



Experimental investigation of cooling photovoltaic panels using phase change material at different angles

Maziar Mirakhorlo¹, Mehran Rajabi Zagarabadi², Mohammad Sadegh Valipour³

1.MSc, New Science and Technology Department, Semnan University, Semnan

2.Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan

3. Associate Professor, Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan

*Corresponding author Email: maziarmir1995@yahoo.com.

Abstract

Photovoltaic panels are sensitive to temperature variables. When the ambient temperature and solar intensity on these panels increase, the operating temperature of these panels also increases linearly, which causes a loss of conversion efficiency and damage to these panels. Therefore, to overcome this issue and maintain the working temperature of photovoltaic panels, it is necessary to dissipate heat from these panels. In this research, the experimental method of cooling using phase change materials has been investigated. Therefore, the types of phase change materials, their properties, and also a review of previous studies have been done. For experimental purposes, two photovoltaic panels with a nominal power of 90 watts have been used, one of which has been used as a reference panel and the other as a cooled panel. The aluminum container is located behind the cooled panel, and to increase heat transfer, the container is equipped with 50 pin fins. The inside of the container is filled with saltwater with a mass ratio of 3 to 1. The panels were tested at 45 and 25-degree angles, respectively. The panels were located on a structure with the ability to change the angle. The effect of changing this parameter on the output power of these panels and system efficiency has also been investigated. Comparison of electrical efficiency parameters and output power of photovoltaic panels shows a significant improvement in the efficiency of these panels, so that on average in the first case, 11.83% and in the second case, 11.4% increase in efficiency has been observed.

Keywords: Photovoltaic, Cooling, Phase change materials.

Introduction

The global need for energy is growing. Recent research by the US Energy Information Administration (EIA) estimates that electricity generation will increase by about 45% by 2040[1]. Renewable energy is expected to have the highest development in the global energy market, with an average growth of 2.8 percent per year. Initially, renewable energy replaces



coal-fired power plants, followed by liquid fuels, which lose 15% of the market share. As of 2018, solar photovoltaics have accounted for 36% of the newly added energy capacity and then wind 18% of this capacity[2]. Photovoltaic panels are sensitive to temperature variables. When the ambient temperature and light intensity on photovoltaic panels increase, the operating temperature of these panels also increases linearly. Increasing the operating temperature of photovoltaic panels reduces the open-circuit voltage. Results lead to loss of efficiency and cause irreparable damage to photovoltaic panel materials. Therefore, to overcome these effects and maintain the operating temperature of photovoltaic panels and the output power determined by the manufacturer, it is necessary to dissipate heat from these panels[3]. An increase in electrical efficiency up to 5% is observed with PV-PCM integrated systems. The results show that the phase change material combined with heat sink is significant in improving the performance. The number of fins, distances, and lengths affect the conductivity and convection of the phase change material, thus influencing the melting time and temperature regulation performance. Due to the energy storage capacity per unit mass, a lot of research has been done on the use of phase change materials in solar energy[4]. This energy can also be used in other applications such as heat pumps [12], refrigerators [5], .water heating for domestic use[6],[7], space heating[8], and water purification[9].

Experimental Study

In this test, two similar photovoltaic panels with a maximum power of 90 watts were used. One of these panels is selected as the reference and the other as the cooled panel. The cooling container has dimensions of $5 \times 50 \times 120$ cm and is made of 1050 aluminum with a thickness of 5 mm. Fifty aluminum pin fins with 12 mm thickness and 45 mm height have been used. First, the aluminum sheet is perforated to connect the pins, and the pins are pressed into the holes and then connected to the back of the container by aluminum welding. In other connection points, aluminum welding has been used in the construction of the container. A bolt and nut connection was used to join the container to the photovoltaic panel, and epoxy resin was used for sealing. In order to cool, a combination of water and salt with a mass ratio of 3 to 1 has been used. The experiment is performed in two cases. To examine the cooling method and its advantages, changing the angle of the panels is also investigated. Based on the angle of the panels, the test cases are defined in two cases: the first case is 45 degrees to the horizon, and the second is 25 degrees to the horizon.



Figure 1: Aluminum container made for the experimental setup.



Figure 2: Test location and placement of the plates.

The parameters measured in this experiment are input solar intensity, reference panel voltage and current, cooled panel voltage and current, reference panel surface temperature and back temperature, cooled panel surface temperature, Container temperature, and ambient temperature.

Results

In the first case, the maximum temperature of the reference and cooled panels were recorded as 63.2 and 54.3 ° C, respectively. Cooling reduces the cooling panel temperature by a minimum of 7.58 ° C and a maximum of 12.2 ° C. According to Fig 3a, due to the increase in solar radiation intensity until noon, the output power of photovoltaic panels also increases and then begins to decrease. Also, the lowest increase in efficiency at was 8.54 percent, and the highest growth inefficiency was 12.1 percent. As Fig 3a shows, the effect of cooling on increasing electrical power is evident. The lowest and highest increase in power of the cooling panel compared to the reference plate was recorded equal to 4.8 and 7.2 watts, respectively. In the second case, the maximum temperature of the reference and cooled panels were recorded as 67 and 55.7 ° C, respectively. Cooling reduces the cooling panel temperature by a minimum of 8.2 ° C and a maximum of 13.3 ° C. According to Fig 3b, the lowest increase in efficiency was 8.8%, and the highest increase in efficiency was 12.9%. The lowest and highest increase in power of the cooled panel compared to the reference panel was recorded equal to 2.5 and 8 watts, respectively.

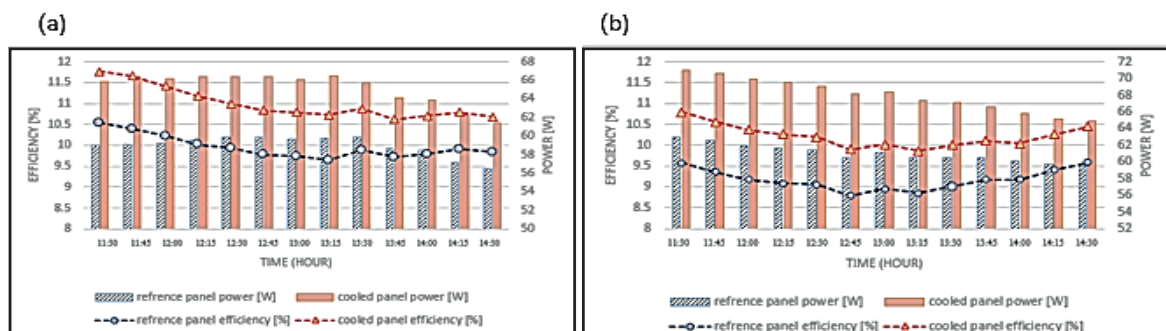


Figure 3: output power and electrical efficiency Graph of photovoltaic panels in the Experiment study.



Switching from an angle of 45 degrees to 25 degrees resulted in more solar radiation received during the experiment. As the solar heat was received, the reference and cooled Panels recorded higher temperatures. Increasing the operating temperature of photovoltaic panels in the second case of study has led to more efficient cooling in this method and more temperature regulation, and increased electrical efficiency and power.

Conclusion

Photovoltaic panels are sensitive to temperature variables. When the ambient temperature and solar intensity on these panels increase, the operating temperature of these panels also increases linearly, which causes a loss of conversion efficiency and damage to these panels. Therefore, to overcome this issue and maintain the working temperature of photovoltaic panels, it is necessary to dissipate heat from these panels. One of the suitable methods for cooling photovoltaic panels is by using phase change material. Experimental investigation of cooling by phase change materials has been performed in two cases in this study. Comparison of electrical efficiency parameters and output power of photovoltaic panels shows a significant improvement in the efficiency of these panels, so that on average in the first case, 11.83% and in the second case, 11.4% increase in efficiency has been observed.

References

1. Conti, J., Holtberg, P., Diefenderfer, J., LaRose, A., Turnure, J. T., Westfall, L. (2016). International energy outlook 2016 with projections to 2040 (No. DOE/EIA-0484 (2016)). USDOE Energy Information Administration (EIA), Washington, DC (United States). Office of Energy Analysis.
2. Feldman, D. J., Margolis, R. M. (2019). Q4 2018/Q1 2019 Solar Industry Update (No. NREL/PR-6A20-73992). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
3. Reddy, S. R., Ebadian, M. A., Lin, C. X. (2015). A review of PV-T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, pp 861-871.
4. Pandey, A. K., Hossain, M. S., Tyagi, V. V., Abd Rahim, N., Jeyraj, A., Selvaraj, L., & Sari, A. (2018). Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp 281-323.
5. Obalanlege, M. A., Mahmoudi, Y., Douglas, R., Ebrahimnia-Bajestan, E., Davidson, J., & Bailie, D. (2020). Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity. *Renewable Energy*, 148, pp 558-572.
6. Kalogirou, S. A., & Tripanagnostopoulos, Y. (2006). Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy conversion and management*, 47(18-19), pp 3368-3382.
7. Palacio, M., Rincón, A., & Carmona, M. (2020). Experimental comparative analysis of a flat plate solar collector with and without PCM. *Solar Energy*, 206, pp 708-721.
8. Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2006). Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 80(9), 1121-1130.
9. Mittelman, G., Kribus, A., Mouchtar, O., & Dayan, A. (2009). Water desalination with concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Solar Energy*, 83(8), pp 1322-1334.



بررسی تجربی خنک کاری صفحات فتوولتائیک با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در زوایای مختلف

مازیار میرآخورلو^{*}، مهران رجبی زرگرآبادی، محمد صادق ولی پور^۲

۱. پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

۳. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

نویسنده مسئول: maziarmir1995@yahoo.com

چکیده

یکی از راه‌های استحصال انرژی خورشیدی از طریق صفحات فتوولتائیک و تبدیل آن به انرژی الکتریکی می‌باشد. صفحات فتوولتائیک حساس به متغیر دما می‌باشند. زمانی که دمای محیط و شدت تابش نور بر این صفحات افزایش می‌یابد، دمای کاری این صفحات نیز به طور خطی افزایش می‌یابد. لذا برای غلبه بر این موضوع و حفظ دمای کاری صفحات فتوولتائیک دفع حرارت از این صفحات ضرورت دارد. در این پژوهش به بررسی تجربی روش خنک کاری این صفحات با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده پرداخته شده است. برای این منظور از دو صفحه فتوولتائیک با توان نامی ۹۰ وات استفاده شده است که یکی از آنها به عنوان صفحه مرجع و دیگری به عنوان صفحه خنک کاری شده استفاده شده است. صفحات فتوولتائیک در دو زاویه ۴۵ و ۲۵ درجه نسبت به افق بر روی یک سازه با قابلیت تغییر زاویه آزمایش شده‌اند و اثر تغییر این پارامتر بر روی توان خروجی این صفحات و کارایی سیستم نیز بررسی شده است. محفظه آلومینیومی در پشت صفحه خنک کاری شده تعبیه شده است و به منظور افزایش انتقال حرارت، محفظه مجهز به ۵۰ عدد پره استوانه‌ای شده است و درون محفظه از آب نمک با نسبت جرمی ۳ به ۱ پر شده است. مقایسه پارامترهای بازدهی الکتریکی و توان خروجی صفحات فتوولتائیک بهبود قابل توجهی در کارایی این صفحات را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که به طور میانگین در حالت اول ۱۱/۸۳ درصد و در حالت دوم ۱۱/۴ درصد افزایش بازدهی مشاهده شده است.

کلمات کلیدی: فتوولتائیک، خنک کاری، مواد تغییر فاز دهنده.

مقدمه

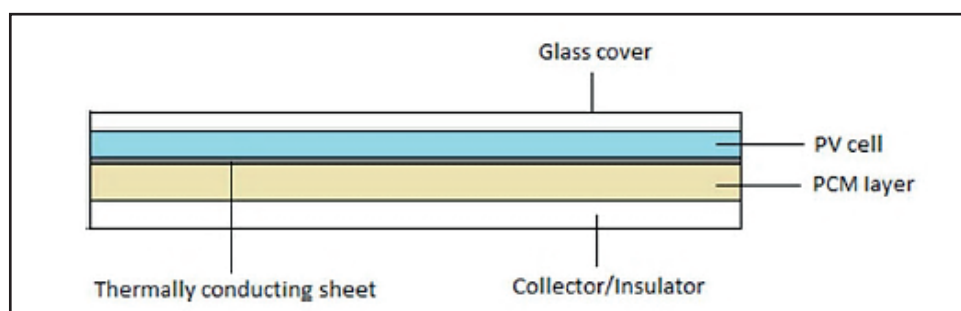
نیاز جهانی به انرژی رشد روز افزونی دارد. پژوهش‌های اخیر US Energy information Administration (EIA) برآورد می‌کند که میزان تولید انرژی الکتریسیته تا سال ۲۰۴۰ رشدی حدود ۴۵ درصد خواهد داشت [۱]. پیش بینی می‌شود که انرژی حاصل از منابع تجدید پذیر با رشد متوسط ۲/۸ درصدی در سال بیشترین توسعه را در بازار جهانی انرژی داشته باشد. در مرحله اول انرژی حاصل از منابع تجدید پذیر جایگزین نیروگاه‌های



زغال سنگ و به دنبال آن سوخت های مایع می شود که در کل ۱۵ درصد از سهم بازار را از دست می دهد. از سال ۲۰۱۸ فتوولتائیک خورشیدی ۳۶ درصد از ظرفیت های تازه اضافه شده انرژی و پس از آن باد ۱۸ درصد از این ظرفیت را شامل شده اند [۲]. با توجه به آنچه که گفته شد و اهمیت موضوع جامعه علمی و صنعتی بین المللی تلاش هایی را برای بهبود کارایی فناوری فتوولتائیک انجام داده است.

صفحات فتوولتائیک حساس به متغیر دما می باشند. زمانی که دمای محیط و شدت تابش نور بر صفحات فتوولتائیک افزایش می یابد، دمای کاری این صفحات نیز به صورت خطی افزایش می یابد. افزایش دمای کاری صفحات فتوولتائیک کاهش ولتاژ مدار باز را به همراه دارد. نتایج خالص منجر به از دست رفتن بازده تبدیل می شود و خسارات جبران ناپذیری را به مصالح صفحات فتوولتائیک وارد می کند. بنابراین برای غلبه بر این تاثیرات و حفظ دمای کاری صفحات فتوولتائیک و توان تعیین شده تولید توسط سازنده، دفع حرارت از این صفحات ضرورت دارد [۳]. روش های مختلفی برای خنک کاری صفحات فتوولتائیک ابداع شده است که روش خنک کاری توسط مواد تغییر فاز دهنده یکی از روش های نو در این زمینه محسوب می شود.

انرژی حرارتی به دو صورت انرژی گرمایی محسوس و نهان در مواد قابل ذخیره است. ذخیره انرژی گرمایی به صورت نهان به هنگام تغییر فاز جسم از حالت جامد به مایع یا مایع به گاز و یا جامد به جامد صورت می گیرد. مواد تغییر فاز دهنده انرژی را به صورت گرمای نهان ذوب در خود ذخیره می کنند [۴]. عمدتاً مواد تغییر فاز دهنده در دو دسته بندی کلی ارگانیک و غیر ارگانیک قرار می گیرند [۴]. متداولترین نمونه ارگانیک این مواد موم و پارافین و متداولترین نمونه غیر ارگانیک هیدرات نمک است. از آنجایی که مواد تغییر فاز دهنده در طیف مختلفی از نقاط ذوب وجود دارند، مهمترین ویژگی تعیین کننده کاربرد این مواد نقطه ذوب آنهاست [۵]. مواد تغییر فاز دهنده در سه فرم ماده خام، میکرو و ماکرو می توانند مورد استفاده قرار گیرند [۶]. مواد تغییر فاز دهنده یک راه حل جذاب را ارائه می دهند، زیرا ظرفیت گرمایی چند برابر بیشتر از سیستم های آب و هوا را دارند. علاوه بر این، حرارت ذخیره شده را می توان در طول شب بدون تلفات حرارت استفاده کرد. حرارت ذخیره شده می تواند برای تهیه مطبوع یا گرمایش آب استفاده شود که باعث افزایش کارایی کلی سیستم می شود و هزینه موثر آن را کاهش می دهد.



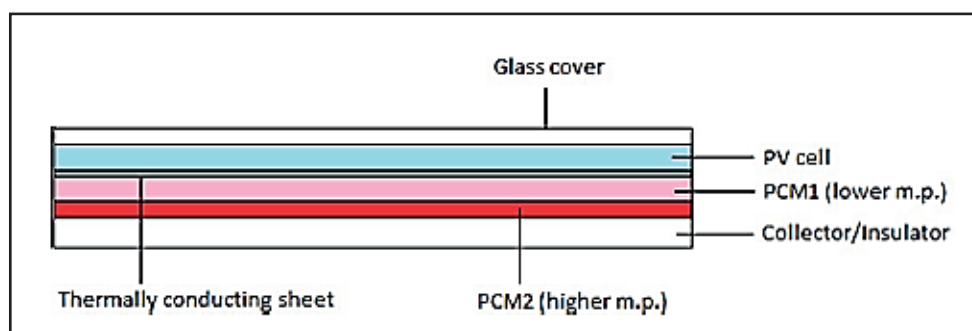
شکل ۱: شماتیک از نحوه اتصال یک لایه مواد تغییر فاز دهنده در پشت پنل فتوولتائیک [۷].

هو و همکاران [۷] عملکرد خنک کننده صفحات فتوولتائیک را با مواد تغییر فاز دهنده میکروکپسوله شده آزمایش کردند و دریافتند که مواد تغییر فاز دهنده نمی تواند پس از ضخامت مشخصی به طور کامل منجمد گردد و این امر بر عملکرد خنک کننده آن تأثیر می گذارد. اینداتونو و همکاران [۸] از ژله نفتی به عنوان ماده خنک کاری استفاده کردند. این آزمایش بر روی دو پانل ۱۰ وات بر روی پشت بام در حالت مستقل و سقفی در اندونزی آزمایش شده است و در نتیجه آن کارایی برای سیستم های سقفی ۲۱,۶٪ و برای سیستم های مستقل به دلیل حذف حرارت توسط این مواد ۶٪ افزایش یافت.



حسن و همکاران [۹] دو نوع ماده تغییر فاز دهنده را مورد بررسی قرار دادند. آنها در این مطالعه از اسید پالمیتیک به عنوان ماده تغییر فاز دهنده اول و از کلسیم کلراید هگزا هیدرات به عنوان ماده تغییر فاز دهنده دوم استفاده کردند. این آزمون بر روی صفحات ۶۵ وات عایق پلی کریستالی در فضای باز در شهر دویلین در کشور ایرلند و شهر وحری در پاکستان انجام شد. برای شرایط آب و هوایی دویلین، ماده دوم دمایی پایین‌تر از ماده اول را حفظ کرد. صرفه جویی روزانه به طور متوسط ۱٪ برای ماده اول و ۱٫۸٪ برای ماده دوم برای شرایط آب و هوایی دویلین مشاهده شد. برای شرایط آب و هوایی وحری، ماده اول دمای پانل را تا حداکثر ۱۶ درجه سانتی‌گراد و ماده دوم تا دمای ۲۱ نسبت به دمای مرجع ۶۳ درجه سانتی‌گراد درجه کاهش داد. همچنین در نهایت روزانه به طور متوسط ذخیره انرژی ۴٫۴٪ برای ماده اول و ۷٫۷٪ برای ماده دوم برای وحری مشاهده شد. در یک بررسی عددی آریکی و همکاران [۱۰] عملکرد یک سیستم PV-PCM را در دو شهر ترکیه مدلسازی یک بعدی کردند. نتایج نشان می‌دهد درجه حرارت صفحه فتوولتائیک می‌تواند ۲۶/۱۰-۳۱/۰ درجه سانتی‌گراد کاهش یابد. بنابراین متوسط کارایی سالانه تقریباً ۱/۵۹٪ است.

نتایج نشان می‌دهد که مواد تغییر فاز دهنده همراه با چاه حرارتی در بهبود عملکرد قابل توجه است. تعداد فین‌ها، فاصله‌ها و طول آن بر روی هدایت و جابه‌جایی در مواد تغییر فاز دهنده تأثیر می‌گذارد و به این ترتیب تأثیر زمان ذوب و عملکرد تنظیم دما را تحت تأثیر قرار می‌دهند. مواد تغییر فاز دهنده ذوب پایین (حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد) قادر به حفظ درجه حرارت صفحات فتوولتائیک در دامنه دلخواه برای فواصل بسیار کوتاه می‌باشد و پس از ساعت اوج تابش بی‌اثر می‌شود. افزایش ضخامت مواد تغییر فاز دهنده ذوب پایین باعث مشکلات ذوب ناقص می‌شود. از سوی دیگر، مواد تغییر فاز دهنده ذوب بالا (بیشتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد) نمی‌تواند صفحات فتوولتائیک را در دمای مورد نظر ۲۵ درجه سانتی‌گراد حفظ کند، گرچه می‌توان آن را در زیر دمای خاصی برای تمام مدت حفظ کرد. این اساساً به این معنی است که مواد تغییر فاز دهنده ذوب بالا می‌تواند پانل را در دمای کمی بالاتر اما یکنواخت حفظ کرده و مانع از ایجاد نقاط داغ شود، در حالی که مواد تغییر فاز دهنده ذوب پایین می‌تواند پانل را در دمای پایین نگه دارد و در نتیجه آن حداکثر کارایی را می‌دهد اما تنها برای مدت زمانی محدود این امر برقرار می‌باشد. این نشان می‌دهد که استفاده از چند مواد تغییر فاز دهنده با نقاط ذوب متفاوت می‌تواند یک راه حل بهتر باشد. بنابراین باید تعادل بین دمای ذوب مواد تغییر فاز دهنده، ضخامت و راندمان تولید شده ایجاد شود.



شکل ۲: شماتیک استفاده از مواد تغییر فاز دهنده چند لایه به منظور خنک کاری مؤثر [۷].

هیدرات‌های نمک با توجه به هدایت بالای آنها، ظرفیت ذخیره سازی حرارتی بزرگ و افزایش حجم پایین نامزد بالقوه برای خنک سازی صفحات فتوولتائیک می‌باشند. از سوی دیگر مواد تغییر فاز دهنده ارگانیک از هدایت ضعیف، ظرفیت پایین حرارتی و انبساط حجم بالا رنج می‌برند. با وجود هدایت حرارتی کم، بهبود عملکرد با مواد تغییر فاز دهنده ارگانیک مشاهده شده است. این کار به عنوان یک انگیزه قوی برای کار بر روی هیدرات‌های نمکی است که هدایت آن به مراتب



بهتر است در حالی که ارزان تر از مواد تغییر فاز دهنده آلی است [۱۱].

اغلب مطالعات مناسب بودن مواد تغییر فاز دهنده را براساس افزایش مشاهده شده در عملکرد برای مدت زمان مشخص مورد شناسایی قرار می دهند. با این حال انتخاب این مواد، جهت صفحات فتوولتائیک، ضخامت مواد تغییر فاز دهنده، عرض و پارامترهای ترمو فیزیکی تابعی از محل نصب سیستم است. تمام مکان ها ممکن است برای خنک سازی صفحات فتوولتائیک با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده مناسب نباشند. انتخاب این مواد به عنوان یک خنک کننده باید بر اساس تجزیه و تحلیل دقیق شرایط آب و هوایی محل مورد نظر انجام شود.

سازگاری مواد تغییر فاز دهنده برای خنک سازی صفحات فتوولتائیک، تابعی از منطقه جغرافیایی و نوع آرایش برای بهترین عملکرد است. به عنوان مثال این که باید یک سیستم با یک نوع ماده تغییر فاز دهنده یا چند نوع با با چاه حرارتی و غیره انتخاب شود. بنابراین لازم است که سالانه عملکرد مواد تغییر فاز دهنده را آزمایش کرده و تجزیه و تحلیل دقیق انجام دهیم. افزایش در طول عمر صفحات فتوولتائیک و بهره وری به دلیل خنک کاری، زمان بازپرداخت و کسری از سال که تاثیر مواد تغییر فاز دهنده بر عملکرد صفحه فتوولتائیک منفی است بایستی مطالعه شود. این نتایج باید با دقت مورد بررسی قرار گیرد تا در صورت استفاده از این مواد یک انتخاب سازگار با محیط زیست و مناسب به لحاظ معیارهای اقتصادی باشد [۱۱]. با توجه به ظرفیت ذخیره انرژی در واحد جرم تحقیقات زیادی بر روی استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در انرژی خورشیدی صورت گرفته است [۱۲]. همچنین این انرژی می تواند در کاربردهای دیگری مانند پمپ حرارتی [۱۳]، یخچال [۱۴]، گرمایش آب برای مصارف خانگی [۱۵] و [۱۶]، گرمایش فضا [۱۷]، تصفیه آب [۱۸] مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی تجربی

در این تست از دو صفحه فتوولتائیک مشابه با توان بیشینه ۹۰ وات استفاده شده است. یکی از این صفحات به عنوان صفحه مرجع و دیگری به عنوان صفحه خنک کاری شده انتخاب شده است. محفظه خنک کاری در ابعاد $120 \times 50 \times 5$ سانتی متر و از جنس آلومینیوم 1050 با ضخامت 5 میلی متر ساخته شده است. به منظور افزایش سطح تماس از 50 عدد پین استوانه ای آلومینیومی با آرایش منظم و با ضخامت 12 میلی متر و ارتفاع 45 میلی متر استفاده شده است. به منظور قرارگیری پین ها، ابتدا ورق آلومینیومی سوراخ کاری شده و پین ها به صورت فشاری در سوراخ ها جا رفته و سپس از پشت از طریق جوشکاری آلومینیوم به محفظه متصل شده است. در سایر نقاط اتصال در ساخت محفظه نیز از جوشکاری آلومینیوم استفاده شده است. به منظور اتصال محفظه به صفحه فتوولتائیک از اتصال پیچ و مهره و برای آب بندی نیز از چسب اپوکسی رزین استفاده شده است. به منظور خنک کاری از ترکیب آب و نمک با نسبت جرمی 3 به 1 استفاده شده است. آزمایش در دو مرحله بررسی شده است. در این مراحل سعی شده تا علاوه بر بررسی روش خنک کاری و مزایای آن، اثر تغییرات زاویه قرارگیری صفحات نیز بررسی شود. آزمایش در فاصله زمانی 19 خرداد 1398 الی 9 تیر 1398 صورت گرفته است. بر اساس زاویه قرارگیری صفحات، مراحل آزمایش به دو صورت تعریف شده است: 1 -زاویه 45 درجه نسبت به افق 2 -زاویه 25 درجه نسبت به افق.



شکل ۳: محفظه آلومینیومی ساخته شده برای بررسی تجربی.



شکل ۸: جایگاه تست و نحوه قرار گیری صفحات.

پارامترهای اندازه‌گیری شده در این آزمایش عبارت‌اند از: شدت تابش ورودی، ولتاژ و جریان صفحه مرجع، ولتاژ و جریان صفحه خنک‌کاری شده، دمای سطح صفحه مرجع، دمای پشت صفحه مرجع، دمای سطح صفحه خنک‌کاری شده، دمای محفظه خنک‌کاری و دمای محیط. اندازه‌گیری شدت تابش ورودی توسط سولار پاورمتر، ولتاژ و جریان توسط دو عدد مولتی‌متر مشابه، دمای سطح توسط دماسنج لیزری و دمای محیطی توسط دماسنج جیوه‌ای صورت گرفته است. به منظور اندازه‌گیری جریان در هر بار آزمایش از یک مقاومت ۴ اهمی در مدار الکتریکی استفاده شده است. پارامترهای شدت تابش ورودی، ولتاژ، جریان، توان، بازده الکتریکی و دما برای صفحه مرجع و صفحه خنک‌کاری شده اندازه‌گیری و میانگین تمامی داده‌ها به منظور محاسبه نهایی انتخاب شده است.

جدول ۱: مقادیر عدم قطعیت تجهیزات.

مقدار عدم قطعیت	نام تجاری دستگاه	تجهیزات
۹/۲۷ وات بر متر مربع	Lutron SPM-1116SD	تابش سنج
۰/۶۳ درجه سانتی‌گراد	Marmonix MIT-367	ترمومتر لیزری
۰/۰۴۶ ولت	DT9205A Digital Multi meter	ولتاژ
۰/۰۱۳ آمپر	DT9205A Digital Multi meter	جریان
۰/۳۶۸ وات	-	توان
۰/۷۴ درجه سانتی‌گراد	ZEAL ENGLAND	دمای محیط

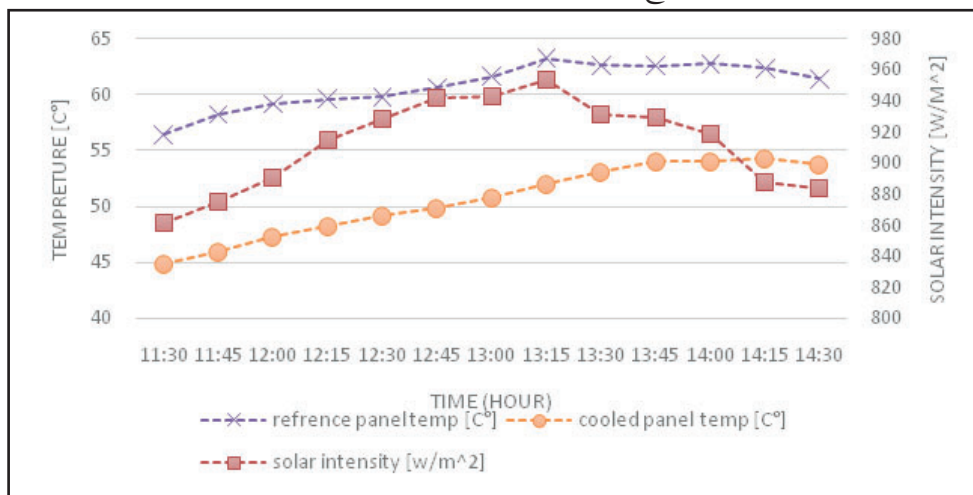
نتایج مرحله اول

این بررسی در بازه زمانی ۱۹ الی ۲۶ خرداد ۹۸ در طی ۵ روز تکرار شده است. همان‌گونه که شکل ۵ نشان می‌دهد بیشترین میزان ثبت شده برای تابش خورشیدی به میزان ۹۵۳ وات بر متر مربع در ساعت ۱۳:۱۵ بوده است. منطبق بر نتایج همین شکل روند تغییرات تابش خورشیدی در غیاب تحولات جوی تا ظهر خورشیدی افزایشی بوده و پس از آن کاهش می‌شود که امری منطقی به نظر می‌رسد. منطبق بر شکل ۵ حداکثر دمای صفحات مرجع و خنک‌کاری شده به ترتیب ۶۳/۲ و ۵۴/۳ درجه سانتی‌گراد ثبت شده‌اند. خنک‌کاری باعث کاهش دما صفحه ثانویه به میزان حداقل ۷/۵۸ درجه سانتی‌گراد و حداکثر ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد ماده خنک‌کاری باعث جذب حرارت اضافی و مانع از افزایش دمای صفحه خنک‌کاری شده است. همان‌گونه که شکل ۵ نشان می‌دهد نمود افزایش دمای صفحات تا زمان افزایش تابش

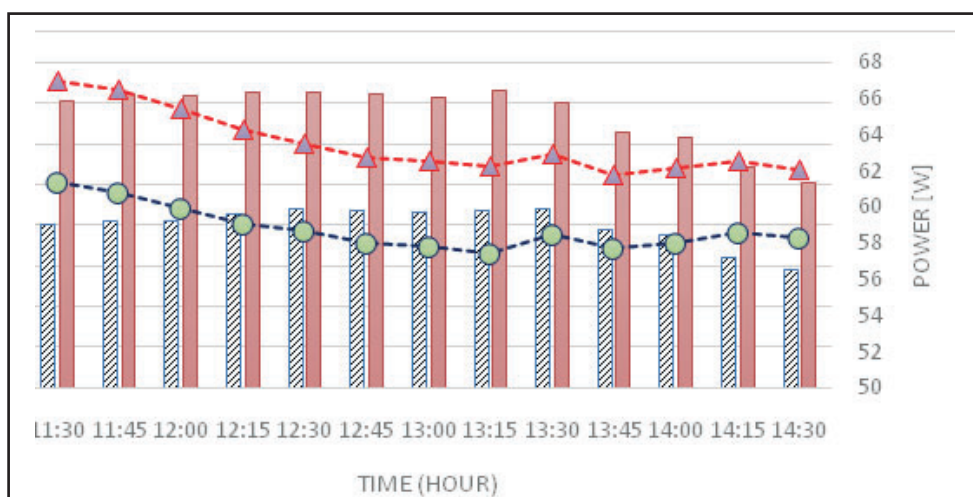


خورشیدی واضح می‌باشد و دمای صفحات تا ساعت ۱۳:۱۵ روندی افزایشی داشته و پس از آن به دلیل کاهش دریافت گرمای خورشیدی روندی کاهشی به خود می‌گیرد.

بر اساس شکل ۶ با توجه به افزایش شدت تابش تا ظهر خورشیدی، توان خروجی صفحات فتوولتائیک نیز افزایش داشته و پس از آن شروع به کاهش می‌کند و با توجه به اینکه آهنگ تغییرات شدت تابش بیشتر از توان خروجی است و ضمن تعریف بازدهی به عنوان توان خروجی به تابش ورودی، بازدهی تا ظهر خورشیدی کاهش داشته و پس از آن روندی افزایشی می‌گیرد. منطبق بر همین شکل کمترین میزان افزایش بازدهی ساعت در ۱۴:۳۰ به میزان ۸/۵۴ درصد و بیشترین افزایش بازدهی در ساعت ۱۱:۴۵ به میزان ۱۲/۱ درصد بوده است. همان‌گونه که شکل ۶ نشان می‌دهد تأثیر خنک‌کاری در افزایش توان الکتریکی مشهود است. تفاوت در توان الکتریکی و بازده تولید انرژی با توجه به دمای صفحات توجه‌پذیر می‌باشد. کمترین و بیشترین افزایش توان صفحه خنک‌کاری نسبت به صفحه مرجع به ترتیب برابر با ۴/۸ و ۷/۲ وات ثبت شده است.



شکل ۵: نمودار تابش خورشیدی و دمای صفحات فتوولتائیک در مرحله اول بررسی.



شکل ۶: نمودار توان خروجی و بازدهی الکتریکی صفحات فتوولتائیک در مرحله اول بررسی.

با استفاده از روابط انتقال حرارت و همچنین به واسطه پارامترهای در دست دمای سطح صفحه فتوولتائیک خنک‌کاری شده در حضور و عدم حضور پره‌های به کار رفته از این طریق پیش‌بینی و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. در همین راستا نیاز است تا بالانس انرژی برای مجموعه نوشته شود.



$$Q_{solar} = Q_{elect} + Q_{lost_surface} + Q_{lost_back} \quad (1)$$

در این معادله منظور از انرژی خورشیدی ورودی به مجموعه، انرژی الکتریکی خروجی از مجموعه، گرمای دفع شده به محیط از سطح پنل و گرمای دفع شده به محیط از سطح پشتی پنل می‌باشد. گرمای دفع شده از سطوح پنل از طریق دو مکانیزم جابه‌جایی و تشعشعی می‌باشد. برای محاسبه حرارت دفع شده از سطوح بالا و پشت به محیط از طریق جابه‌جایی، نیاز است تا ابتدا ضریب جابه‌جایی آزاد محاسبه شود. بدین منظور از رابطه چرچیل و چاو [۱۹] مطابق روابط (۲) الی (۵) استفاده شده است.

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (\frac{0.492}{Pr})^{9/16}]^{0.25}} \right\} \quad (2)$$

$$Ra_L = Gr_L \times Pr \quad (3)$$

$$Gr_L = \frac{g \beta \cos \theta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \quad (4)$$

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}}{k} L \quad (5)$$

با محاسبه ضریب جابه‌جایی آزاد از سطح پنل، گرمای مبادله شده از این طریق را می‌توان طبق معادله زیر به دست آورد.

$$Q_{free_convection} = \bar{h} A_{pv} (T_s - T_{amb}) \quad (6)$$

میزان حرارت دفع شده به محیط از طریق مکانیزم تشعشعی را می‌توان از طریق رابطه (۷) بدست آورد.

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (7)$$

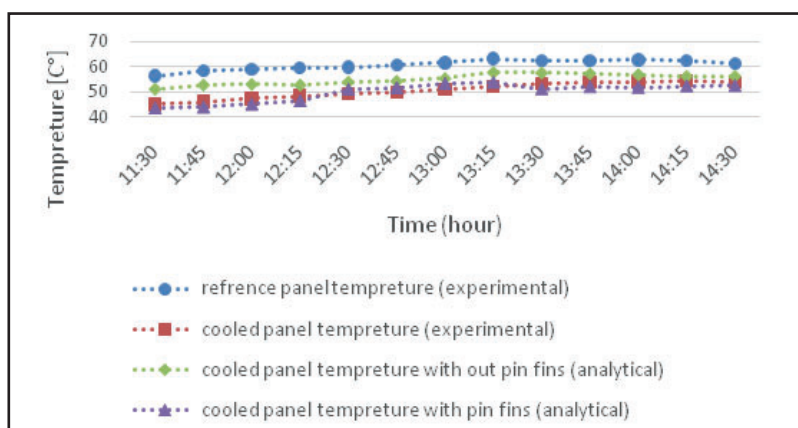
برای بررسی اثر افزودن فین‌ها و دفع حرارت به ازای هر فین از روابط (۸) الی (۱۰) استفاده شده است [۲۰].

$$q_{fin} = \sqrt{hp k A_c} \theta_b \frac{\sinh mL + (\frac{h}{mk}) \cosh mL}{\cosh mL + (\frac{h}{mk}) \sinh mL} \quad (8)$$

$$m^2 = \frac{hp}{k A_c} \quad (9)$$

$$\theta_b = T_b - T_\infty \quad (10)$$

محاسبات فوق برای هر یک از نقاط تست انجام شده است. همانگونه که شکل (۷) نشان می‌دهد، دمای صفحه خنک‌کاری شده در حضور پره نسبت به روش خنک‌کاری بدون پره به طور میانگین ۴٫۴ درجه سانتی‌گراد کاهش بیشتری داشته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر تحلیلی و تجربی برای دمای سطح صفحه خنک‌کاری شده حداکثر ۵ درصد اختلاف دارند.

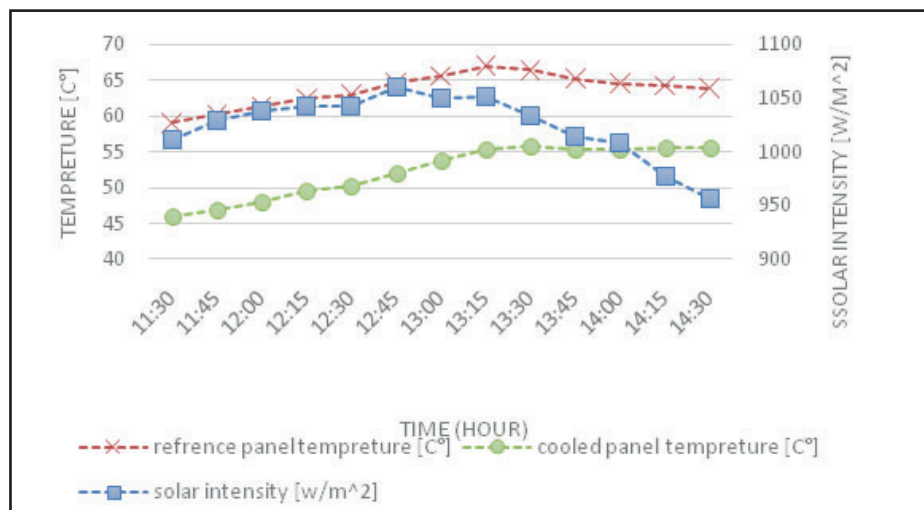


شکل ۷: نمودار دمای صفحه مرجع و خنک‌کاری شده به روش تجربی و دمای پیش‌بینی شده به روش تحلیلی برای صفحه خنک‌کاری شده در حضور و عدم حضور پره در مرحله اول بررسی.

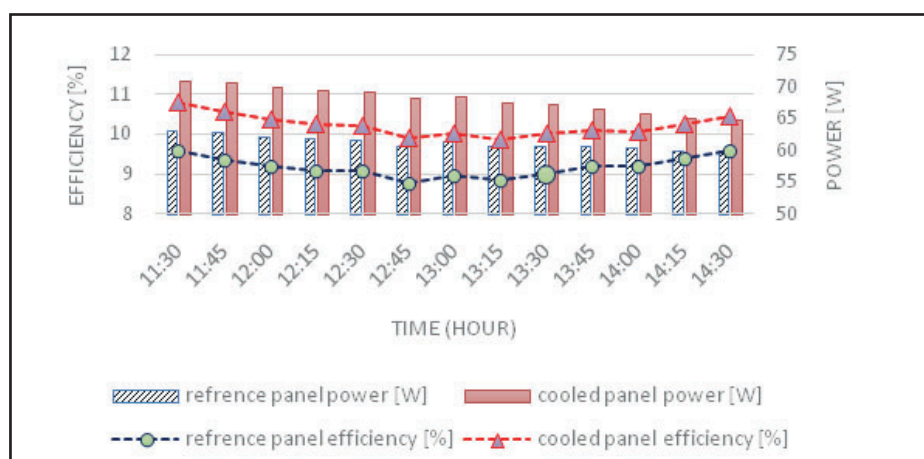


نتایج مرحله دوم

این بررسی در بازه زمانی ۲۷ خرداد ۹۸ الی ۹ تیر ۹۸ در طی ۵ روز تکرار شده است. همانند مرحله اول پارامترهای شدت تابش ورودی، ولتاژ، جریان، توان، بازده الکتریکی و دما برای صفحه مرجع و صفحه خنک کاری شده اندازه گیری و میانگین تمامی داده ها به منظور محاسبه نهایی انتخاب شده است. همان گونه که شکل ۸ نشان می دهد بیشترین میزان ثبت شده برای تابش خورشیدی به میزان ۱۰۶۰ وات بر متر مربع بوده است. بر اساس شکل ۸ حداکثر دمای صفحات مرجع و خنک کاری شده به ترتیب ۶۷ و ۵۵٫۷ درجه سانتی گراد ثبت شده اند. خنک کاری باعث کاهش دما صفحه ثانویه به میزان حداقل ۸/۲ درجه سانتی گراد و حداکثر ۱۳/۳ درجه سانتی گراد شده است. بر اساس شکل ۹ کمترین میزان افزایش بازدهی در ساعت ۱۴:۳۰ به میزان ۸/۸ درصد بیشترین افزایش بازدهی در ساعت ۱۲:۰۰ به میزان ۱۲/۹ درصد بوده است. کمترین و بیشترین افزایش توان صفحه خنک کاری نسبت به صفحه مرجع به ترتیب برابر با ۵/۲ و ۸ وات ثبت شده است.



شکل ۸: نمودار تابش خورشیدی و دمای صفحات فتوولتائیک در مرحله دوم بررسی.

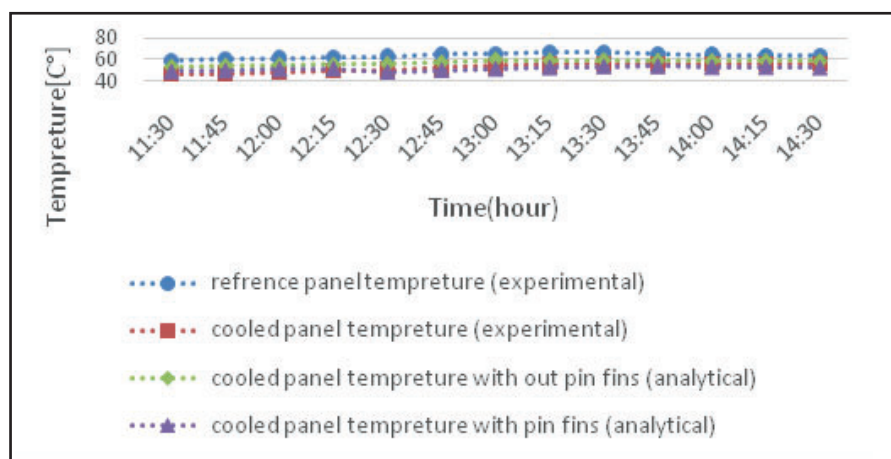


شکل ۹: نمودار توان خروجی و بازدهی الکتریکی صفحات فتوولتائیک در مرحله دوم بررسی.

مشابه مرحله اول، به کمک روابط انتقال حرارت برآورد دمای سطح پنل خنک کاری شده در حضور و عدم حضور پره انجام شده و نتایج آن طی شکل ۱۰ آورده شده است. بر اساس نتایج این شکل، افزودن پره سبب



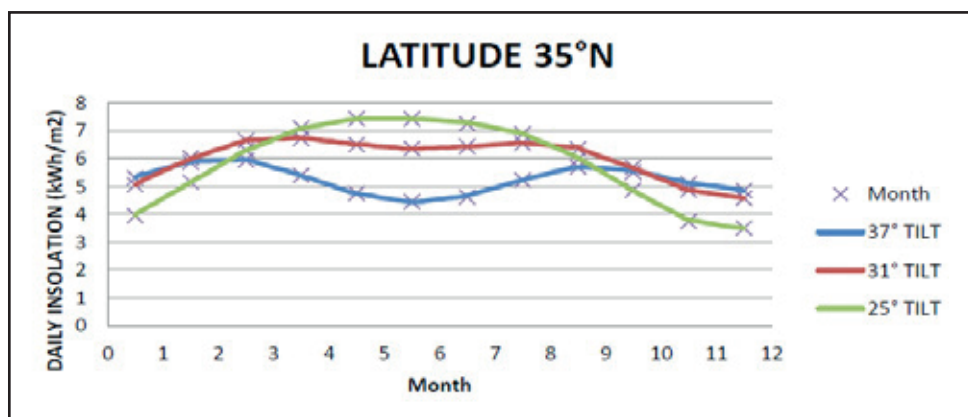
شده تا دمای سطح پنل خنک‌کاری شده به طور میانگین $5/7$ درجه سانتی‌گراد کاهش بیشتری داشته باشد. همچنین مقادیر تجربی و تحلیلی دمای سطح پنل خنک‌کاری حداکثر دارای $6/2$ درصد اختلاف می‌باشند.



شکل ۱: نمودار دمای صفحه مرجع و خنک‌کاری شده به روش تجربی و دمای پیش‌بینی شده به روش تحلیلی برای صفحه خنک‌کاری شده در حضور و عدم حضور پره در مرحله دوم بررسی.

مقایسه مراحل آزمایش

گذر از زاویه 45 درجه به 25 درجه منجر به دریافت تابش خورشیدی بیشتری در طول آزمایش شده و به همین دلیل با افزایش دریافت گرمای خورشیدی، صفحات مرجع و خنک‌کاری شده دمای بالاتری را به ثبت رسانده‌اند. افزایش دمای کاری صفحات فتوولتائیک در مرحله دوم منجر شده است تا خنک‌کاری در این روش مؤثرتر واقع شود و شاهد تنظیم دمای بیشتر و در نتیجه افزایش بازدهی الکتریکی و افزایش توان بیشتری در مرحله دوم بررسی باشیم. در مطالعه کریمی نژاد و همکاران [۲۱] بررسی زاویه بهینه صفحات فتوولتائیک برای تمام سال با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده است. در این مقاله الگوریتم بهینه‌سازی زاویه صفحات خورشیدی با توجه به قیود زاویه ارتفاع و زاویه گرای خورشید ارائه شده است که با داشتن طول و عرض جغرافیایی یک منطقه می‌توان بهترین زاویه برای یک صفحه خورشیدی ثابت را محاسبه کرد. محاسبات مربوط به نیروگاه خورشیدی ۱۵ کیلووات دانشگاه سمنان است و نتایج به دست آمده از این مقاله با بازده نیروگاه مقایسه شده است و جواب‌ها با ضریب خطای خیلی کمی به دست آمده است.



شکل ۱۱: نمودار تابش کل خورشیدی بر سلول خورشیدی [۲۲].



اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه، بیانگر این مطلب هستند که زاویه سمت سطح و زاویه بهینه برای صفحات خورشیدی رو به جنوب وابسته به عرض جغرافیایی است و برای دریافت بیشینه انرژی خورشیدی در یک زاویه ثابت بهتر است زاویه صفحات خورشیدی بر این اساس تنظیم شوند. اما پیشنهاد می شود تا در غیاب سیستم دنبال کننده خورشید مجموعه خورشیدی قابلیت تنظیم زاویه تا ۱۰ درجه بالاتر و پایین تر از عرض جغرافیایی منطقه را داشته باشد. نتایج به دست آمده از این مقاله نشان می دهد که دریافت بیشترین انرژی از تابش خورشید در ماه های مختلف سال در زوایای مختلفی صورت می گیرد، که با عرض جغرافیایی سمنان (۳۵ درجه) متفاوت است. در راستای رسیدن به این نتیجه تابش کل که مجموعی از تابش مستقیم، تابش پراکندگی و تابش انعکاسی می باشد برای طی یک سال بر طبق فرمول های ارائه شده و محاسبات ریاضی در نرم افزار متلب پیش بینی شده و نتیجه آن آورده شده است. محاسبات برای سه زاویه نزدیک به عرض جغرافیایی شهر سمنان انجام شده است. بر اساس نتایج در بازه زمانی آزمایش که ماه ژوئن بوده است، زاویه مناسب برای دریافت حداکثر انرژی خورشیدی ۲۵ درجه می باشد. اما با گذر زمان در فصول سرد سال بهتر است تا این زاویه افزایش یابد. به همین دلیل مجموعه خورشیدی بر این مینا ساخته شده است که قابلیت تنظیم زاویه از ۲۵ تا ۴۵ درجه را داشته باشد و دلیل انتخاب دو مرحله آزمایش نیز بر این مینا بوده است. بنابراین به سبب هزینه ای که صرف خرید تجهیزات اولیه و تجهیزات خنک کاری می شود نیاز است تا خروجی مطلوب نیروگاه و بازدهی اقتصادی مجموعه به حداکثر رسانده شود تا کوتاه ترین دوره بازگشت سرمایه به دست آید. در همین راستا در غیاب سیستم های ردیاب بهتر است با صرف هزینه اندکی سیستم های ثابت شده در عرض جغرافیایی منطقه را به سیستم هایی با زاویه متغیر در محدوده ۱۰ درجه بیشتر و کمتر نسبت به عرض جغرافیایی منطقه مبدل کرد.

نتیجه گیری

با توجه به اینکه دمای کاری صفحات فتوولتائیک در عملکرد آنها بسیار تاثیر گذار هستند، هر گونه افزایش دما از ۲۵ درجه سانتی گراد باعث کاهش بازده آنها می شود و خسارات جبران ناپذیری را به مصالح سلول های فتوولتائیک وارد می کند. بنابراین برای غلبه بر این تاثیرات و حفظ دمای کاری سلول های فتوولتائیک و توان تعیین شده تولید توسط سازنده، دفع حرارت از سلول های فتوولتائیک ضرورت دارد. بنابراین خنک کاری این صفحات تاثیر مستقیم و مهمی در بهبود بازده تبدیل الکتریکی دارد. حضور تکنولوژی مواد تغییر فاز دهنده در این نوع از روش ها تحول خاصی محسوب می شود. این تکنولوژی ضمن افزایش قابل توجه بازدهی، راه حل جذابی به منظور مقابله با اتلاف آب در سایر روش های خنک کاری با آب ارائه می کند و از طرفی مواد تغییر فاز دهنده ظرفیت گرمایی چند برابر بیشتر از سیستم های آب و هوا را دارند. علاوه بر این، حرارت ذخیره شده را می توان در طول شب بدون تلفات حرارت استفاده کرد. حرارت ذخیره شده می تواند برای تهویه مطبوع یا گرمایش آب استفاده شود که باعث افزایش کارایی کلی سیستم می شود و هزینه موثر آن را کاهش می دهد. بررسی تجربی خنک کاری توسط مواد تغییر فاز دهنده در دو مرحله انجام شده است. مقایسه پارامترهای بازدهی الکتریکی و توان خروجی صفحات فتوولتائیک بهبود قابل توجهی در کارایی این صفحات را نشان می دهد، به گونه ای که به طور میانگین در مرحله اول ۱۱/۸۳ درصد و در مرحله دوم ۱۱/۴ درصد افزایش بازدهی مشاهده شده است. بررسی تحلیلی از تخمین دمای سطح صفحه فتوولتائیک خنک کاری شده نیز انجام شده و با دمای اندازه گیری شده به روش تجربی مقایسه شده است. مقایسه نتایج نشان دهنده این موضوع است که نتایج حاصل به روش تجربی در محدوده قابل توجهی قرار دارد.



فهرست علائم

عدد ناسلت	Nu
عدد رایلی	Ra
عدد پرانتل	Pr
عدد گرافش	Gr
نیروی جاذبه	g [m/s ²]
ضریب انبساط گرمایی حجمی	β [1/K]
زاویه پنل با محور عمود	θ [°]
دمای سطح پنل	T_s [°C]
دمای سیال در تماس با پنل	T_∞ [°C]
طول پنل	L [m]
ویسکوزیته سینماتیکی	ν [m ² /s]
ضریب هدایت حرارتی	K [W/m.k]
گرمای مبادله شده از طریق مکانیزم جابه جایی آزاد	$Q_{\text{free_convection}}$ [W]
ضریب جابه جایی	h [W/m ² k]
مساحت سطح پنل	A_{pv} [m ²]
دمای محیط	T_{amb} [°C]
گرمای مبادله شده از طریق مکانیزم تشعشعی	Q_{rad} [W]
ضریب صدور جسم	ε [W/m ² K ⁴]
ثابت بولتزمن	σ [J/K]
گرمای مبادله شده فین	q_{fin} [W]
سطح مقطع فین	A_c [m ²]
محیط فین	P [m]
دمای پایه فین	T_b [°C]
دمای سیال در تماس با فین	T_f [°C]

مراجع

1. Conti, J., Holtberg, P., Diefenderfer, J., LaRose, A., Turnure, J. T., Westfall, L. (2016). International energy outlook 2016 with projections to 2040 (No. DOE/EIA-0484 (2016)). USDOE Energy Information Administration (EIA), Washington, DC (United States). Office of Energy Analysis.
2. Feldman, D. J., Margolis, R. M. (2019). Q4 2018/Q1 2019 Solar Industry Update (No. NREL/



- PR-6A20-73992). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
3. Reddy, S. R., Ebadian, M. A., Lin, C. X. (2015). A review of PV-T systems: Thermal management and efficiency with single phase cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 91, pp 861-871.
 4. Bruno, F. (2004). Using Phase Change Materials (PDMs) for Space Heating and Cooling in Buildings (Doctoral dissertation, Airah Publications).
 5. Chen, C., Guo, H., Liu, Y., Yue, H., Wang, C. (2008). A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard. *Energy and Buildings*, 40(5), pp 882-890.
 6. Farid, M. M., Chen, X. D. (1999). Domestic electrical space heating with heat storage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 213(2), pp 83-92.
 7. Ho, C. J., Chou, W. L., Lai, C. M. (2015). Thermal and electrical performance of a water-surface floating PV integrated with a water-saturated MEPCM layer. *Energy Conversion and Management*, 89, pp 862-872.
 8. Indartono, Y. S., Suwono, A., & Pratama, F. Y. (2016). Improving photovoltaics performance by using yellow petroleum jelly as phase change material. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 11(3), pp 333-337.
 9. Hasan, A., McCormack, S. J., Huang, M. J., Norton, B. (2014). Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (PV-PCM) system through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics. *Energies*, 7(3), pp 1318-1331.
 10. Arıcı, M., Bilgin, F., Nižetić, S., Papadopoulos, A. M. (2018). Phase change material based cooling of photovoltaic panel: A simplified numerical model for the optimization of the phase change material layer and general economic evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 189, pp 738-745.
 11. Chandel, S. S., Agarwal, T. (2017). Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, pp 1342-1351.
 12. Pandey, A. K., Hossain, M. S., Tyagi, V. V., Abd Rahim, N., Jeyraj, A., Selvaraj, L., & Sari, A. (2018). Novel approaches and recent developments on potential applications of phase change materials in solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, pp 281-323.
 13. Obalanlege, M. A., Mahmoudi, Y., Douglas, R., Ebrahimnia-Bajestan, E., Davidson, J., & Bailie, D. (2020). Performance assessment of a hybrid photovoltaic-thermal and heat pump system for solar heating and electricity. *Renewable Energy*, 148, pp 558-572.
 14. Daghigh, R., & Khaledian, Y. (2018). A novel photovoltaic/thermoelectric collector combined with a dual-Evaporator vapor compression system. *Energy Conversion and Management*, 158, pp 156-167.
 15. Kalogirou, S. A., & Tripanagnostopoulos, Y. (2006). Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy conversion and management*, 47(18-19), pp 3368-3382.
 16. Palacio, M., Rincón, A., & Carmona, M. (2020). Experimental comparative analysis of a flat plate solar collector with and without PCM. *Solar Energy*, 206, pp 708-721.
 17. Huang, M. J., Eames, P. C., & Norton, B. (2006). Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics. *Solar Energy*, 80(9), 1121-1130.
 18. Mittelman, G., Kribus, A., Mouchtar, O., & Dayan, A. (2009). Water desalination with



concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) systems. *Solar Energy*, 83(8), pp 1322-1334.

19. Churchill, S. W., & Chu, H. H. (1975). Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. *International journal of heat and mass transfer*, 18(11), pp 1323-1329.

20. Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.

۲۱. فرهاد کریمی نژاد، رضا کی پور. ۱۳۹۳. محاسبه زاویه بهینه پنل‌های نیروگاه فتوولتائیک برای تمام سال با استفاده از الگوریتم ژنتیک. اولین کنفرانس و نمایشگاه بین‌المللی انرژی خورشیدی.