



بررسی تجربی اثر رسوب آلودگی بر روی پنل های فتوولتاییک در فضای باز

معراج رجائی^{۱*}، کردستان چلاسی^۲

۱-استادیار دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر دانشکده شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

۲- دانشجوی دپارتمان مهندسی برق دانشکده شریعتی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

* تهران، ۱۴۳۵۷۶۱۱۳۷، mrajaee@tvu.ac.ir

چکیده

برنامه‌ریزی جهت بهره برداری بهینه از انرژی خورشیدی نیازمند ارزیابی سیستم‌های خورشیدی مخصوصاً سیستم‌های فتوولتاییک در شهرهای مختلف کشور می‌باشد. سلول‌های فتوولتاییک تحت تأثیر عواملی از قبیل درجه حرارت بالا، نشست گردوغبار، اتلافات الکتریکی و طوفان‌های شدید می‌باشند. وجود ریز گردها در آسمان ایران باعث رسوب گرد و غبار بر سطح پنل‌های فتوولتاییک می‌شود و راندمان پنل‌های فتوولتاییک را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش به عوامل طبیعی موثر بر عملکرد پنل‌های فتوولتاییک که عبارتند از شدت تابش نور خورشید، دما، رطوبت، جریان باد، برف و گردوغبار اشاره شده است. همچنین جهت تمیز کردن پنل‌های خورشیدی از هر نوع آلودگی، به چند نوع سیستم تمیز کننده خودکار اشاره شده است. آزمایشات تجربی جهت ارزیابی تأثیر گردوغبار بر پارامترهای مهم پنل فتوولتاییک در فضای باز انجام شدند. نشست گردوغبار بر سطح پنل موجب کاهش ۳٪ ولتاژ، ۴۲٪ جریان، ۴۶٪ توان و افزایش ۳٪ دما پنل آلوده نسبت به پنل تمیز گردید. مقایسه‌ای بین پنل تمیز با پنل‌های آلوده به گردو غبار و شن و ماسه انجام گرفت. در نتیجه آن، میزان ولتاژ و جریان مربوط به پنل با $10 \frac{gr}{m^2}$ شن و ماسه به ترتیب ۲٪ و ۴٪ کاهش بیشتری نسبت به ولتاژ و جریان پنل با $10 \frac{gr}{m^2}$ گردو غبار داشته است. برای کاهش اثرات آلودگی و افزایش بازده باید پنل‌های فتوولتاییک به طور مرتب با استفاده از سیستم‌های تمیز کننده که نیاز به آب و نیروی انسانی را به حداقل برساند تمیز شوند.

کلیدواژه‌گان: پنل خورشیدی، گردوغبار، شن، سیستم تمیز کننده.

Experimental study of the effect of pollution deposit on photovoltaic panels in open space

Meraj rajaei^{1*}, Kourdistan challasi²

1- Department of Electrical and computer Engineering, Faculty of Shariaty, Tehran Branch, Technical and vocational University, Tehran

2- Department of Electronic Engineering, Faculty of Shariaty, Tehran

* P.O.B. 1435761137, Tehran, Iran, mrajaee@tvu.ac.ir

Received: 07 October 2019

Accepted: 02 March 2020

Abstract

Planning for optimal utilization of solar energy requires evaluation of solar systems, especially photovoltaic systems in different cities of the country. Photovoltaic cells are affected by factors such as high temperature, dust deposition, electrical losses and severe storms. The presence of dust in the sky of Iran causes dust deposition on the surface of the photovoltaic panels and greatly affects the efficiency of photovoltaic panels. In this study, natural factors affecting the performance of photovoltaic panels such as the intensity of sunlight, temperature, humidity, wind current, snow and dust are mentioned. Also, several types of automatic cleaning systems are mentioned to clean the solar panels from any contamination. Experimental tests were conducted outdoors to evaluate the effect of dust on the important parameters of the photovoltaic panel. Dust deposition on the panel surface caused 3% decrease in voltage, 42% decrease in current, 46% decrease in power and 3% increase in the temperature of the contaminated panel compared to the clean panel. Comparisons between clean panel and panels contaminated with dust and sand were made. As a result, the voltage and current of the panel with $10 \frac{gr}{m^2}$ of sand decreased 2% and 4% more than the voltage and current of the panel with $10 \frac{gr}{m^2}$ of dust. Photovoltaic panels should be cleaned regularly using cleaner systems that minimize the need for water and manpower to reduce the effects of pollution and increase the efficiency.

Keywords: Solar Panel, dust, sand, Cleaning System



۱- مقدمه

با افزایش تقاضا برای استفاده از یک منبع انرژی پاک و پتانسیل خورشید به عنوان یک منبع انرژی رایگان، تبدیل انرژی خورشیدی به عنوان بخشی از مخلوط منابع انرژی تجدید پذیر به طور فزاینده‌ای مهم است.

کشورمان ایران در نواحی پرتابش واقع است، مطالعات نشان می‌دهد استفاده از تجهیزات خورشیدی در ایران مناسب است. اما از جهتی موقعیت جغرافیایی ایران به گونه‌ای است که در بیشتر شهرهای کشور، تمرکز نسبتا بالایی از گردوغبار در جو وجود دارد. همچنین بیش از ۳۰٪ از مساحت ایران را مناطق خشک و نیمه خشک در بر می‌گیرد [۱]. جنوب شرق ایران به عنوان یکی از مناطق اصلی گردوغبار در جهان شناخته می‌شود [۲]. شکل ۱، ریزگردهای موجود در آسمان ایران را نشان می‌دهد.



شکل ۱ ریزگردهای موجود در آسمان ایران

همین مسئله باعث نشست مقدار زیادی گردوغبار بر سطح پنل‌های فتولتاییک می‌شود در نتیجه کارایی پنل خورشیدی به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. گرد و غبار با چگالی $10 \frac{gr}{m^3}$ می‌تواند حداکثر توان فتولتاییک را تا حدود ۳۴٪ کاهش دهد [۳]. تولید برق در پنل آلوده بعد از ۵۵ روز ۹٪ کاهش داشته است [۴]. در شهر بغداد عملکرد پنل‌های فتولتاییک ناشی از تجمع گرد و غبار روی سطح آن‌ها که تحت شرایط نوردی طبیعی بودند، کاهش ۶٫۲۴٪، ۱۱٫۸٪، ۱۸٫۷۴٪، روزانه، هفتگی و ماهانه را دارا بوده است [۵]. مطالعه تطبیقی سه سیستم فتولتاییک یکسان در یک پارک تجاری در لس آنجلس نشان داد که تلفات سیستم سالانه به علت آلودگی گرد و غبار به ۵٪ رسید [۶]. برای کاهش این اثرات، پنل‌های فتولتاییک باید به صورت دوره‌ای، معمولا با آب تمیز شوند. به خاطر کمبود آب در برخی از جاها، تمیز کردن سخت، چالش برانگیز و متعاقبا پرهزینه است. بنابراین بیشتر تلاش‌ها در این جهت است که از مکانیزم‌های تمیزکننده خودکار استفاده شود، به طوری که نیاز به آب و نیروی انسانی را به حداقل برساند. با استفاده از تمیزکننده الکترواستاتیکی با اعمال ولتاژ ۹۷ و فرکانس ۰٫۱ kHz از $100 \frac{gr}{m^3}$ گردوغبار حدود ۷۰٪ آلودگی از روی پنل پاک شدند [۷]. روبات ایکوپیا، عملیات تمیز کردن پنل‌های فتولتاییک را بدون آب انجام می‌دهد، که موجب صرفه جویی در مصرف آب و حذف ۹۹٪ گرد و غبار می‌شود [۸].

۲- عوامل طبیعی موثر بر عملکرد پنل‌های فتولتاییک

۲-۱- شدت تابش نور خورشید

هنگامی که گردوغبار روی سطح پنل‌های فتولتاییک رسوب می‌کند تأثیر آن بر روی صفحات در سه عامل می‌توان نشان داد. اولین اثر کاهش شدت تابش است. به طور کلی، سطح پنل فتولتاییک از شیشه محکم ساخته شده است با بیش از ۹۱٪ پراکنش. هنگامی که گردوغبار روی صفحه شیشه‌ای تجمع می‌کند، گردوغبار نور تابشی بر پنل فتولتاییک را خنثی می‌کند، به طوری که انتقال صفحه شیشه‌ای ضعیف می‌شود و مقدار واقعی از نور خورشید دریافت شده توسط پنل فتولتاییک کاهش می‌یابد.

۲-۲- دما

تولید نیروی یک سلول خورشیدی به شدت تحت تأثیر دمای محیط خود قرار دارد. بیشتر سلول‌های خورشیدی برای کار در دمای استاندارد $25^\circ C$ تنظیم شده‌اند و هر افزایشی در دمای محیط سلول‌های خورشیدی منجر به تجزیه و تحلیل عملکرد سلول می‌شود. دما تأثیر عمده‌ای بر خروجی ولتاژ سلول فتولتاییک و تأثیر بسیار کمی بر جریان دارد. عملکرد مداوم یک سلول خورشیدی در دمای بالا باعث کاهش کارایی آن و همچنین طول عمر می‌گردد. با این حال دمای پایین‌تر از دمای استاندارد به سلول آسیب نمی‌رساند.

۲-۳- رطوبت

رطوبت بر عملکرد یک سلول فتولتاییک در دو روش تأثیر می‌گذارد، یکی از آن‌ها تغییر مسیر نور ناشی از قطرات آب موجود در اتمسفر به عنوان ذرات بخار آب است. این امر منجر به تنزل در سطح پذیرش مولفه مستقیم تابش خورشیدی می‌شود که منجر به عملکرد پایین می‌شود. اثر دیگر رطوبت ناشی از حضور ذرات آب در اطراف سلول است. حضور رطوبت بیشتر در نزدیکی سلول برای مدت طولانی می‌تواند باعث آسیب به سلول شود و طول عمر سلول را کاهش دهد.

۲-۴- جریان باد

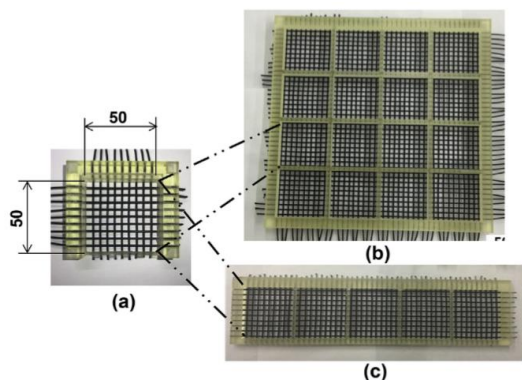
گردش هوا و جریان باد نقش مهمی در تأثیرگذاری بر عملکرد پنل فتولتاییک دارد. با افزایش سرعت هوا، دمای محیط اطراف سلول کاهش می‌یابد، که منجر به کارایی بهتر می‌شود. این هم چنین به پاک کردن ذرات گردوغبار رسوب شده در سطح سلول کمک می‌کند. پس از پاک شدن ذرات گردوغبار، فوتون‌های بیشتری می‌توانند به سطح پنل برسند در نتیجه توان بیشتری تولید می‌شود.

۲-۵- برف

در مناطقی که برف شدیدی می‌بارد پنل‌ها باید جایی نصب شوند که برف بتوانند به آسانی از روی آن‌ها پارو شود. در سیستم‌هایی با شیب زیاد، برف به راحتی پارو شده و به پایین می‌لغزد ولی در سیستم‌هایی با زاویه ۴۵ درجه و یا بیشتر، تنها ۲ یا ۳ روز آفتابی کافی است تا برف آب شود.

۲-۶- گردوغبار

بیشتر پنل‌های خورشیدی در جایی نصب می‌شوند که هیچ مانعی بین پنل خورشیدی و تابش خورشید وجود نداشته باشد، همین مورد راه را برای رسوب گردوغبار حمل شده با باد بر روی پنل فتولتاییک فراهم می‌کند. گردوغبار را می‌توان ذرات جامد ریز با قطر کمتر از $500 \mu m$ تعریف کرد. ذرات گرد و غبار ممکن است بر روی پنل صاف و یکنواخت باشند و یا با توجه به عوامل مختلف مانند خواص گردوغبار (نوع ماده شیمیایی گردوغبار، مواد زیستی و الکترواستاتیکی، ضخامت، اندازه، شکل و وزن) یا ویژگی‌های محیطی (دما،



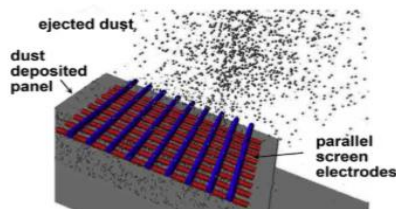
شکل ۲ سیستم تمیز کننده الکترواستاتیک

شکل ۳، سیستم تمیز کننده را که بر روی یک صفحه شیشه‌ای شیب دار دارای گرد و غبار قرار داده شده است را نشان می‌دهد، به طوری که الکتروود صفحه پایین در تماس با گرد و غبار رسوب شده قرار دارد.



شکل ۳ سیستم تمیز کننده قرار گرفته بر روی شیشه شیب دار

شکل ۴، گردوغبار جدا شده از روی پنل فتوولتاییک را نشان می‌دهد.



شکل ۴ گردوغبار جدا شده از روی پنل فتوولتاییک

۲-۴- روبات تمیز کننده پنل فتوولتاییک

از جمله روبات‌هایی که برای شستشوی پنل مورد استفاده قرار می‌گیرد، روبات تمیز کننده پنل [۱۲]، ساخت ایتالیا است. در این روبات، سیستم شستشوی پنل به طور کامل مستقل است، روبات دارای عملکرد دو برنامه ریزی و از طریق یک سنسور باران و با استفاده از جت آب است. این روش، تمیز کردن ثابت و یکنواخت را فراهم می‌کند. این سیستم مدولار، با نظارت ممکن و مدیریت از سایت راه دور است. روبات به هیچ قاب اضافی نیاز ندارند. می‌توان آن را بر روی سیستم‌های زمین، ساختمان‌ها، سقف قله‌دار و یا سقف کم شیب

سرعت باد، رطوبت محیط، پوشش گیاهی محلی، ترافیک عابر پیاده، وسایل نقلیه، آلودگی هوا) همچنین ویژگی‌های پنل خورشیدی (زاویه و جهت گیری سیستم فتوولتاییک، بافت سطح پنل فتوولتاییک و ویژگی‌های پوششی) به طور یکسان توزیع نشده باشند [۹].

۳- پاک سازی خودکار ماژول‌های خورشیدی

با توجه به اینکه بارندگی نقش قابل توجهی در قابلیت تمیز کردن ماژول‌های خورشیدی دارد، باید گفته شود که اغلب بارندگی‌ها به دلیل وجود انواع خاک سیمانی و چسبناک، کفایت نمی‌کند. با این حال تمیز کردن صفحات خورشیدی همیشه ساده نیست. برای شروع، مساله قابلیت دسترسی وجود دارد. با توجه به این واقعیت که پنل‌های فتوولتاییک اغلب در نواحی خطرناک و دشوار قرار دارند، تمیز کردن آن‌ها به صورت دستی کار دشواری است و زمان زیادی برای ایمنی انجام دادن آن لازم است. راه حل منطقی تمیز کردن خودکار و مستقل آن‌ها است. پارامتر الکتریکی پنل خورشیدی نسبت به تراکم گرد و غبار حساس است، بنابراین فراهم کردن مکانیزم تمیز کردن خودکار برای حذف ذرات گرد و غبار از سطح پنل خورشیدی به منظور حصول اطمینان از عملکرد بالا بسیار ضروری است.

۴- سیستم‌های تمیز کننده پنل فتوولتاییک

با توجه به تحقیقات اخیر و آزمایش‌های انجام گرفته در زمینه سیستم‌های تمیز کننده پنل فتوولتاییک، روشن است که یک راه حل جهانی برای تمیز کردن گردو خاک وجود ندارد، زیرا مناسب بودن آن بستگی به عوامل مختلف دارد. بنابراین، راه حل بهینه با توجه به عوامل محیطی و دیگر عوامل انتخاب می‌شود [۱۰].

۴-۱- سیستم تمیز کننده الکترواستاتیک

شکل ۲، سیستم تمیز کننده الکترواستاتیک [۱۱] را نشان می‌دهد. در این سیستم، ولتاژ متناوب بالا بین الکتروودها روی صفحه موازی تنظیم شده در یک قاب اعمال می‌شود. ذرات گرد و غبار در سطح پنل توسط میدان الکترواستاتیک متناوب در مجاورت الکتروودهای صفحه پایین متلاطم می‌شوند و با عبور از الکتروود صفحه بالایی به بیرون می‌ریزند. سپس توسط نیروی گرانش پایین می‌افتند. این تجهیزات تنها هنگامی روی پنل فتوولتاییک قرار می‌گیرد که پنل آلوده باشد. سیستم تمیز کننده الکترواستاتیک برای ذرات با ضخامت بیشتر نسبت به ذرات با ضخامت کمتر عملکرد بهتری دارد.

جدول ۱ مشخصات فنی پنل فتوولتاییک مورد استفاده در آزمایش.

پارامتر الکتریکی عملکرد ماژول فتوولتاییک

توان ماکزیمم	۵w
ولتاژ ماکزیمم	۱۷,۲۷
جریان ماکزیمم	۰,۳۰A
ولتاژ مدار باز	۲۱,۶۷
جریان اتصال کوتاه	۰,۳۱A

نصب کرد. برای نظارت مستمر، روبات پیام‌های متنی را به تلفن همراه ارسال می‌کند و امکان کنترل آن به صورت آنلاین وجود دارد. تصویری از این روبات در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ روبات تمیز کننده پنل فتوولتاییک

شکل ۷، پنل خورشیدی قرار گرفته در معرض گرد و غبار در انتهای آزمایش را نشان می‌دهد.



شکل ۷ پنل خورشیدی قرار گرفته در معرض گرد و غبار بعد از ۳۰ روز

۴-۳- قلم مو تمیز کننده پنل فتوولتاییک

شکل ۶، قلم مو تمیز کننده پنل فتوولتاییک [۱۳] را نشان می‌دهد. قلم مو در کل سطح پنل با استفاده از یک راهنمای غلطکی حرکت می‌کند و موجب تمیز شدن سطح پنل از هر نوع آلودگی می‌شود.



شکل ۶ قلم مو تمیز کننده پنل فتوولتاییک

انتخاب محل مناسب برای انجام آزمایش نیازمند دو شرط ساده است. در زیر به آن‌ها اشاره شده است.

- در طول روز هیچ سایه‌ای توسط هیچ وسیله‌ای ایجاد نشود.
- دسترسی آسان برای راه اندازی و ثبت اطلاعات.

با در نظر داشتن این موارد، محل انجام آزمایش پشت بام ساختمان آموزش واقع در فاز یک دانشکده فنی حرفه‌ای دختران دکتر شریعتی استان تهران نهایی شد. بهترین جهت قرار گیری پنل خورشیدی با توجه به زاویه تابش خورشید در تهران به سمت جنوب است، بنابراین در این آزمایش نیز پنل‌های فتوولتاییک در جهت جنوب نصب شدند. محل انجام آزمایش و تجهیزات مورد استفاده در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸ تجهیزات و محل انجام آزمایش

در این آزمایش به اندازه گیری و ثبت داده‌های زیر پرداخته شد.

- ولتاژ مدار باز
- جریان اتصال کوتاه
- دمای پنل تمیز و پنل آلوده

۵- تحقیقات تجربی

آزمایشات فتوولتاییک برای بررسی اثر گرد و غبار، شن و ماسه بر کارایی تولید توان فتوولتاییک تنظیم و انجام شدند.

۵-۱- بررسی اثر گرد و غبار بر خروجی پنل فتوولتاییک

برای بررسی تاثیر گردوغباری که به مدت یک ماه به طور طبیعی بر سطح پنل فتوولتاییک رسوب می‌کند، دو پنل مشابه از چهار تیر ماه الی چهار مرداد ماه در فضای باز قرار داده شدند. پارامترهای مرتبط به پنل گروه کنترل و پنل گروه تجربی هر روز از ساعت اولیه صبح (۱۹:۰۰) ~ (۷:۰۰) بررسی و ثبت شده اند سپس در انتها میانگین مقادیری که در یک ساعت ثبت شده اند حساب شدند. دو ماژول نوع پلی کریستال ۵ w ساخت شرکت تابان برای انجام این مرحله از آزمایش انتخاب شدند. مشخصات پنل در جدول ۱ درج شده است.



فصلنامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو - سال هشتم - شماره اول - بهار و تابستان ۱۴۰۰

۲-۵- مقایسه اثر گرد و غبار، شن و ماسه بر خروجی پنل فتوولتاییک

برای انجام این مرحله از آزمایش چهار ماژول نوع پلی کریستال w ۵۰ و مقاومت متغیر ۵ kΩ انتخاب شدند. مشخصات پنل استفاده شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ مشخصات فنی پنل فتوولتاییک مورد استفاده در آزمایش پارامتر الکتریکی عملکرد ماژول فتوولتاییک

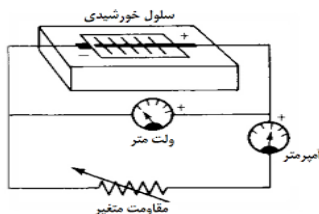
توان ماکزیمم	۴۹,۴ w
ولتاژ ماکزیمم	۱۷,۵ v
جریان ماکزیمم	۲,۹ A
ولتاژ مدار باز	۲۱,۶ v
جریان اتصال کوتاه	۳,۱۸ A

در این بررسی از چهار پنل مشابه استفاده شده است. بر روی سطح پنل-های گروه تجربی به ترتیب ۱۰ گرم گرد و غبار، ۱۰ گرم شن و ماسه و بر روی پنل چهارم، ۲۰ گرم شن و ماسه پخش شده است. برای نمونه برداری از ذرات گردوغبار، در یک ایستگاه در پشت بام ساختمان آموزش دانشکده دکتر شریعتی یک سطح شیشه‌ای به مدت یک هفته قرار داده شد. سپس گردوغبار جمع آوری شده به روش دستی که از روش‌های غیر فعال است روی سطح پنل فتوولتاییک، به طوری که در تمام سطح یکسان باشد پخش شد. در شکل ۱۰، پنل استفاده شده در این مرحله از آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۱۰ پنل استفاده شده برای مقایسه اثر گرد و غبار، شن و ماسه بر خروجی پنل فتوولتاییک

شکل ۱۱ نحوه قرار گیری ولت متر و آمپر متر در مدار را نشان می‌دهد.

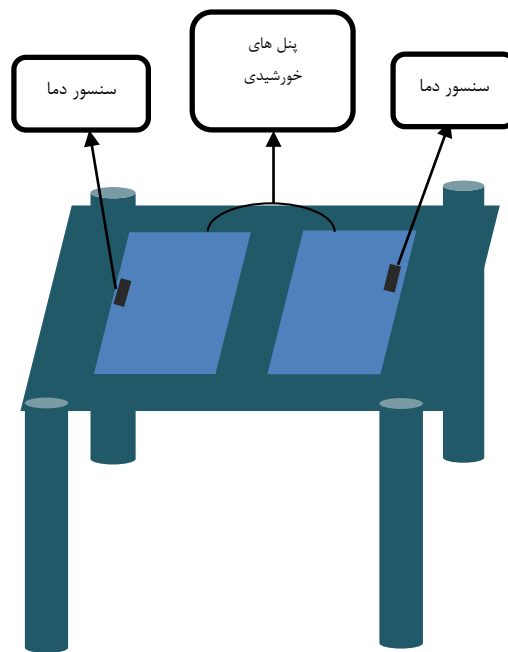


شکل ۱۱ نحوه قرار گیری ولت متر و آمپر متر در مدار

ولتاژ و جریان به وسیله مولتی متر Ut30c با حداکثر ظرفیت نمایش ۴ رقم و دماها نیز توسط دو سنسور Im35 با دقت $0,5^{\circ}C$ در دمای $25^{\circ}C$ اندازه گیری شدند. جدول ۲ مشخصات فنی قطعات مورد استفاده درج شده است. جدول ۲ مشخصات فنی قطعات مورد استفاده در آزمایش.

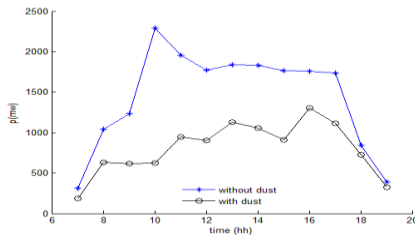
شماره	قطعه	نوع	مشخصات فنی
۱	مولتی متر	Ut30c	ولتاژ dc: $200m - 500v$ جریان dc: $10A - 2000\mu$
۲	سنسور دما	Im35	محدوده دما: $150^{\circ}C - 50^{\circ}C$ عملکرد: $30v - 4v$
۳	نرم افزار	متلب	ورژن: ۲۰۱۳
۴	مقاومت متغیر	-	محدوده تغییر: $5k\Omega - 0$

شکل ۹، موقعیت قرار گیری سنسورهای دما بر روی پنل‌ها را نشان می‌دهد. برای اندازه گیری دقیق دما بردهای مربوط به سنسور ها را تا حد امکان با کمترین فاصله از سنسورها قرار داده شدند. تغذیه مدارات سنسور دما توسط پنل فتوولتاییک تامین شدند. در این قسمت از آزمایش گزارش عملکرد سیستم فتوولتاییک به علت رسوب گرد و غبار در مقایسه با یک پنل فتوولتاییک تمیز تحلیل شد، که شامل مقایسه و ثبت پارامترهای مختلف در شکل گرافیکی است.



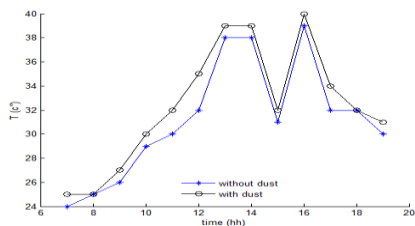
شکل ۹ موقعیت قرار گیری سنسور دما بر روی پنل

۶- نتایج آزمایش تجربی



شکل ۱۴ نمودار توان (پنل تمیز - پنل آلوده)

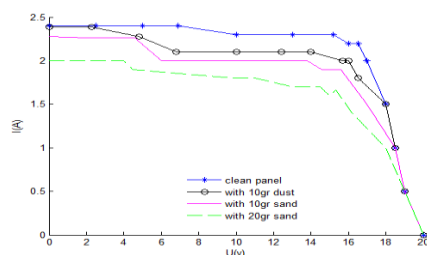
شکل ۱۵، تاثیر گردو غبار بر دمای پنل فتولتاییک را نشان می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که رسوب گردو غبار باعث افزایش ۳٪ دمای پنل آلوده نسبت به دمای پنل تمیز شده است.



شکل ۱۵ تاثیر گردو غبار بر دمای پنل

۶-۲- مقایسه پنل تمیز با پنل های آلوده به گردو غبار، شن و ماسه
شکل ۱۶، نتیجه مقایسه پنل تمیز با پنل های آلوده به گردو غبار، شن و ماسه به صورت نمودار جریان - ولتاژ را نشان می‌دهد.

ولتاژ پنل آلوده به $10 \frac{gr}{m^2}$ گردو غبار، $10 \frac{gr}{m^2}$ شن و ماسه و $20 \frac{gr}{m^2}$ شن و ماسه در برابر ولتاژ پنل تمیز هر کدام به ترتیب ۳٪، ۵٪ و ۷٪ کاهش داشته است. همچنین جریان نیز به ترتیب ۹٪، ۱۳٪ و ۲۴٪ کاهش داشته است. هنگامی که تراکم گردو غبار از مقدار معینی بیشتر شود، ولتاژ و جریان پایدار خواهند شد، یعنی اثر گردو غبار بر این دو پارامتر به حداکثر رسیده است. همچنین نشان می‌دهد که گردو غبار بیشترین تاثیر را در عملکرد خروجی فتولتاییک در مرحله اولیه تجمع آلودگی دارد.



شکل ۱۶ مقایسه نمودار ولتاژ - جریان (پنل تمیز با پنل های آلوده به گردو غبار و شن)

شکل ۱۷، نتیجه مقایسه پنل تمیز با پنل های آلوده به گردو غبار، شن و ماسه به صورت نمودار توان - ولتاژ را نشان می‌دهد. با افزایش تراکم گردو غبار، شن و ماسه بالاترین نقطه توان به تدریج به سمت چپ حرکت می‌کند، یعنی ولتاژ خروجی و مقدار حداکثر توان خروجی فتولتاییک به تدریج کاهش می‌یابد.

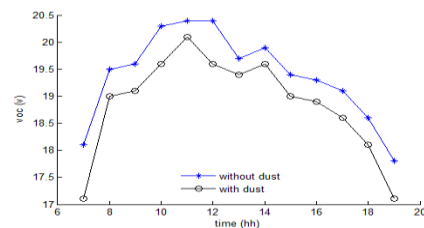
۶-۱- مقایسه دو پنل تمیز و آلوده با گردو غبار

مقادیر ولتاژ مدار باز و شدت جریان اتصال کوتاه متناظر با آن توسط واحد اندازه گیری ثبت گردید و منحنی مشخصه جریان و ولتاژ رسم شدند و با استفاده از رابطه (۱) منحنی توان متناظر با ولتاژ و جریان رسم شد.

$$p = v_{oc} \times I_{sc} \quad (1)$$

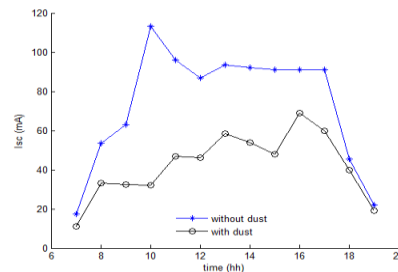
در شکل های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ تاثیر گردو غبار بر ولتاژ، جریان، توان و دمای پنل فتولتاییک بعد از یک ماه به طور آشکارا نشان داده شده است. با توجه به این که اندازه گیری مقادیر از ساعت اولیه صبح (۷:۰۰) ~ (۱۹:۰۰) ادامه داشته است، در ساعات اولیه به دلیل شدت تابش کم نور خورشید، خروجی پنل دارای مقدار کمی می‌باشد با گذشت زمان و افزایش شدت تابش نور خورشید میزان مقادیر نیز افزایش می‌یابد این روند ادامه می‌یابد تا انتهای روز که دوباره شدت تابش نور خورشید به دلیل غروب آفتاب کم می‌شود، مجدد با افت مقادیر روبرو هستیم. شدت تابش خورشیدی که به سلول می‌رسد بیشتر جریان (I) را کنترل می‌نماید، در حالی که افزایش دمای سلول فتولتاییک از طرف دیگر ولتاژ آن (V) را کاهش می‌دهد.

شکل ۱۲، تاثیر گردو غبار بر ولتاژ پنل فتولتاییک را نشان می‌دهد. تجمع گردو غبار بر سطح پنل فتولتاییک باعث کاهش ۳٪ ولتاژ پنل آلوده نسبت به پنل تمیز شده است.



شکل ۱۲ تاثیر گردو غبار بر ولتاژ مدار باز (پنل تمیز - پنل آلوده)

شکل ۱۳، تاثیر گردو غبار بر جریان اتصال کوتاه پنل فتولتاییک را نشان می‌دهد. رسوب گردو غبار بر سطح پنل فتولتاییک باعث کاهش ۴۲٪ جریان پنل آلوده نسبت به پنل تمیز شده است.



شکل ۱۳ تاثیر گردو غبار بر جریان اتصال کوتاه (پنل تمیز - پنل آلوده)

شکل ۱۴، تاثیر گردو غبار بر توان پنل فتولتاییک را نشان می‌دهد. وجود گردو غبار موجب کاهش توان پنل به میزان ۴۶٪ نسبت به پنل آلوده شده است.



- گردوغبار بر سطح پنل موجب افزایش دمای پنل می‌شود که به نوبه خود باعث کاهش چشم‌گیر پارامترهای خروجی می‌گردد.
- گرد و غبار و شن و ماسه تاثیر بیشتری در جریان اتصال کوتاه و تاثیر کمتر بر ولتاژ مدار باز پنل خورشیدی دارد به طوری که در پنل آلوده پس از یک ماه جریان ۳۹٪ و در پنل آغشته به $\frac{gr}{m^2} \cdot 10$ شن و ماسه ۸٪ کاهش بیشتری نسبت به ولتاژ داشته است.
- درصد کاهش بازده تبدیل پنل آلوده به $\frac{gr}{m^2} \cdot 10$ گردوغبار، $\frac{gr}{m^2} \cdot 10$ شن و ماسه، $\frac{gr}{m^2} \cdot 20$ شن و ماسه نسبت به پنل تمیز، به ترتیب ۵۲٪، ۵۰٪، ۱۶٪ و درصد کاهش عامل پرکننده نیز ۹٪، ۱۳٪، ۱۶٪ بوده است.
- پنل آلوده به $\frac{g}{m^2} \cdot 10$ شن و ماسه افزایش دمای بیشتری نسبت به پنل آلوده به $\frac{g}{m^2} \cdot 10$ گردوغبار داشته است به طوری که پنل آغشته به شن و ماسه دارای دمای $18.80^\circ C$ و پنل آغشته به گردوغبار دارای دمای $18.60^\circ C$ بوده است.

۸- فهرست علائم

I_{sc} جریان اتصال کوتاه (A)

V_{oc} ولتاژ مدار باز (V)

P_{max} توان ماکزیمم (W)

P_D توان ماکزیمم پنل آلوده (W)

P_C توان ماکزیمم پنل تمیز (W)

ff عامل پرکننده

R مقاومت (Ω)

F فرکانس (hz)

ρ چگالی ($\frac{gr}{m^2}$)

Δp درصد کاهش توان

T دما ($^\circ C$)

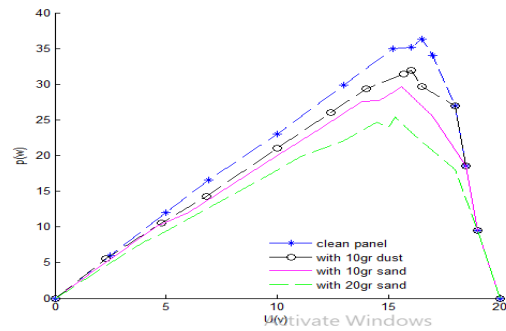
P_s توان تابش خورشید ($\frac{W}{m^2}$)

A مساحت سطح پنل

Γ بازده تبدیل

۹- مراجع

- [1] Modarres, R., "Regional maximum wind speed frequency analysis for the arid and semi-arid regions of Iran", *Journal of Arid Environments*, July 2008, 2008, vol.72, pp.1329-42.
- [2] Yaping, S., KarlHeinz, W., Adrian, C., Huang, J., Lin, Z., & McTainsh, G., "An emerging core theme in Earth system science", *Aeolian Research*, March 2011, vol.2, pp.181-204.
- [3] yingya chen, yanfeng liu, zhijun tian, yu Dong, yong zhou, xiaowen wang, Dengjia wang, "Experimental Study on the Effect of Dust Deposition on Photovoltaic Panels", *Publication of Energy Procedia*, February 2019, val. 158, pp 483-489.
- [4] Vinay Gupta, Prateek Raj, Ankit Yadav, Peeyush Garg, Farhan Nizam, "Investigate the Effect of Dust Deposition on the Performance of Solar PV Module using LABVIEW based Data Logger", *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering(ICPCSI)*, Chennai, India, 21-22 Sept. 2017, pp 742-747.
- [5] M. Saidan, A.G. Albaali, E. Alasis, J.K. Kaldellis, "Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment", *Renewable Energy*, val.92, july 2016, pp499-505.
- [6] Miller J, Jackson J, "Impact of Soiling and Pollution on PV Generation Performance", *Technical Memorandum by Sandia National Laboratories, San José Solar America*; October, 2009.



شکل ۱۷ مقایسه نمودار ولتاژ - توان

(پنل تمیز با پنل‌های آلوده به گرد و غبار و شن)

درصد کاهش توان پنل‌ها نیز با توجه به توان ماکزیمم خروجی در حالت بدون آلودگی و توان ماکزیمم خروجی هر کدام از پنل‌های آلوده با توجه به رابطه ۲ و عامل پرکننده هر کدام از پنل‌ها نیز طبق رابطه ۳ به دست آمدند. همچنین جهت اندازه‌گیری بازده تبدیل از رابطه ۴ استفاده شد که در آن شدت تابش خورشید، از میزان توان تابشی اعلام شده از طرف سازمان هواشناسی در چهار مرداد، ساعت ۱۵:۰۰ که برابر با $(\frac{W}{m^2})$ ۵۵۶ استفاده شده است.

$$\Delta p = \frac{P_C - P_D}{P_C} \times 100 \quad (2)$$

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times I_{sc}} \times 100 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_s A} \times 100 \quad (4)$$

مقادیر به دست آمده از درصد کاهش توان و عامل پرکننده و بازده تبدیل در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ مقادیر به دست آمده از درصد کاهش توان، عامل پرکننده و بازده تبدیل

میزان آلودگی	درصد کاهش توان پنل‌های	عامل پرکننده (%)	بازده تبدیل (%)	دما
بدون آلودگی	-	۷۵	۱۹,۲	۱۸,۵۵
۱۰ گرم گردوغبار	۱۱,۸۴	۶۸	۱۹,۱	۱۸,۶۰
۱۰ گرم شن و ماسه	۱۸,۳۴	۶۵	۱۸,۲	۱۸,۸۰
۲۰ گرم شن و ماسه	۳۰,۰۵	۶۳	۱۶	۱۸,۸۹

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا عوامل محیطی موثر بر عملکرد پنل فتوولتاییک اشاره شده است. جهت تمیز کردن پنل‌های فتوولتاییک چند نوع سیستم تمیز کننده اشاره شده است. سپس با انجام آزمایشات تجربی تاثیر گردوغبار بر خروجی پنل خورشیدی به صورت رسم نمودار گرافیکی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقایسه‌ای از تاثیر گردوغبار، شن و ماسه بر پنل فتوولتاییک انجام گرفت.

- میانگین ولتاژ مدار باز پنل تمیز در ساعت هفت صبح به دلیل شدت تابش کم نور خورشید، دارای مقدار ۱۸,۱۷ بوده و با گذشت زمان و افزایش شدت تابش نور خورشید در ساعت دوازده میانگین ولتاژ مدار باز به مقدار ۲۰,۴ افزایش یافته است.



- [7] Hiroyuki Kawamoto*, Bing Guob, "Improvement of an electrostatic cleaning system for removal of dust from solar panels", *Journal of Electrostatics*, February 2018 , vol.91, Pages 28-33.
- [8] *Ecoppia : le nettoyage sans eau des panneaux solaires via des robots... à énergie solaire - L'Atelier BNP Paribas*". Available:<https://atelier.bnpparibas/smartcity/article/ecoppia-nettoyage-caupanneauxsolaires-viarobots-energie-solaire>. Accessed 29 Marsh 2018.
- [9] Monto Mani, and Rohit Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (2010), 3124 3131.

[۱۰] م. محمدی زاده، "رفع اثر مخرب گرد و غبار از روی سلول های فوتوولتائیک در نیروگاه های خورشیدی نصب شده در شهرها و روستاهای بیابانی"، اولین کنگره بین المللی پژوهشهای علوم میان رشته ای در شهرسازی و معماری، تبریز، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۶.

- [11] Hiroyuki Kawamoto, "Electrostatic cleaning equipment for dust removal from soiled solar panels", *Journal of Electrostatics*, vol.98 . March 2019, Pages 11-16.
- [12] Patil P.A., Bagi J.S., Wagh M. M , "A Review on Cleaning Mechanism of Solar Photovoltaic Panel" , International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing ICECDS, Chennai, India, 1-2 Aug. 2017, pp.250-256.
- [13] Abdelilah Said1, Soukaina Medaghri Alaoui1, Youssef Rouas1, Gauthier Dambrine2, Etienne Menard2, Jay Boardman2 and Abdelfettah Barhdadi1, "Innovative Low Cost Cleaning Technique for PV Modules on Solar Tracker", *6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 5-8 December. 2018, Rabat, Morocco.

