نشده است [۱۵]. از این‌رو، نتایج نویسندگان در این زمینه می‌تواند گمراه‌کننده باشد و نمی‌توان آن‌ها را تعمیم داد؛ چراکه به‌عنوان‌مثال در سایت‌های بسیار آلوده، این کاهش کارایی فقط در عرض چند روز یا چند ساعت و نه در طی شش ماه رخ می‌دهد [۱۴]. دیتز در سال ۱۹۶۳، در پژوهش مشابهی نشان داد که گرد و غبار می‌تواند شدت تابش خورشید را که به جمع‌کننده خورشیدی می‌رسد، با ضریب ٪۵ کاهش دهد [۱۶]. دوفی و بکمن در سال ۱۹۷۴ ضریب کاهش ۰/۹۸ را توصیه کردند که به‌طور مجدد نمی‌تواند عمومی تصور شود یا برای انواع گرد و غبار اعمال شود [۱۷]. به روشی واقع‌بینانه‌تر، این مسئله توسط الشوبوکشی و همکاران در سال ۱۹۸۵ بررسی شد؛ جایی‌که آن‌ها اثر گرد و غبار را بر عملکرد سلول‌های فتوولتاییک به‌صورت متمرکز مطالعه کردند. در طول دوره آزمایش، از هوای جوی نمونه‌برداری شد تا میزان آلودگی ذره‌های معلق بر حسب میکروگرم بر متر مکعب تعیین شود. میزان تجمع گرد و غبار روی سطح سلول‌ها نیز بر حسب گرم بر مترمکعب از سطح فتوولتاییک پیدا شد. آن‌ها کاهش جریان اتصال کوتاه، بیشینه توان، بازده تبدیل و دمای سلول را با تراکم تجمع گرد و غبار ارتباط دادند. گرچه این مطالعه نیز اطلاعات کافی در مورد گرد و غبار موجود در محل آزمایش یا ویژگی‌های فیزیکی آن ارائه نداد [۱۸].

الشوبوکشی و حسین از جمله پیشگامانی بودند که اثر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ذره‌های گرد و غبار را روی پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی بررسی کردند [۱۹]. الشوبوکشی و حسین در سال ۱۹۹۳ با بررسی افت توان ناشی از نشست کربن، سیمان و سه نوع سنگ آهک نشان دادند که ذره‌های گرد و غبار کوچک‌تر می‌توانند بیش‌تر از ذره‌های درشت گرد و غبار، باعث کاهش عملکرد سامانه فتوولتاییک خورشیدی شوند [۱۴]. بدین ترتیب پژوهش‌ها در این زمینه به‌طور جدی آغاز شد و با توسعه این سامانه‌ها و بروز چالش گرد و غبار به‌ویژه در مناطقی با پتانسیل بالای تابشی چون خاورمیانه و بخش‌هایی از چین، روند پژوهش‌ها از سال ۲۰۰۹ به‌بعد رشد فزاینده‌ای داشت [۱۳].



شکل ۱ نمودار تعداد تجمعی پژوهش‌ها در زمینه اثر گرد و غبار بر عملکرد پنل فتوولتاییک خورشیدی بر اساس سال[3] [۱۳]

1. Environmental concerns

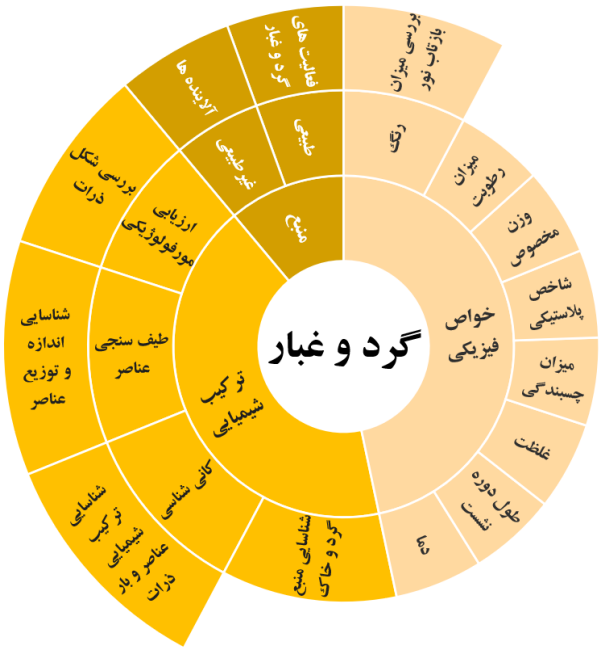
2. Seid

۳. داده‌ها با جستجوی کلید واژگان Dust، Photovoltaic، Soiling، Deposition، Aerosol و Pollution در پایگاه استنادی اسکوپوس از سال‌های ۱۹۶۷ تا ۲۰۲۰ یافت شدند.

از این رو در مطالعه حاضر به مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه با تاکید بر نحوه اثرگذاری ویژگی‌های گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی پرداخته خواهد شد. با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، ابتدا به بررسی ویژگی‌های گرد و غبار و منشا آن پرداخته‌خواهدشد. سپس اثر تک‌تک ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی گرد و غبار بر پنل فتوولتاییک خورشیدی مورد بحث قرارخواهدگرفت. در انتها نیز به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری تمام مباحث مطرح شده پرداخته خواهد شد.

۲- ویژگی‌های گرد و غبار

خواص ذره‌ها به‌طور عمده شامل خواص فیزیکی مانند اندازه ذره‌ها و رسانایی گرمایی و هم‌چنین خواص شیمیایی مانند اسیدی و قلیایی بودن است. پس از نشست ذره‌ها، گرد و غبار انباشته منجر به کاهش تابش رسیده به سطح پنل می‌شود. علاوه‌بر آن این گرد و غبار، منجر به تغییر ضریب انتقال حرارت از سطح پنل فتوولتاییک خورشیدی می‌شود. با این حال، تاثیر این لایه گرد و غبار بر دمای پنل به‌طور نسبی کم‌تر از تابش است. علاوه‌بر این اثر خواص شیمیایی ذره‌ها به‌طور عمده در خوردگی پوشش سطح پنل فتوولتاییک منعکس می‌شود. از آن‌جا که جز اصلی پوشش شیشه‌ای پنل سنگ آهک و دی‌اکسید سیلیکون است، هنگامی‌که ذره‌های آلاینده اسیدی یا قلیایی روی سطح ماژول در محیط مرطوب نشست می‌کنند، با پوشش شیشه‌ای واکنش شیمیایی نشان داده و آن را دچار خوردگی می‌کنند. پس از خوردگی، سطح پوششی پنل ناهموار می‌شود و باعث می‌شود که نور بازتابی را در سطح خود پراکنده کند و بر انتشار نور اثر گذارد [۲۰]. بنابراین بررسی خواص فیزیکی و ترکیب شیمیایی ذره‌ها ضروری است. در ادامه به بررسی موثرترین ویژگی‌های گرد و غبار چنان‌که در شکل ۲ آمده‌است، پرداخته می‌شود. بر اساس این شکل، منابع شکل‌گیری گرد و غبار نقش مهمی در ویژگی‌های گرد و غبار و خواص فیزیکی و شیمیایی آن دارد.



شکل ۲ ویژگی‌های گرد و غبار

۳- منشا گرد و غبار

ایلز و همکاران در سال ۲۰۱۸ اظهار داشتند که مناطق بیابانی منابع اصلی گرد و غبار هستند [۲۱]. علیزاده چوبری و همکاران در سال ۲۰۱۵ بیان کردند که گرد و غبار معدنی به‌طور عمده از منابع‌طبیعی سرچشمه می‌گیرد. از سواحل غربی شمال آفریقا، بر فراز خاورمیانه، آسیای‌مرکزی و جنوب‌غربی تا چین منطقه‌ای قرار دارد که به آن کمربند گرد و غبار [۱] زمین می‌گویند. ایران که در جنوب‌غربی آسیا در منطقه کمربند گرد و غبار زمین قرار دارد، اغلب تحت تاثیر شدید گرد و غبار قرار می‌گیرد. بخش قابل‌توجهی از ایران در کمربند نیمه‌گرمسیری فشار قوی [۲] قرار دارد و و با کم‌تر از ۲۶۰ میلی‌متر میانگین بارندگی سالانه و نرخ تبخیری بسیار بالاتر از نرخ سالانه بارش، شرایط آب و هوایی خشک یا نیمه‌خشک را تجربه می‌کند. در واقع مناطق خشک و نیمه‌خشک حدود ۶۰ درصد از خاک ایران را اشغال کرده و حدود ۱ میلیون کیلومتر مربع را پوشش می‌دهند. علی‌رغم وجود منابع گرد و غبار در داخل ایران، اکنون مقادیر قابل‌توجهی از گرد و غبار از منابع خارجی سرچشمه می‌گیرد [۲۲].

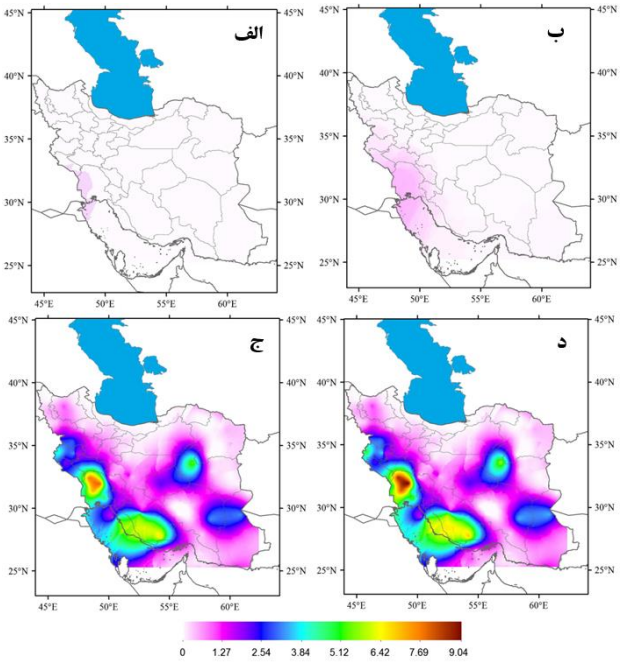
ایران در جهت باد منابع اصلی گرد و غبار از جمله سرزمین‌های خشک الجزیره، دشت آلوویال [۳] حوضه دجله و فرات [۴] و صحرای زبیر [۵] در عراق، صحرای سوریه [۶] که بخش اعظم غربی عراق را دربرگرفته و سه منطقه بیابانی قابل‌توجه النفود [۷] در شمال‌غربی، الدهنا [۸] در شمال‌شرقی و روب‌الخالی [۹] در جنوب شرقی شبه‌جزیره عربی [۱۰] قرار دارد. از آن‌جا که سرزمین‌های بیابانی عراق و صحرای سوریه به‌طور عمده از سیلت و ذره‌های بسیار ریز خاک تشکیل شده‌اند و تحت تاثیر بادهای تابستانی شمالی قرار دارند، آن‌ها به‌راحتی مستعد فرسایش بادی هستند و باعث می‌شوند غرب ایران اغلب تحت تاثیر گرد و غبار منتقل‌شده از این منابع قرار گیرد. بخش بزرگی از شبه‌جزیره عربی نیز توسط دشت‌های بیابانی (بیش‌تر شامل ماسه و سیلت) احاطه شده‌است که به‌عنوان دومین منبع اصلی گرد و غبار جهانی پس از شمال آفریقا عمل می‌کند. مناطق مهم خشک و نیمه‌خشک در داخل و خارج از ایران در شکل ۳ نشان داده‌شده‌است. مناطق وسیع خشک و نیمه‌خشک در داخل ایران و تاثیر عمیق گرد و غبار منتقل‌شده از منابع خارج آن نشان‌می‌دهد که گرد و غبار معدنی سهم مهمی در کاهش کیفیت هوای ایران دارد و به‌عنوان یک اقلیم منطقه‌ای قابل‌توجه عمل می‌کند [۲۲].

میدلتون در سال ۱۹۸۶ با به‌کارگیری مشاهده‌های ایستگاه‌های زمینی، مطالعه اولیه فراوانی و فصلی پدیده‌های گرد و غبار در ایران را انجام داد. وی تصریح‌کرد که بیشترین فراوانی پدیده گرد و غبار در مرزهای ایران، پاکستان و افغانستان رخ می‌دهد [۲۳]. چوباری و همکاران در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ در این باره اظهار داشتند که این منطقه یک فرورفتگی بسته بزرگ (معروف به دشت مارگو [۱۱]) است که شامل حوضه سیستان [۱۲]، صحرای

1. Dust belt
2. Subtropical high-pressure belt
3. Alluvial Plain
4. Tigris–Euphrates basin
5. Zubair Desert
6. Syrian Desert
7. An Nafud
8. Ad-Dahna
9. Rub al Khali
10. Arabian Peninsula
11. Dasht-e Margo
12. Sistan Basin

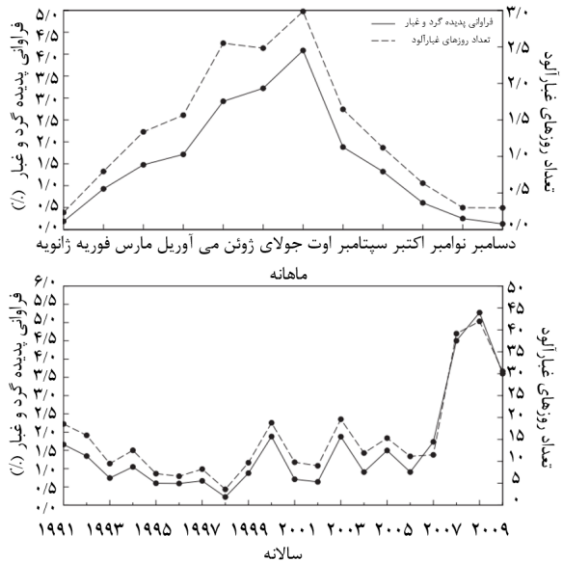
ریگستان [1] و شمال‌غربی بلوچستان است؛ مناطقی که باد ۱۲۰ روزه از اواسط ماه مه تا اواسط سپتامبر بر آن حاکم است [۲۳،۲۴].

شکل ۳ موقعیت ویژگی‌های توپوگرافی عمده ایران و منابع اصلی گرد و غبار آن در داخل و خارج کشور [۲۲]

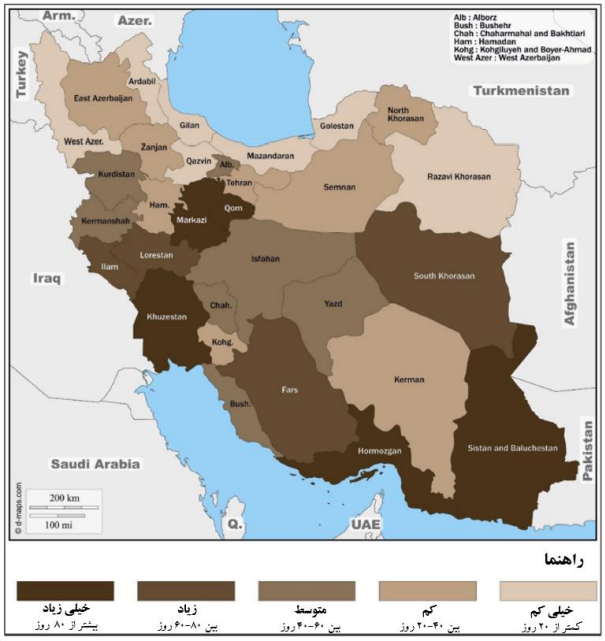


شکل ۴ فراوانی‌های (الف) شدید، (ب) متوسط، (ج) خفیف و (د) کل پدیده گرد و غبار در ایران [۲۲]

یکی دیگر از منابع فراوان گرد و غبار که توسط میدلتون در سال ۱۹۸۶ مشخص شد، کویر مکران [2] در امتداد دشت ساحلی دریای عمان است[۲۳]. جینوکس و همکاران نیز در سال ۲۰۱۲ منابع برجسته گرد و غبار را در امتداد دشت ساحلی خلیج‌فارس [3] و شش منبع داخلی دیگر از جمله ساحل جنوبی دریاچه ارومیه [4] در گوشه شمال‌غربی ایران، هامون مشکل [5]، دشت کویر، دشت لوت، دریاچه‌های فصلی در اطراف شهر زابل [6] در حوزه سیستان و بخشی از صحرای مکران در امتداد ساحل دریای عمان [7] شناسایی کردند [۲۶].



شکل ۵ (الف) تغییرات میانگین ماهانه و (ب) میانگین سالانه فراوانی پدیده گرد و غبار و میانگین روزهای غبارآلود در ایران [۲۲]



شکل ۶ نقشه استان‌های ایران بر اساس میانگین تعداد روزهای غبارآلود در طول یک‌سال [۲۷]

درویش و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ نشان دادند اثر آلودگی گرد و غبار به‌شدت به منطقه محلی که سامانه فتوولتاییک خورشیدی در آن نصب‌شده بستگی دارد [۲۸]. در محیط‌های شهری و سایر مناطق، انواع مختلفی از آلودگی از منابع متفاوتی منتشر می‌شود. به‌عنوان‌مثال، سنگ آهک از بارش کربنات کلسیم ($CaCO_3$) تشکیل‌می‌شود. خاکستر از اگزوز وسایل‌نقلیه منتشر می‌شود. خاک سرخ از بیابان‌های آفریقا منتقل می‌شود و کربن می‌تواند با سوزاندن ترکیبات آلی با اکسیژن ناکافی به‌دست آید و در همه مکان‌های صنعتی در سراسر جهان موجود است. تاثیر گرد و غبار در

1. Registan Desert
2. Makran Desert
3. Coastal plain of the Persian Gulf
4. Southern shore of Lake Urumia
5. Hamun-e Mashkel
6. Ephemeral lakes around the city of Zabol
7. Coast of the Oman Sea

مکان‌های مختلف جهان به‌طور معمول در فصل تابستان زمانی که مقدارهای زیادی از گرد و غبار و شن و ماسه بلند می‌شود و توسط بادهای خشک جدید حمل می‌شود، ظاهر می‌شود [۱۹]. براساس داده‌های به‌دست‌آمده از سوابق سه‌ساعته هواشناسی در طی یک دوره ۲۰ ساله از ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰ روی ۱۱۱ ایستگاه هواشناسی در سراسر ایران، علیزاده چوبری و همکاران میزان فراوانی پدیده گرد و غبار در ایران و نیز میانگین فراوانی پدیده گرد و غبار و تعداد روزهای غبارآلود ماهیانه و سالانه را ارائه کردند (شکل ۴ و شکل ۵) [۲۲]. غلامی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ میزان فراوانی گرد و غبار را به تفکیک استان‌های ایران نشان دادند (شکل ۶) [۲۷].

۴- خواص فیزیکی گرد و غبار

هنگامی‌که نور به یک‌ذره گرد و غبار روی یک سلول خورشیدی برخورد می‌کند، پراکنده یا جذب می‌شود که در نتیجه آن میزان دریافت نور توسط سلول خورشیدی کاهش می‌یابد [۲۹]. رنگ ذره‌های گرد و غبار نیز نقش عمده‌ای در میزان کاهش میزان انتقال پوشش شیشه و در نتیجه عملکرد سلول خورشیدی دارد [۳۰]. هم‌چنین نشست گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی منجر به تغییر ضریب انتقال حرارت از سطح آن و کاهش راندمان پنل نیز می‌گردد [۳۱].

۴-۱- نرخ نشست گرد و غبار

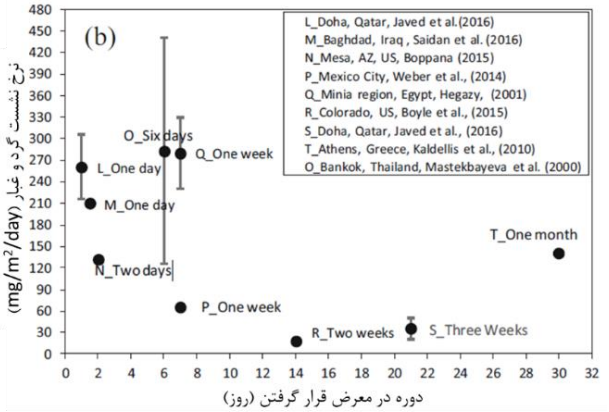
جاوید و همکاران در سال ۲۰۱۷ در شهر دوحه [1] نشان دادند که میزان نشست گرد و غبار با افزایش زمان در معرض قرار گرفتن، افزایش می‌یابد تا زمانی که به‌طور حدودی به مقدارهای ثابتی به‌دلیل قرار گرفتن در معرض مداوم گرد و غبار برای مدت طولانی برسد [۳۲]. یاسچور و همکاران در سال ۲۰۱۸ در پژوهشی به بررسی نرخ نشست گرد و غبار روی پنل فتوولتاییک خورشیدی، بر اساس طول دوره قرار گرفتن در معرض آن پرداختند و آثار پژوهشی پژوهشگران دیگر را در قالب نموداری به تصویر کشیدند (شکل ۷) [۳۳]. چنان‌چه مشاهده می‌شود نرخ نشست گرد و غبار به طول دوره در معرض گرد و غبار گرفتن پنل فتوولتاییک خورشیدی، محل و جنس گرد و غبار آن بستگی دارد.

۴-۲- میزان چسبندگی

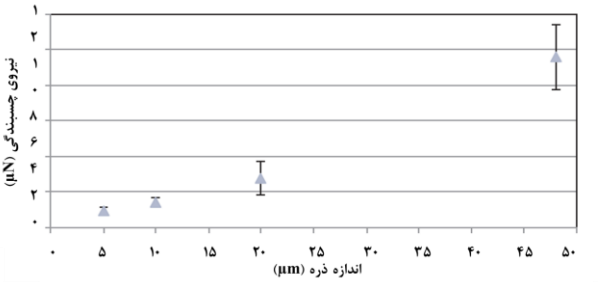
سَید [2] و همکاران در سال ۲۰۱۴ نشان دادند میان اندازه ذره‌ها و میزان رطوبت با میزان چسبندگی ذره‌های گرد و غبار رابطه‌ای وجود دارد. چنان‌چه در شکل ۸ و شکل ۹ مشاهده می‌گردد با افزایش اندازه ذره‌ها و میزان رطوبت، میزان چسبندگی ذره‌های گرد و غبار نیز افزایش می‌یابد [۳۴]. مهدی و همکاران در سال ۲۰۲۰ نیز اظهار داشتند که برای هرگونه گرد و غبار، هنگامی‌که میزان رطوبت و شاخص پلاستیکی زیاد باشد، مانند مورد گرد و غبار شهر بغداد، باعث چسبندگی بیش‌تر ذره‌های آن به سطح پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی می‌شود [۳۵].

۴-۳- غلظت

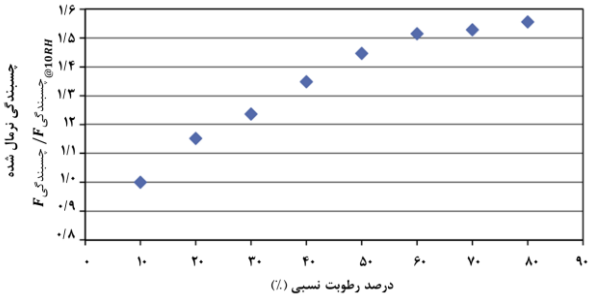
ژائو و همکاران در سال ۲۰۲۱ پژوهشی مروری ارائه کردند که در آن به بررسی اثر غلظت آلاینده‌های هوا بر تجمع آن روی پنل فتوولتاییک خورشیدی و افت عملکرد حاصل از آن پرداختند (جدول ۱) [۲۰].



شکل ۷ میزان تجمع گرد و غبار روی پنل فتوولتاییک خورشیدی در برابر دوره قرار گرفتن در معرض آن [۳۳]



شکل ۸ اثر اندازه ذره‌ها بر نیروی چسبندگی ذره‌های گرد و غبار [۳۴]



شکل ۹ اثر میزان رطوبت بر میزان چسبندگی ذره‌های گرد و غبار [۳۴]

جدول ۱ تاثیر غلظت آلاینده هوا بر تجمع گرد و غبار [۲۰]

پارامتر آلودگی‌هوا	نویسندگان	روش اصلی تحقیق (منطقه)	نتایج مهم تحقیق
غلظت آلاینده‌ها	چن و همکاران [۳۶]	روش تجربی (گوانگژو[3]، چین)	تجمع گرد و غبار در سطح پنل فتوولتاییک خورشیدی در هوای مه و بخار جدی‌تر است و تاثیر بیش‌تری بر عملکرد آن دارد.
	بویل و همکاران [۳۷]	روش تجربی (کلرادو[4]، ایالات‌متحده آمریکا)	مقدار نشست گرد و غبار در سطح پنل فتوولتاییک خورشیدی با افزایش غلظت PM10[5] افزایش می‌یابد.

1. Doha
2. Said

3. Guangzhou
4. Colorado
5. particulate matter

ویوار و همکاران [۳۸]	روش تجربی (مادرید[1] در اسپانیا و کانبرا[2] در استرالیا)	تجمع گرد و غبار به‌مدت چهار ماه می‌تواند راندمان تولید توان پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی را حدود ٪۲۶ کاهش دهد و اتلاف انرژی در مناطقی که غلظت آلودگی بیش‌تری دارند بیش‌تر است.
حسن و همکاران [۳۹]	روش تجربی (حلوان[3]، مصر)	تجمع گرد و غبار روی سطوح پنل تاثیر منفی در انتقال دارد. علاوه‌بر این، انتقال نور به مقدار نشست گرد و غبار بستگی دارد و با افزایش غلظت آلودگی، کاهش می‌یابد.

۴-۴- میزان رطوبت، وزن مخصوص و شاخص پلاستیکی

کاظم و چایچان در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۹ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نشست مصنوعی گرد و غبار را در محیط آزمایشگاه داخلی بررسی کردند. این پژوهش‌ها نشان داد که نمونه‌های گرد و غبار با بیش‌ترین میزان رطوبت، شاخص پلاستیکی و وزن مخصوص باعث بیش‌ترین تاثیر منفی بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی می‌شوند [۳۹،۴۰]. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مهدی و همکاران نشان داد که چگالی ویژه برای گرد و غبار شهرهای بغداد[4]، کربلا[5] و هیلا[6] به‌ترتیب ۲/۲۲، ۱/۲۹ و ۱/۷۰ است. هم‌چنین میزان رطوبت در شهرهای بغداد، کربلا و هیلا به‌ترتیب ۴۶ درصد، ۱۸/۸۹ درصد و ۳۲ درصد برای گرد و غبار بود. در مورد حد پلاستیک گرد و غبار، این مقدار برای گرد و غبار بغداد زیاد، برای گرد و غبار هیلا متوسط و برای گرد و غبار کربلا کم بود. کم‌ترین تاثیر در عملکرد پنل فتوولتاییک مربوط به گرد و غبار شهر کربلا بود که دارای رطوبت، شاخص پلاستیکی و چگالی کیفی کم‌تر از دو شهر دیگر است. هم‌چنین هنگامی‌که میزان رطوبت در نمونه گرد و غبار زیاد است، اندازه‌گیری‌ها نشان داد که گرد و غبار بیش‌تری نشست می‌کند و بر کارایی سلول‌های فتوولتاییک و نیاز به بهره‌گیری از روش‌های تمیزکاری گران تاثیر منفی می‌گذارد [۳۵].

۵- ترکیب شیمیایی گرد و غبار

برخی از خواص گرد و غبار مانند موارد قبلی به‌سادگی مشخص نمی‌شوند و لازم است برای تعیین آن‌ها به بررسی ترکیب شیمیایی گرد و غبار پرداخت. به‌عنوان‌مثال، برای شناسایی توزیع ذره‌ها (تشخیص یکنواختی یا غیر یکنواختی آن)، اندازه‌گیری قطر ذره‌ها و یافتن محدوده اندازه آن‌ها، مورفولوژی و شکل ذره‌ها از تست میکروسکوپ الکترونی روبشی[7] استفاده می‌شود. هم‌چنین برای تحلیل کمی و کیفی ترکیب شیمیایی ذره‌ها و نحوه توزیع فراوانی عناصر در آن‌ها، طیف‌سنجی و کانی‌شناسی از طریق تست پراش اشعه ایکس[8] یا تست فلورسانس اشعه ایکس[9] انجام می‌گیرد [۴۱،۴۲].

۵-۱- اندازه ذره‌ها

جدول ۲ تاثیر اندازه ذره‌ها بر تجمع گرد و غبار [۲۰]

ذره‌های آلاینده	نویسندگان	روش اصلی تحقیق (منطقه)	نتایج مهم تحقیق
اندازه ذره‌ها	لو و ژائو [۴۴]	شبیه‌سازی عددی (گوانگژو، چین)	هنگامی‌که اندازه ذره‌ها کم‌تر از ۵۰ µm باشد، مقدار تجمع گرد و غبار با اندازه ذره‌ها ارتباط مثبت دارد.
	گایر و پرز-دیویس [۴۵]	شبیه‌سازی عددی (مرکز پژوهش‌های ایمز ناسا[10])	تحت شرایط یکسان، میزان نشست ذره‌های ۳۰ µm در حدود ٪۲۰ بیش‌تر از ذره‌های بزرگ (<۷۵ µm) است.
	غوش و همکاران [۴۶]	روش تجربی (دهلی[11]، هند)	در یک مقدار یکسان تجمع گرد و غبار، ذره‌های کوچک مساحت بیش‌تری را نسبت به ذره‌های بزرگ را پوشش می‌دهند و بین غلظت تجمع گرد و غبار و اندازه ذره‌ها ارتباط منفی وجود دارد.
	الحسن [۴۷]	روش تجربی (شوایخ[12]، کویت)	اثر پوششی گرد و غبار با توزیع فشرده بیش‌تر از توزیع گسسته است. تحت یک مقدار یکسان نشست گرد و غبار، هر چه اندازه ذره‌ها کوچک‌تر باشد، منطقه سایه نیز به‌ترتیب بزرگ‌تر خواهد بود و این امر بر دریافت نور پنل فتوولتاییک خورشیدی تاثیر می‌گذارد.
	ژائو و همکاران [۴۸]	روش تجربی و شبیه‌سازی عددی (بادینگ[13]، چین)	اندازه ذره‌ها به‌طور قابل‌توجهی بر میزان تجمع گرد و غبار روی سطح پنل فتوولتاییک خورشیدی تاثیر می‌گذارد. افزایش اندازه ذره‌ها از ۱۰ µm به ۳۰ µm منجر به کاهش ۶/۱۷ گرم در مترمربع در نشست گرد و غبار می‌شود.
	گائو و همکاران [۴۹]	روش تجربی (چینگهای[14]، چین)	اندازه ذره‌ها نه‌تنها بر انباشت گرد و غبار و ناحیه نور گیر پنل فتوولتاییک خورشیدی تاثیر می‌گذارد بلکه بر نیروی ذره‌ها نیز تاثیر می‌گذارد و از این‌رو روی جمع شدن گرد و غبار نیز تاثیر می‌گذارد.

سیسودیا و ماتور در سال ۲۰۲۰ اظهار داشتند که ابعاد متفاوت ذره‌ها گرد و غبار می‌تواند برآمده از منابع مختلف گرد و غبار، مشخصات زمین‌شناسی، منابع آلاینده محلی (ترافیک، ساخت و ساز، صنعتی و...)، پارامترهای هواشناسی، کاربری زمین و الگوی پوشش زمین باشد [۴۲].

1. Madrid
2. Canberra
3. Helwan
4. Baghdad
5. Karbala
6. Hilla
7. Scanning electron microscope
8. X-ray diffraction (XRD)
9. X-Ray fluorescence (XRF)
10. NASA Ames Research Center
11. Delhi
12. Shuwaikh
13. Baoding
14. Qinghai

الشوبوکشی و حسین در سال ۱۹۹۳ با مطالعه بر توان تولیدی ناشی از نشست کربن، سیمان و سه نوع سنگ آهک نشان دادند که ذره‌های گرد و غبار کوچک‌تر می‌توانند بیش‌تر از ذره‌های درشت گرد و غبار، باعث کاهش عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی شوند [۱۴]. فونتوکیس و همکاران در سال ۲۰۱۸ پژوهشی در مورد تاثیر اندازه ذره‌های گرد و غبار روی سلول‌های فتوولتاییک خورشیدی نصب‌شده در دوحه، پایتخت قطر و تاثیر زمان در معرض قرار گرفتن روی آن‌ها را انجام دادند. نتیجه‌گیری از این پژوهش نشان داد که نشست ذره‌های کوچک باعث کاهش بیش‌تری در عملکرد سامانه نسبت به ذره‌های بزرگ می‌شود؛ حتی اگر از جرم یکسانی از گرد و غبار باشند، زیرا ذره‌های کوچک به‌طور منظم‌تری روی سطح سلول‌ها توزیع می‌شوند و در نتیجه مساحت سطح نسبت به ذره‌های درشت گسترده‌تر می‌شود. بنابراین اندازه، وزن و شکل ذره‌ها می‌تواند در میزان کاهش انتقال نور تاثیر بگذارد [۵۰]. آدگوزل و همکاران در سال ۲۰۱۹ تاثیر زغال‌سنگ بر میزان انتقال نور را گزارش دادند و نتایج نشان داد که هنگام بررسی ۱۵ گرم از ذره‌های زغال‌سنگ برای ذره‌های کوچک‌تر (۳۸ µm) ٪۶۲/۰۵ کاهش عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی و ذره‌های بزرگ‌تر ٪۲۸/۹۰ کاهش عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی (۵۰۰-۲۵۰ µm) نشان‌می‌دهد [۵۱]. تانساب و همکاران در سال ۲۰۱۵ نیز بیان کردند ذره‌های ریز گرد و غبار نسبت به ذره‌های درشت گرد و غبار چسبندگی بالاتری دارند و به آن‌ها امکان توزیع یکنواخت روی سطح پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی را می‌دهد که باعث پراکندگی نور بالاتر و انتقال کم‌تری می‌شود [۲۹]. ژائو و همکاران، مطابق جدول ۲، در سال ۲۰۲۱ پژوهشی مروری ارائه کردند که در آن به بررسی اثر اندازه ذره‌های گرد و غبار بر میزان نشست آن بر پنل فتوولتاییک خورشیدی پرداختند [۲۰].

۵-۲- میزان بار ذره‌ها

همچنین ژائو و همکاران در سال ۲۰۲۱ پژوهشی مروری ارائه کردند که در آن مطابق جدول ۳ به بررسی اثر بار ذره‌های گرد و غبار بر میزان نشست آن بر پنل فتوولتاییک خورشیدی پرداختند [۲۰].

۵-۳- شکل ذره‌ها

الشعبان و همکاران در سال ۲۰۱۶ و نیز پیکوتی و همکاران در سال ۲۰۱۸ با تجزیه و تحلیل مکانیسم تجمع گرد و غبار روی پنل فتوولتاییک خورشیدی خورشیدی نشان دادند که کاهش عملکرد پنل های خورشیدی با شکل، توزیع، اندازه، جهت‌گیری و مکانیزم نشست ذره‌های گرد و غبار روی سطح پنل در ارتباط است [۵۵،۵۶]. غلامی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ پژوهشی مروری ارائه کردند که مطابق جدول ۴ در آن به ویژگی‌های اندازه و مورفولوژی توزیع ذره‌ها در برخی از کشورهای دنیا پرداختند [۵۴].

۵-۴- جنس و توزیع عناصر ذره‌ها

الشوبوکشی و حسین در سال ۱۹۹۳ بیان کردند که سیمان با ذره‌های ریز (میانگین قطر ۱۰ µm) با نشست روی سلول‌های فتوولتاییک جریان اتصال کوتاه و قدرت خروجی را با سرعت بیش‌تری کاهش می‌دهد. این ذره‌های ریز توانایی پخش و پوشاندن یکنواخت سطح را دارند و از عبور مستقیم قسمت زیادی از نور به سلول جلوگیری می‌کنند. در میان گرد و غبارهای مختلف مورد استفاده در این تحقیق، ذره‌های کربن نشان دادند که دارای بدترین اثر کاهشی روی سلول‌های فتوولتاییک هستند. میانگین قطر ذره‌های کربن در حدود ۵ µm یافت شد و از این‌رو می‌تواند به‌عنوان یک گرد و غبار فوق‌العاده ریز در نظر گرفته شود. علاوه‌بر این، دوده و ذره‌های کربن به‌طور موثر تابش خورشید را جذب می‌کنند. این ویژگی‌ها با هم منجر به وخامت شدید عملکرد با نشست مقدار کمی از ذره‌های کربن می‌شوند [۱۴].

جدول ۳ تاثیر میزان بار ذره‌ها بر تجمع گرد و غبار [۲۰]

ذره‌های آلاینده	نویسندگان	روش اصلی تحقیق (منطقه)	نتایج مهم تحقیق
مقدار بار	دستوری و همکاران [۵۵]	روش تجربی (داندی[1]، انگلستان)	نشست ذره‌های باردار می‌تواند ولتاژ خروجی پنل فتوولتاییک خورشیدی را بیش از ٪۳۵ کاهش دهد و با افزایش مقدار بار ذره‌ها، میزان کاهش آن افزایش می‌یابد.
	سو و همکاران [۵۶]	روش تجربی (نیامی[2]، نیجر[3])	بعد از طوفان شن، ذره‌ها با قطر کوچک‌تر (<۱۰۰ µm) به‌طور عمده بار مثبت دارند، درحالی‌که ذره‌ها با قطر بزرگ‌تر بار منفی دارند.
	وی و همکاران [۵۷]	روش تجربی و شبیه‌سازی عددی (لانژو[4]، چین)	قطر بحرانی که ویژگی‌ها الکتریکی ذره‌های شن را تغییر می‌دهد حدود ۳۰۰ µm است. یعنی ذره‌ها در این قطر از نظر الکتریکی خنثی هستند و ذره‌های بزرگ‌تر از این مقدار بار منفی دارند و در غیر این صورت، آن‌ها بار مثبت دارند.
	گائو و ژانگ [۵۸]	روش تجربی (پکن[5]، چین)	هنگامی‌که اندازه ذره‌ها از ۰/۵ تا ۲/۵ µm متغیر باشد، مقدار بار ذره‌ها ($۱/۳\times۱۰^{-۱۸}$-$۱۰/۱\times۱۰^{-۱۶}$ کولن) با افزایش اندازه ذره‌ها، افزایش می‌یابد.

جدول ۴ ویژگی‌های اندازه و مورفولوژی توزیع ذره‌های گرد و غبار[۵۴]

محل جمع‌آوری گرد و غبار	ابعاد ذره‌ها (µm)	اطلاعات تکمیلی
کویت [۵۹]	۸-۴	عمده ذره‌های گرد و غبار در ابعاد سیلت (ابعاد بین ماسه و رس) ذره‌های کوچک‌تر از جنس سلیت و ذره‌های بزرگ‌تر از جنس کوارتز
ظهران[6]، عربستان [۲۹]	۱۷۶-۰/۵	شکل‌های مختلف و نامنظم، اما به‌طور کلی، متمایل به کروی‌شکل
بلژیک [۵۹،۶۰]	۱۰-۲	سایر نمونه‌های آزمایشی: سیمان ۱۰ µm، خاک رس ۶۸ µm و شن و ماسه سفید ۲۵۰ µm
الجزیره [۶۲]	۷۸۰-۹۵	شکل ذره‌ها نامنظم اما به‌طور تقریبی کروی
بانکوک[7]، تایلند [۶۳]	۷۸-۵۳	خاک رس نرم برای تهیه گرد و خاک مصنوعی
لیبی [۶۳،۶۴]	۱۰۰۰-۰/۵	اندازه ذره‌های گرد و غبار در ماه‌های مختلف

1. Dundee
2. Niamey
3. Niger
4. Lanzhou
5. Beijing
6. Dhahran
7. Bangkok

		متغیر	
عمان [۴۰]	۲-۶۳	متفاوت‌بودن پراکندگی گرد و غبار بر سطح از یک مکان به مکان دیگر	
قطر [۶۶]	میانگین ۲	وجود ذره‌های غیریکنواخت با ابعاد ۱۰ µm	

جدول ۵ توزیع ذره‌های گرد و غبار [۲۰]

ذره‌های آلاینده	نویسندگان	روش اصلی تحقیق (منطقه)	نتایج مهم تحقیق
توزیع ذره‌ها	سارور و همکاران [۶۷]	مرور	اثر نشست ذره‌ها بر توان خروجی پنل فتوولتاییک خورشیدی نیز تابعی از ترکیب شیمیایی آن است.
	المینیر و همکاران [۶۸]	روش تجربی (قاهره[1]، مصر)	ذره‌ها به‌طور عمده از کوارتز (SiO_2)، کلسیت ($CaCO_3$) و مقدار کمی دولومیت و مواد معدنی رس تشکیل شده‌اند. علاوه‌بر این، عناصر اصلی سیلیسیم و کلسیم هستند و عناصر جزئی آلومینیوم، آهن، منیزیم، پتاسیم و سدیم هستند.
	سَید و والویل [۳۴]	روش تجربی (ظهران، عربستان سعودی)	در میان ترکیبات شیمیایی ذره‌های آلاینده، بیش‌ترین غلظت ماده شیمیایی برای اکسیژن و پس از آن کلسیم، سیلیسیم، گوگرد و آهن است. در نتیجه ترکیبات کلسیت و کوارتز بیش از ٪۶۰ از ذره‌ها را تشکیل می‌دهند.
	کازمرسکی و همکاران [۶۹]	مرور	در مناطق بیابانی خاورمیانه، آفریقای شمالی و هند ذره‌های آلاینده در سطح پنل فتوولتاییک خورشیدی تحت تاثیر اکسیدهای سیلیسیم قرار دارند. در مقابل در اروپا، آمریکای جنوبی، آمریکای شمالی و آسیا آن‌ها به‌طور معمول از خاک، مواد آلی و مواد معدنی تشکیل شده‌اند.
	جیانگ و همکاران [۷۰]	روش تجربی (هنگ‌کنگ[2]، چین)	(SiO_2 (۶۸٪–۷۶٪ و Al_2O_3 (۱۰٪–۱۵٪) اجزای اصلی شیمیایی ذره‌های آلاینده هستند.
	غلامی و همکاران [۷۱]	روش تجربی (تهران، ایران)	اجزای اصلی ذره‌های آلاینده (SiO_2 (۵۰/۲۶٪ و CaO (۲۷/۳۱٪ هستند.

جدول ۶ اثر جنس ذره‌های گرد و غبار بر عملکرد پنل فتوولتاییک خورشیدی [۲۰]

پارامتر آلودگی‌هوا	نویسندگان	روش اصلی تحقیق (منطقه)	نتایج مهم تحقیق
جنس ذره‌ها	کالدلیس و کاپسالی [۷۲]	روش تجربی (آتن[3]، یونان)	در یک شرایط یکسان، نشست ذره‌ها منجر به کاهش توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی می‌شود و این کاهش با مقدار نشست ارتباط مثبت دارد. در میان آن‌ها، تاثیر خاک سرخ بیش‌ترین و پس از آن سنگ آهک است، درحالی‌که ذره‌های خاکستر بادی کم‌ترین اثر را دارد.
	الشوبوکشی و حسین [۱۴]	روش تجربی (ریاض[4]، عربستان سعودی)	در مقایسه با ذره‌های درشت مانند سنگ آهک و سیمان، ذره‌های کربن دارای قطر کوچک‌تر و توانایی پوشش قوی‌تر هستند، بنابراین نشست آن‌ها باعث اتلاف انرژی پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی بیش‌تر می‌شود.
	درویش و همکاران [۷۳]	روش تجربی (وادی آل هلو[5]، امارات‌متحده عربی)	شش آلاینده‌ای که بیش‌ترین تاثیر را در توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی دارند، سنگ آهک، خاکستر پرواز، خاک قرمز، کربنات کلسیم، سیلیس و ماسه می‌باشد.
	خطیب و همکاران [۷۴]	روش تجربی (سوهار[6]، عمان)	در مقایسه با آلاینده‌هایی مانند خاک قرمز، شن و ماسه، کربنات کلسیم و دی‌اکسید سیلیسیم، خاکستر بادی تا حد زیادی بر ولتاژ خروجی پنل فتوولتاییک خورشیدی تاثیر می‌گذارد و آن را تا ٪۲۵ کاهش می‌یابد.

جاوید و همکاران در سال ۲۰۱۷ در شهر دوحه نشان دادند که کلسیم فراوان‌ترین عنصر است و پس از آن سیلیکون، آهن، منیزیم، آلومینیوم و گچ قرار دارد[۳۲] . کاظم و همکاران در سال ۲۰۱۳ در یک مطالعه تجربی در مورد تاثیر خاکستر، شن و ماسه، کربنات‌های کلسیم، خاک قرمز و سیلیس بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی چندکریستالی نشان دادند که خاکستر حدود ٪۲۵ از کاهش ولتاژ پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی را تشکیل می‌دهد و در مقایسه با نمونه‌های دیگر تاثیر منفی بیش‌تری دارد [۴۱]. کالدلیس و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی تاثیر انواع مختلف گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی ناشی از خاک قرمز، سنگ آهک و خاکستر بادی پرداختند. نتایج ارائه‌شده نشان داد که خاک قرمز بیش‌ترین کاهش عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی را به‌دنبال دارد و پس از آن سنگ آهک و خاکستر بادی است [۷۵]. الناصر و همکاران در سال ۲۰۲۰ تاثیر نشست گرد و غبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که ۱۰۰ گرم در متر مربع شن، سیمان معمولی، سیمان تخم‌مرغ، گچ یا گچ صنعتی به‌ترتیب ٪۱۲، ٪۱۴، ٪۱۵، ٪۹ و ٪۱۰ کاهش عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی ایجاد می‌کنند [۷۶]. ایلز و

1. Cairo
2. Hong Kong
3. Athens
4. Riyadh
5. Wadi Al Helo
6. Sohar

همکاران در سال ۲۰۱۸ اظهار داشتند که ترکیب معدنی گرد و غبار وقتی روی پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی نشست می‌کند، تاثیر زیادی بر رفتار انتقال نوری دارد [۲۱]. ژائو و همکاران در سال ۲۰۲۱ پژوهشی مروری ارائه کردند که در آن مطابق جدول ۵ به بررسی توزیع ذره‌های گرد و غبار بر اساس جنس پرداختند [۲۰]. هم‌چنین آن‌ها به بررسی اثر جنس ذره‌های گرد و غبار بر تجمع آن روی پنل فتوولتاییک خورشیدی و افت عملکرد حاصل از آن نیز پرداختند که در جدول ۶ نشان داده شده است.[۲۰].

۶- نتیجه‌گیری

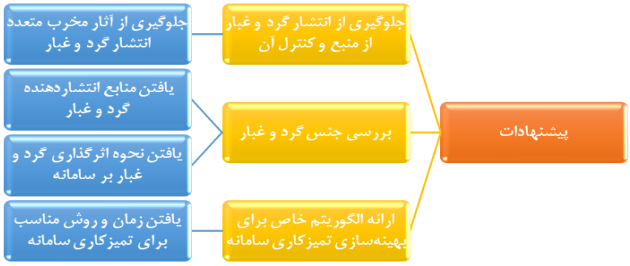
امروزه با توجه به تقاضای روزافزون انرژی و مشکل‌های انرژی‌های تجدیدناپذیر، بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر روبه‌رشد است. در این میان در کشوری هم‌چون ایران با پتانسیل تابشی بالاتر از میانگین جهانی بهره‌گیری از انرژی خورشیدی در میان سایر انرژی‌های تجدیدپذیر در اولویت است. در مناطقی که درگیر پدیده گرد و غبار هستند، یکی از چالش‌های اساسی کاهش عملکرد پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی در اثر تجمع گرد و غبار است. گرچه با پیشرفت فن‌آوری فتوولتاییک، پژوهش‌ها در این زمینه نیز افزایش یافته‌است اما با این حال نیاز به پژوهش‌های تکمیلی کاملا محسوس است. به‌خصوص در کشور ایران که مسئله‌ی اثرگذاری گرد و غبار بر عملکرد پنل فتوولتاییک خورشیدی کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌است. از این رو در مطالعه حاضر مروری بر مهم‌ترین پژوهش‌های این حوزه انجام گرفت تا ابعاد مسئله و میزان اثرگذاری خواص گرد و غبار بر عملکرد پنل فتوولتاییک خورشیدی مشخص گردد.

پس از بررسی روند رشد پژوهش‌ها و ارائه پیشینه مختصری از این موضوع در ابتدا به دسته‌بندی ویژگی‌های گرد و غبار پرداخته شد. پس از آن منابع گرد و غبار از جمله کشور ایران بررسی گردید. مشخص شد که علاوه‌بر منابع داخلی گرد و غبار از جمله دشت لوت و دشت کویر نه‌تنها منابع گرد و غبار دیگری در داخل کشور وجود دارند، بلکه منابع خارجی متعددی نیز وجود دارند. مرز شرقی به‌طور عمده تحت تاثیر کشورهای افغانستان و پاکستان، مرز غربی نیز به‌طور عمده تحت تاثیر کشورهای عراق و سوریه و هم‌چنین حاشیه خلیج‌فارس نیز به‌طور عمده تحت تاثیر شبه‌جزیره عربی قرار دارند و از مناطق مستعد پدیده گرد و غبار هستند. پس از آن هم به میزان فراوانی پدیده گرد و غبار و تعداد روزهای غبارآلود به‌صورت سالانه و ماهانه پرداخته شد. بر این مبنا می‌توان برای جلوگیری از تاثیرات مخرب گرد و غبار هم بر محیط‌زیست، هم بر سلامت انسان و هم بر عملکرد سامانه‌هایی هم‌چون سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی پیشنهاد می‌شود راه‌کارهای محدود کردن منابع گرد و غبار مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند و اجرایی شوند.

در بخش بعدی خواص فیزیکی گرد و غبار بررسی شد. بررسی پژوهش ها نشان داد که مهم ترین پارامترهای فیزیکی شامل رنگ، دما، نرخ نشست گرد و غبار، میزان چسبندگی، غلظت، میزان رطوبت، وزن مخصوص و شاخص پلاستیکی گرد و غبار هستند که مورد بررسی قرار گرفتند. مشخص شد که هر یک از آن‌ها به‌نحوی می‌توانند اثر قابل‌توجهی بر عملکرد پنل فتوولتاییک خورشیدی داشته‌باشند. در ادامه نیز با بررسی ترکیب شیمیایی گرد و غبار، ویژگی‌هایی از جمله اندازه، میزان بار، شکل، جنس و نحوه توزیع ذره‌های گرد و غبار به عنوان پارامترهای مهم شیمیایی شناسایی شدند. در این بخش نیز به بررسی تک‌تک این پارامترها پرداخته‌شد و مشخص شد که مشابه بخش قبلی هریک از این موارد نیز بر عملکرد پنل فتوولتاییک خورشیدی تاثیرگذارند.

ویژگی‌های گرد و غبار در مناطق یا زمان‌های مختلف، متفاوت هستند و بر تعیین روش و زمان بهینه تمیزکاری موثرند. از آن‌جا که کنترل ویژگی‌های گرد و غبار در شرایط محیطی به‌راحتی امکان‌پذیر نیست لازم است تا امکان سازگاری با شرایط و توسعه پایدار سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی فراهم‌شود. در این راستا انجام پژوهش‌هایی در این زمینه برای منطقه مدنظر ضرورت می‌یابد. این در حالی است که پژوهش‌های تجربی و نظری انجام شده در این زمینه در ایران به بررسی اثر گرد و غبار و نه ویژگی‌های گرد و غبار بر عملکرد پنل فتوولتاییک خورشیدی پرداخته‌اند. بنابراین لازم است مطالعات جامعی در این زمینه در ایران برای دیدن اثر این ویژگی ها به صورت جزیی‌تر انجام شوند. در این میان انجام پژوهش‌های تکمیلی در این زمینه با توجه به جنس گرد و غبار غالب در مناطق مختلف ایران نسبت به سایر ویژگی‌ها در اولویت قرار دارد. در آینده با در دست داشتن نتایج چنین مطالعاتی در ایران می‌توان موارد زیر را محقق نمود.

- یافتن مناطق مناسب برای احداث سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی



شکل ۱۰ پیشنهادات برای کارهای آینده

- یافتن زمان و روش مناسب و حتی بهینه برای تمیزکاری سامانه فتوولتاییک خورشیدی
- جلوگیری از کاهش عمر سامانه فتوولتاییک خورشیدی تا حد امکان
- امکان حفظ کردن خروجی مطلوب سامانه خورشیدی در طول عمر مفید خود

خلاصه‌ای از پیشنهادات مطرح‌شده برای انجام مطالعات تکمیلی در آینده در شکل ۱۰ آمده‌است.

۷- مراجع

[1] E. Rosenberg, A. Lind, and K. A. Espegren, The impact of future energy demand on renewable energy production - Case of Norway, *Energy*, Vol. 61, pp. 419–431, 2013.

[2] Z. Tasneem *et al.*, An analytical review on the evaluation of wind resource and wind turbine for urban application: Prospect and challenges, *Developments in the Built Environment*, Vol. 4, p. 100033, 2020.

[3] 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 Journal of Photovoltaics*, Vol. 10, No. 3, pp. 824–837, 2020.

[4] V. Gupta, M. Sharma, R. K. Pachauri, and K. N. Dinesh Babu, Comprehensive review on effect of dust on solar photovoltaic system and mitigation techniques, *Solar Energy*, Vol. 191, No. May, pp. 596–622, 2019.

[5] A. K.R, H. Ajimotokan, and W. Raji, Global Warming and Environmental Change Problems: Renewable Energy and Cleaner Fossil Fuels Technology as a Solution, *Proceedings of 10th International Conference on Clean Energy (ICCE-2010), Famagusta, N. Cyprus.*, 2010.

[6] A. G. Chmielewski, Enviromental effects of fossil fuels, *An End to Global Warming*, No. January 2005, pp. 1–31, 2014.

[7] E. Akyuz, Advantages and Disadvantages of Nuclear Energy in Turkey: Public Perception, *Eurasian Journal of Environmental Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–11, 2017.

[8] C. J. Axon and R. C. Darton, Sustainability and risk – a review of energy security, *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 27, pp. 1195–1204, 2021.

[9] A. Gholami, A. Saboonchi, A. A. Alemrajabi, and A., Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications, *Renewable Energy*, Vol. 112, pp. 466–473, 2017.

[10] S. C. S. Costa, A. S. A. C. Diniz, and L. L. Kazmerski, Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: Literature review update for 2012-2015, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 63, pp. 33–61, 2016.

[11] M. Rajaee and K. Challasi, Experimental study of the effect of dust and sandon photovoltaic modules, *Journal of Environmental Science and Technology*, 2020.
[12] M. Rezvani, A. Gholami, M. Zandi, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, and M. Zandi, A review of the factors affecting the utilization of solar photovoltaic panels, in *Research, Invention and Innovation Congress*, 2022, pp. 62–69.
[13] Scopous, Accessed 1 January 2021; https://www.scopus.com/.
[14] M. S. El-Shobokshy and F. M. Hussein, Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells, *Solar Energy*, Vol. 51, No. 6, pp. 505–511, 1993.
[15] B. Nimmo and S. A. M. Said, EFFECTS OF DUST ON THE PERFORMANCE OF THERMAL AND PHOTOVOLTAIC FLAT PLATE COLLECTORS IN SAUDI ARABIA: PRELIMINARY RESULTS., *Alternative Energy Sources: Proceedings of the Miami International Congress on Energy and the Environment*, Vol. 1, pp. 145–152, 1979.
[16] A. G. H. Dietz, Introduction to the Utilization of Solar Energy, *Diathermassous material and properties of materials*, 1963.
[17] J. A. D. Deceased and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, Vol. 3, No. 3, 1974.
[18] M. S. El-Shobokshy, A. Mujahid, and A. K. M. Zakzouk, Effects of Dust on the Performance of Concentrator Photovoltaic Cells., *IEE Proceedings I: Solid State and Electron Devices*, Vol. 132, No. 1 pt 1, pp. 5–8, 1985.
[19] Z. A. Darwish, K. B. Sopian, and A. Fudholi, Reduced output of photovoltaic modules due to different types of dust particles, *J. Cleaner Prod.*, Vol. 280, p. 124317, 2021.
[20] W. Zhao, Y. Lv, Z. Wei, W. Yan, and Q. Zhou, Review on dust deposition and cleaning methods for solar PV modules, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 13, No. 3, p. 032701, 2021.
[21] K. K. Ilse, B. W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, and J. Bagdahn, Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 98, No. September, pp. 239–254, 2018.
[22] O. Alizadeh-Choobari, P. Ghafarian, and E. Owlad, Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations, *International Journal of Climatology*, Vol. 36, No. 4, pp. 2050–2062, 2016.
[23] N. J. Middleton, A geography of dust storms in South-West Asia, *Journal of Climatology*, Vol. 6, No. 2, pp. 183–196, 1986.
[24] O. Alizadeh Choobari, P. Zawar-Reza, and A. Sturman, Low level jet intensification by mineral dust aerosols, *Annales Geophysicae*, Vol. 31, No. 4, pp. 625–632, 2013.
[25] O. Alizadeh-Choobari, P. Zawar-Reza, and A. Sturman, The “wind of 120days” and dust storm activity over the Sistan Basin, *Atmospheric Research*, Vol. 143, pp. 328–341, 2014.
[26] P. Ginoux, J. M. Prospero, T. E. Gill, N. C. Hsu, and M. Zhao, Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products, *Reviews of Geophysics*, Vol. 50, No. 3, 2012.
[27] 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, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 42, No. October, p. 100877, 2020.
[28] Z. A. Darwish, H. A. Kazem, K. Sopian, M. A. Al-Goul, and H. Alawadhi, Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 735–744, 2015.
[29] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, T. Urmee, and T. Pryor, The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone, *Solar Energy*, Vol. 120, pp. 147–157, 2015.
[30] 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, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 743–760, 2018.
[31] A. Gholami, S. Eslami, A. Tajik, M. Ameri, R. Gavagsaz Ghoachani, and M. Zandi, A review of the effect of dust on the performance of photovoltaic panels, *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Vol. 8, No. 1, 2019.
[32] W. Javed, B. Guo, and B. Figgis, Modeling of photovoltaic soiling loss as a function of environmental variables, *Solar Energy*, Vol. 157, No. May, pp. 397–407, 2017.
[33] M. Jaszczur *et al.*, The field experiments and model of the natural dust deposition effects on photovoltaic module efficiency, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, No. 9, pp. 8402–8417, 2019.
[34] S. A. M. Said and H. M. Walwil, Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance, *Solar Energy*, Vol. 107, No. January, pp. 328–337, 2014.
[35] A. M. J. Mahdy, S. I. Ibrahim, D. S. M. Al-Zubidi, A. J. Ali, M. T. Chaichan, and H. A. Kazem, The influence of dust physical specifications photovoltaic modules performance, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 928, No. 2, 2020.
[36] J. Chen, H. Shen, J. Li, and Z. Yang, The effects of air cleanliness on the PV system in Guangzhou, *Taiyangneng Xuebao/Acta Energiae Solaris Sinica*, Vol. 32, No. 4, pp. 481–485, 2011.
[37] L. Boyle, H. Flinchpaugh, and M. Hannigan, Ambient airborne particle concentration and soiling of PV cover plates, in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 3171–3173.
[38] M. Vivar, R. Herrero, I. Antón, F. M. Moreno, G. Sala, and A. W. Blakers, Effect of soiling in CPV systems, *Sol. Energy*, Vol. 84, No. 7, p. 1327, 2010.
[39] A. H. Hassan, U. A. Rahoma, and H. K. Elminir, Effect of airborne dust concentration on the performance of PV modules, *J. Astron. Soc. Egypt*, Vol. 13, No. 1, p. 24, 2005.
[40] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, Experimental analysis of the effect of dust’s physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman, *Solar Energy*, Vol. 139, pp. 68–80, 2016.
[41] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, The effect of dust accumulation and cleaning methods on PV panels’ outcomes based on an experimental study of six locations in Northern Oman, *Solar Energy*, Vol. 187, No. January, pp. 30–38, 2019.
[42] A. K. Sisodia, Performance Analysis of Photovoltaic Module by Dust Deposition in Western Rajasthan, *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 13, No. 08, pp. 921–933, 2020.
[43] Z. A. Darwish, K. B. Sopian, and A. Fudholi, Reduced output of photovoltaic modules due to different types of dust particles, *J. Cleaner Prod.*, Vol. 280, p. 124317, 2020.
[44] H. Lu and W. Zhao, Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system, *Appl. Energy*, Vol. 220, p. 514, 2018.
[45] 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.
[46] S. Ghosh, V. K. Yadav, and V. Mukherjee, Evaluation of cumulative impact of partial shading and aerosols on different PV array topologies through combined Shannon’s entropy and DEA, *Energy*, Vol. 144, p. 765, 2018.
[47] A. Y. Al-Hasan, A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface, *Solar Energy*, Vol. 63, No. 5, pp. 323–333, 1998.
[48] W. P. Zhao, Y. K. Lv, Q. W. Zhou, and W. P. Yan, Investigation on particle deposition criterion and dust accumulation impact on solar PV module performance, *Energy*, Vol. 233, p. 121240, 2021.
[49] D. D. Gao, G. H. Meng, and S. Wang, Characteristics of dust particle on solar panel surface in desert area, *Renewable Energy Res.*, Vol. 33, No. 11, p. 1597, 2015.
[50] C. Fountoukis, B. Figgis, L. Ackermann, and M. A. Ayoub, Effects of atmospheric dust deposition on solar PV energy production in a desert environment, *Solar Energy*, Vol. 164, No. July 2017, pp. 94–100, 2018.
[51] E. Adıgüzel, E. Özer, A. Akgündoğdu, and A. Ersoy Yılmaz, Prediction of dust particle size effect on efficiency of photovoltaic modules with ANFIS: An experimental study in Aegean region, Turkey, *Solar Energy*, Vol. 177, No. December 2018, pp. 690–702, 2019.
[52] G. Al-shabaan, W. Al-sawalmeh, and M. Al-shaweesh, Effects of Dust Grain Size and Density on the Monocrystalline PV Output Power, *International Journal of Applied Science and Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–86, 2016.
[53] G. Picotti, P. Borghesani, M. E. Cholette, and G. Manzolini,

Soiling of solar collectors – Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, No. February, pp. 2343–2357, 2018.
[54] A. GHOLAMI, S. H. ESLAMI, A. TAJIK, M. AMERI, R. Gavagsaz Ghoachani, and M. ZANDI, A REVIEW OF DUST REMOVAL METHODS FROM THE SURFACE OF PHOTOVOLTAIC PANELS, *MECHANICAL ENGINEERING SHARIF (SHARIF: MECHANICAL ENGINEERING)*, Vol. 35–3, No. 2 #HD00117, pp. 117–127, 2019.
[55] K. Dastoori, G. Al-Shabaan, and M. Kolhe, Impact of accumulated dust particles' charge on the photovoltaic module performance, *J. Electrost.*, Vol. 79, p. 20, 2016.
[56] M. Sow, E. Crase, J. L. Rajot, R. M. Sankaran, and D. J. Lacks, Electrification of particles in dust storms: Field measurements during the monsoon period in Niger, *Atmos. Res.*, Vol. 102, No. 3, p. 343, 2011.
[57] W. Wei, L. Y. Lu, and Z. L. Gu, Modeling and simulation of electrification of wind-blown-sand two-phase flow, *Acta Phys. Sin.*, Vol. 61, No. 15, p. 158301, 2012.
[58] J. C. Gao and J. Zhang, The effect of electrical charged dust particles on electric contact and the measurement of electrical charge, *Electron. Compon. Mater.*, Vol. 22, No. 10, p. 49, 2003.
[59] T. R. B. and R. G. H. Qasem*, EFFECT OF SHADING CAUSED BY DUST ON CADMIUM TELLURIDE\nPHOTOVOLTAIC MODULEL, 2011.
[60] R. Appels *et al.*, Effect of soiling on photovoltaic modules, *Solar Energy*, Vol. 96, pp. 283–291, 2013.
[61] 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.
[62] N. Bouaouadja, S. Bouzid, M. Hamidouche, C. Bousbaa, and M. Madjoubi, Effects of sandblasting on the efficiencies of solar panels, *Applied Energy*, Vol. 65, No. 1–4, pp. 99–105, 2000.
[63] G. A. Mastekbayeva and S. Kumar, Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate, *Solar Energy*, Vol. 68, No. 2, pp. 135–141, 2000.
[64] S. L. O'Hara, M. L. Clarke, and M. S. Elatrash, Field measurements of desert dust deposition in Libya, *Atmospheric Environment*, Vol. 40, No. 21, pp. 3881–3897, 2006.
[65] 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, p. 11030, 2012.
[66] J. Wang, H. Gong, and Z. Zou, Modeling of Dust Deposition Affecting Transmittance of PV Modules, *Journal of Clean Energy Technologies*, Vol. 5, No. 3, pp. 217–221, 2017.
[67] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, L. L. Kazmerski, and K. L. L., A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, Vol. 22, p. 698, 2013.
[68] H. K. Elminir, A. E. Ghitas, R. H. Hamid, F. E. Hussainy, M. M. Beheary, and K. M. Abdel-Moneim, Effect of dust on the transparent cover of solar collectors, *Energy Convers. Manage.*, Vol. 47, No. 18–19, p. 3192, 2006.
[69] L. L. Kazmerski, A. S. A. C. Diniz, and C. B. Maia, Fundamental studies of adhesion of dust to PV module surfaces: Chemical and physical relationships at the microscale, *IEEE J. Photovoltaics*, Vol. 6, No. 3, p. 719, 2016.
[70] H. Jiang, L. Lu, and K. Sun, Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules, *Atmospheric Environment*, Vol. 45, No. 25, pp. 4299–4304, 2011.
[71] A. Gholami, I. Khazaee, S. Eslami, M. Zandi, and E. Akrami, Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance, *Sol. Energy*, Vol. 159, p. 346, 2018.
[72] J. K. Kaldellis and M. Kapsali, Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements, *Energy*, Vol. 36, No. 8, pp. 5154–5161, 2011.
[73] Z. A. Darwish, H. A. Kazem, K. Sopian, M. A. Al-Goul, and H. Alawadhi, Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41, pp. 735–744, 2015.
[74] H. A. Kazem, T. Khatib, K. Sopian, F. Buttinger, W. Elmenreich, and A. S. Albusaidi, Effect of dust deposition on the performance of multi-crystalline photovoltaic modules based on experimental measurements, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 850–853, 2013.
[75] J. K. Kaldellis, P. Fragos, and M. Kapsali, Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 10, pp. 2717–2724, 2011.
[76] T. M. A. Alnasser, A. M. J. Mahdy, K. I. Abass, M. T. Chaichan, and H. A. Kazem, Impact of dust ingredient on photovoltaic performance: An experimental study, *Solar Energy*, Vol. 195, No. December 2019, pp. 651–659, 2020.