



بررسی تجربی تاثیر همزمان خنک کاری پنل های فتوولتائیک توسط ماده تغییر فاز دهنده و جریان هوا جهت افزایش بازدهی الکتریکی

مرضیه لطفی^{1*}، احمدرضا نوروزی²، یاسین چماعی نژاد³

1- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

2- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

3- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور، دزفول، ایران

* پست الکترونیکی نویسنده عهده دار مکاتبات: Marzieh.lotfi@jsu.ac.ir

چکیده

طی سالیان اخیر، تولید برق از طریق نیروگاه‌های فتوولتائیک بخوبی جایگاه خود را بین سرمایه‌گذاران حوزه انرژی تثبیت کرده است. در دسترس بودن نور خورشید و بازگشت سرمایه مناسب، دو عامل مهم در رشد چشمگیر احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک در جهان است. علی‌رغم این مزایا، افزایش دما در سلول‌های فتوولتائیک از نقاط ضعف اصلی آن‌هاست بطوریکه به شدت بر بازدهی الکتریکی پنل‌ها تاثیر منفی دارد. در این مقاله به صورت تجربی، اثر استفاده از پارافین به عنوان ماده تغییر فازدهنده بر دمای سلول‌های فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن، اثر جریان هوا در دو سرعت مختلف 2 و 4 کیلومتر در ساعت در حضور پارافین با نقطه ذوب 58 درجه سانتی گراد آزمایش شده است. تمامی آزمایشات در محیط شبیه سازی شده صورت پذیرفتند تا بتوان مدیریت بهتری بر شرایط محیطی داشت. بدین منظور، نور و گرمای خورشید توسط یک پروژکتور و جریان باد نیز توسط یک دمنده صنعتی تامین شد. نتایج، نشان دهنده کاهش 13 تا 16 درجه سانتی گراد در دمای پنل فتوولتائیک برای سه حالت مورد بررسی، نسبت به حالت مبنا بوده است. به علاوه، بیشینه اختلاف بازدهی بین پنل حاوی ماده تغییر فاز دهنده و پنل عادی، یک درصد بود که این مقدار منجر به افزایش توان تولیدی به میزان بیش از 10 درصد شده است. در انتها نیز با بررسی اثرات زیست محیطی احداث یک نیروگاه 10 کیلوواتی با استفاده از نرم افزار RETScreen و برای 4 حالت مورد بحث، کاهش سالانه انتشار کربن دی اکسید نیز تخمین زده شده است.

کلیدواژه‌گان: فتوولتائیک، مواد تغییر فازدهنده، بازدهی الکتریکی، انرژی خورشیدی، محیط زیست

An Experimental Study on Simultaneous Use of Phase Change Material and Wind Stream to Increase Electrical Efficiency of Photovoltaic Module

Marzieh Lotfi^{1*}, Ahmad Reza Norouzi², Yasin Chamaei-Nejad³

1- Assistant professor, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

2- BSc. Student, Department of Chemical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

3- BSc. Student, Department of Mechanical Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

* Corresponding author: marzieh.lotfi@jsu.ac.ir

Received: 9 April 2023 Accepted: 2 Jan. 2023

Abstract

In recent years, generation of electricity through photovoltaic power plants has developed rapidly. The availability of sunlight and the appropriate return on investment are two important factors in the impressive growth of photovoltaic (PV) power plants. Unfortunately, increase in PV cell temperature is one the main defects of them and it has a significant negative effect on the electrical efficiency of PV panels. In this paper, using paraffin as phase change material (PCM) on the performance of photovoltaic cells has been investigated experimentally. The material has melting point of about 58°C. Also, the effect of airflow at two different velocities of 2 and 4 km/h in presence of paraffin have been tested, too. To have a better management on performing the tests, a solar simulator was used. Results showed 13-16°C decrease in PV

temperature for the three modified cases, in comparison with the conventional one. Moreover, the effect of mentioned temperature reduction on both electrical efficiency and output power were also studied. Finally, the environmental effects of commissioning a 10-kW PV power plant were checked by using RETScreen software. Accordingly, the annual reduction of carbon dioxide (CO₂) emission is estimated for all considered cases.

Keywords: Photovoltaics, Phase change materials, Electrical efficiency, Solar energy, Environment

1- مقدمه

انرژی، به جزیی جدایی ناپذیر از زندگی امروزی بشر تبدیل شده است. طی سالیان اخیر به دلیل آلودگی های ناشی از احتراق سوخت های فسیلی و علاوه بر آن رو به اتمام بودن ذخایر جهانی سوخت های فسیلی، انرژی های نو در حال جایگزین شدن با روش های سنتی تولید الکتریسیته هستند. منابع آبی، بادی، خورشیدی، زمین گرمایی از جمله منابع تجدیدپذیری هستند که بسیار مورد توجه دولت ها قرار گرفته اند. از این میان، انرژی خورشیدی بیش از سایر روش ها مورد استقبال قرار گرفته و استفاده از آن به سرعت در کاربردهای مختلف در حال گسترش است [1]. دلایل اصلی این گرایش، در دسترس بودن نور و گرمای خورشید در اکثر نقاط جهان و در کنار آن، صرفه اقتصادی احداث نیروگاه های خورشیدی، نسبت به سایر انواع انرژی است. در کنار مزایای گفته شده، معایبی هم در سیستم های خورشیدی وجود دارد. تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته با استفاده از پنل های فتوولتائیک صورت می گیرد. این پنل ها عمری طولانی دارند اما افزایش دما در آن ها بعنوان یکی از نقاط ضعفشان محسوب می شود. به بیان دقیق تر، زمانی که دمای سلول های فتوولتائیک افزایش یابد بازده الکتریکی آن ها کاهش پیدا می کند. مقدار کاهش بازده الکتریکی در پنل های سیلیکونی 0/45 درصد [2، 3] و در پنل های غیر سیلیکونی 0/25 درصد [4] به ازای هر درجه سانتی گراد افزایش دمای سلول هاست. روش های زیادی برای برطرف کردن این مشکل مورد تحقیق و توسعه قرار گرفته اند که می توان به استفاده از جریان هوا [5]، تشکیل لایه نازک آب بر سطح پنل [6]، استفاده از ترموالکتریک [7]، استفاده از نانوسیال [8، 9] و به کار بردن پره بر صفحه پشت پنل [10] اشاره کرد. هر یک از این روش ها معایب و مزایایی دارند که در ادامه به معرفی برخی از مطالعات در این زمینه (در راستای موضوع این مقاله) پرداخته شده است.

سرحدی و همکاران [11] به بررسی تاثیر سرعت وزش باد بر بازدهی کلی پنل فتوولتائیک پرداختند. بازدهی کلی، شامل بازدهی الکتریکی و حرارتی می باشد. آن ها نشان دادند که با افزایش سرعت وزش باد، بازدهی الکتریکی افزایش یافته ولی بازدهی حرارتی، روند کاهشی شدیدی را نشان می دهد. در نتیجه، افزایش سرعت وزش باد، منجر به کاهش بازدهی کلی سیستم شده است. در پژوهشی دیگر، نقوی و همکاران [12] نیز به بررسی تجربی خنک کاری پنل های فتوولتائیک با استفاده از جریان هوای طبیعی پرداختند. طبق نتایج پژوهش آن ها، نشان داده شد که در نظر گرفتن فاصله ای 20 سانتی متری بین پنل فتوولتائیک و سازه ی شیروانی سقف ساختمان، می تواند موجب کاهش دمای پنل ها تا 12 درجه سانتی گراد شود. پاشش آب، راه دیگری است که برای خنک کردن سطح پنل پیشنهاد شده است. علاوه بر نرخ انتقال حرارت بالای آب می توان به ضریب هدایتی بالای آن نیز اشاره کرد که نسبت به جا- به جایی اجباری و طبیعی هوا برتری دارد. علاوه بر آن سطح پنل همیشه تمیز می ماند و گرد و غباری بر روی آن باقی نمی ماند. به عنوان مثال، کراوتر و

همکاران [13] از سیستم گردش آب به منظور خنک کاری پنل فتوولتائیک استفاده کردند و نتایج نشان داد که راندمان الکتریکی آن بین 8 تا 9 درصد افزایش داشته است. از معایب اصلی این روش، می توان به هزینه اولیه بالا و هزینه تعمیرات و نگهداری پمپ آب اشاره کرد. بعلاوه، مقدار آب مصرفی نیز نسبتاً زیاد می باشد.

مغرابی و همکاران [14] به بررسی تجربی تاثیر دو مولفه ضخامت ماده تغییر فاز دهنده (1، 2 و 3 سانتی متر) و زاویه پنل نسبت به سطح زمین (15، 20، 25 و 30 درجه) بر فرایند ذوب و دمای پنل پرداختند. نشان داده شد که در تمامی حالات، دمای بخش های بالایی پنل بیش تر از بخش های پایینی است، چرا که آن قسمت از ماده تغییر فاز دهنده که ذوب شده است، در سطح بالاتری از محفظه قرار می گیرد و لذا قابلیت افزایش دمای بیشتری نسبت به بخش جامد دارد. نتایج همچنین نشان دهنده ی تاثیر مثبت و چشمگیر افزایش ضخامت ماده تغییر فاز دهنده در فرایند خنک کاری پنل بوده است. چوبینه و همکاران [15] تحقیقاتی در زمینه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده انجام دادند. آن ها از نمک هیدراته که دارای نقطه ذوب 32 درجه سانتی گراد به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده کردند، بدین صورت که نمک هیدرات را در محفظه ای به ضخامت هشت میلی متر که بر پشت پنل نصب شده بود، تزریق کردند. نتایج نشان داد که استفاده از این نوع ماده تغییر فاز دهنده در کاهش دمای پنل موثر بوده و دما را تا 8/8 درجه سانتی گراد کاهش داده است. بریا و همکاران [16] نیز تاثیر همزمان استفاده از RT42 بعنوان ماده تغییر فاز دهنده و پره در خنک کاری پنل ها پرداختند. آن ها با استفاده از کد نویسی UDF اقدام به انجام پژوهش خود نمودند و گستره نسبتاً وسیعی از ضخامت های ماده تغییر فاز دهنده را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که در بهترین حالت، 32 درجه سانتی گراد نسبت به حالت مرجع کاهش دما رخ داده است. در پژوهشی دیگر، هاشم و همکاران [17] ژله نفت سفید و ترکیب ژله نفت سفید/ مس/ گرافیت را به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در پنل به کار بردند و پس از انجام آزمایشات مربوطه، دریافتند که دمای پنل با ژله نفت سفید 3٪ و با ماده تغییر فاز دهنده ترکیبی 5/8٪ کاهش یافته است. فیروززاده و همکاران [18] استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و پره را پیشنهاد کردند. آن ها از سه پنل یکسان ولی با شرایط متفاوت استفاده کردند. پنل عادی، پنل با پلی اتیلن گلایکول 600 و پنل با پلی اتیلن گلایکول 600 و پره، سه پنیلی بود که بر روی آن ها آزمایشاتی انجام دادند. پس از انجام آزمایش مشخص شد که دمای پنل دوم نسبت به پنل اول 18/6 درجه سانتی گراد و دمای پنل سوم نسبت به پنل اول 34/1 درجه سانتی گراد کاهش داشته است. در نتیجه ی کاهش دمای مذکور، افزایش بازدهی الکتریکی به میزان 2/4٪ و 4/6٪ برای پنل های مذکور گزارش شد. در ادامه، آن ها در پژوهشی مجزا [19] به بررسی تاثیر وجود محیط متخلخل در ماده تغییر فاز دهنده پرداختند. در این راستا، دو ضخامت 0.5 و 2 سانتی متری از محیط از یک تخلخل آلومینیومی مورد

ارزیابی قرار گرفتند. دلیل استفاده از محیط متخلخل درون ماده تغییر فاز

جدول 1 مشخصات الکتریکی پنل فتوولتائیک

پارامتر	نماد	یکا	مقدار
توان نامی	P_{max}	W	60
بازدهی نامی	η_{max}	%	14/4
ولتاژ در بیشینه توان	V_{mpp}	V	18/47
جریان در بیشینه توان	I_{mpp}	A	3/25
ولتاژ مدار باز	V_{oc}	V	22/86
جریان اتصال کوتاه	I_{sc}	A	3/44

جدول 2 ابعاد و جرم دقیق پنل های مورد استفاده

پارامتر	مقدار	یکا
ابعاد (طول/عرض/ارتفاع)	25/630/660	میلی متر
جرم	4/97	کیلوگرم

جدول 3 مشخصات حسگرهای دمایی مورد استفاده

حداقل دمای قابل اندازه گیری (°C)	حداکثر دمای قابل اندازه گیری (°C)	دقت اندازه گیری (°C)
-55	125	0/1

دهنده، آن است که ماده تغییر فاز دهنده دارای رسانش حرارتی پایینی است. لذا بخشی از ماده بصورت جامد باقی می ماند و تغییر فازی در آن صورت نمی پذیرد. تایج حاکی از آنست که در حالتی که از تخلخل با ضخامت 2 سانتی متری درون پارافین استفاده شد، دمای پنل تا 21 درجه سانتی گراد کاهش یافت. ابراهیمی [20] ابتدا از پارافین و سپس از مخلوط پارافین - نانوذرات اکسید مس بعنوان عامل خنک کاری پنل های فتوولتائیک استفاده نمود. در حالات مذکور، دمای پنل به ترتیب 10/24 و 15/44 درجه سانتی گراد کاهش یافته است. همچنین بایگانی و عاملی [21] از پلی اتیلن گلایکول 1000 استفاده نمودند و نتایج نشان داد که دمای پنل 15 درجه سانتی گراد کم شد و بازدهی آن 8٪ بهبود را نشان داده است. سردارآبادی و همکاران [22] نیز سیستم خنک کاری مبتنی بر نانوسیال اکسید روی و پارافین را طراحی کردند. آزمایشات آن ها در اقلیم آب و هوایی مشهد انجام شد. برای داده برداری از دو عدد پنل مونوکریستال 40 واتی استفاده نمودند. پس از انجام آزمایشات، بازده پنل، افزایشی 13 درصدی را نسبت به پنل عادی نشان داد. اطلاعات تکمیلی در خصوص روش های مختلف استفاده از مواد تغییر فازدهنده در سیستم های فتوولتائیک در مراجع [23] قابل مطالعه است.

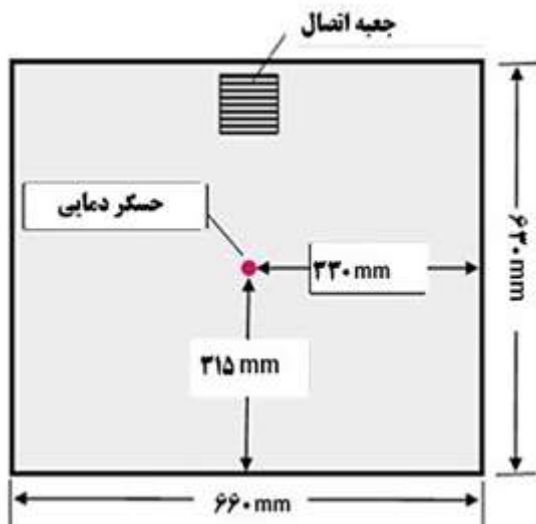
در این پژوهش، استفاده همزمان مواد تغییر فاز دهنده و جریان هوا را در خنک کاری پنل های فتوولتائیک مورد ارزیابی و آزمایش قرار گرفته اند. بر اساس مطالعات صورت گرفته مشخص شد که استفاده همزمان از ماده تغییر فازدهنده و جریان هوا مورد مطالعه محققین قرار نگرفته است و در این مقاله تاثیر همزمان این دو عامل را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار می دهد. در این راستا جریان باد با دو سرعت مختلف بر روی پنل اعمال می شود. این آزمایشات در حالات مختلف از جایجایی اجباری هوا انجام شده اند که نتایج آن ها با یکدیگر مقایسه خواهند شد.

2- توصیف مجموعه تحت آزمایش

2-1- اجزای دستگاه آزمایش

در این تحقیق پنل فتوولتائیک 60 واتی پلی کریستال، ساخت شرکت چینی *Yingli Solar* مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات الکتریکی و فیزیکی پنل مورد استفاده در جداول 1 و 2 ذکر شده است. در این پژوهش به جای نور و گرمای خورشید، از یک پروژکتور یک کیلوواتی استفاده شده است که با تغییر فاصله پروژکتور با سطح پنل می توان تابش و گرمای متفاوتی را به سطح پنل اعمال کرد.

دیتالاگر استفاده شده در این پژوهش یک دیتالاگر 7 کاناله شامل 4 عدد حسگر دمایی و 3 عدد حسگر الکتریکی می باشد. پس از اتمام هر آزمایش، داده های ثبت شده به رایانه منتقل شده و برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند. در انتخاب حسگرها باید به خصوصیات و شرایط محیطی که قرار است در آنجا به کار گرفته شوند، به خوبی دقت شود. در این پژوهش از حسگرهای حرارتی از نوع One-wire DS-18B20، ساخت کشور کره جنوبی استفاده شده است. دیگر اطلاعات مربوط به حسگرها در جدول 3 ذکر شده اند. علاوه بر آن، شکل 1 نشان دهنده محل قرار گیری حسگر دمایی در پشت پنل ها است. در پنل عادی، به منظور جلوگیری از تاثیر دمای محیط بر عدد نشان داده شده توسط حسگر، مقداری پشم شیشه بر روی حسگر، قرار داده شده است. شکل های 2 و 3 نیز به ترتیب نشان دهنده تصویری از قرار گرفتن پارافین در پشت پنل و شماتیک لایه بندی مجموعه تحت آزمایش است.



شکل 1 محل دقیق قرارگیری حسگر دمایی در صفحه پشت پنل فتوولتائیک

[29]	189	22-24	Paraffin C13, C14
[30]	170	22-26	RT25

3- معادلات حاکم

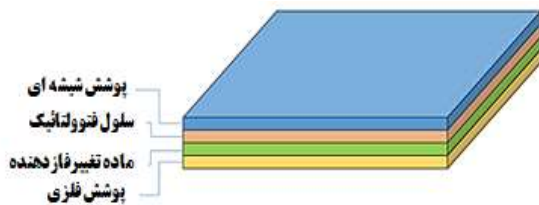
بازدهی الکتریکی پنل ها، اصلی ترین مولفه ای است که در این پژوهش به دنبال محاسبه آن هستیم. ولی پیش از آن، نیاز است تا مقدار توان خروجی پنل ها را محاسبه نماییم. از این رو از رابطه (1) استفاده می شود. در این رابطه، خروجی های ولتاژ و جریان الکتریکی که توسط دیتالاگر ثبت شده اند، مورد استفاده خواهند بود. از این رو داریم:

$$P_{out} = V I \quad (1)$$

در این رابطه، V ولتاژ بر حسب ولت و I جریان بر حسب آمپر می باشند. سپس برای یافتن مقدار تغییرات بازده پنل ها، توان لحظه ای خروجی پنل ها را بر توان ورودی پنل تقسیم می کنیم (رابطه 2).

$$\eta_{el} = \frac{V I}{A G} \quad (2)$$

در رابطه (2)، پارامتر G ، نشان دهنده ی مقدار تشعشع تابیده شده به سطح



پنل فتوولتائیک بوده و بر حسب W/m^2 بیان می شود. A نیز مساحت کل سلول های فتوولتائیک به کار رفته در پنل بر حسب m^2 است.

4- شرح انجام آزمایش

همانطور که پیش از این نیز گفته شد، در این آزمایش از یک پنل فتوولتائیک 60 واتی استفاده شده است. کلیه داده برداری ها در آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول انجام شدند. در بخش فتوولتائیک این آزمایشگاه، امکاناتی فراهم شده تا بتوان پنل های فتوولتائیک را در بازه های مختلف تشعشع، دمای محیط و وزش باد مورد ارزیابی قرار داد. به طور کلی 4 حالت مختلف را مورد بررسی قرار داده ایم که عبارتند از:

حالت 1: پنل در حالت عادی بدون خنک کاری (حالت مرجع)

حالت 2: استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در پشت پنل

حالت 3: استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در پشت پنل و جریان باد با سرعت 2 کیلومتر در ساعت

حالت 4: استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در پشت پنل و جریان باد با سرعت 4 کیلومتر در ساعت

هدف از این آزمایش ها، مطالعه ی تاثیر وجود جریان هوا در کنار مواد تغییر فاز دهنده، بر خنک کاری پنل های فتوولتائیک است. طول مدت زمان هر کدام



شکل 2 تصویری از پشت پنل فتوولتائیک مورد استفاده به همراه ماده تغییر فاز دهنده ی پشت آن

شکل 3 شماتیک استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در صفحه پشت پنل های فتوولتائیک

2-2- مواد تغییر فاز دهنده

این مواد از حیث دسته بندی شیمیایی، گستره ی وسیعی را شامل می شوند. نمک های هیدراته، اسیدهای چرب، نیترات ها، پارافین ها، بسیاری از هیدروکربن ها و الکل های شیرین فقط بخشی از موادی هستند که تا به امروز به عنوان ماده ی تغییر فاز دهنده مورد استفاده قرار گرفته اند. در جدول 4 به خواص ترموفیزیکی برخی از این موارد اشاره شده است. در این تحقیق نیز از پارافین بعنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. قیمت مناسب، در دسترس بودن، غیر سمی بودن، عدم ایجاد خوردگی، گستره وسیع نقطه ذوب و گرمای نهان ذوب بالا از جمله خصوصیات می باشند که استفاده از پارافین ها را برای محققین جذاب نموده است. لذا در بسیاری امور تحقیقاتی با توجه به دلایل ذکر شده از پارافین ها استفاده می شود. در این تحقیق به دلیل آنکه نیاز به استفاده از ماده ای با نقطه ذوب در محدوده 50 تا 60 درجه سانتی گراد بود، پارافین گزینه در دسترس، ارزان و مناسبی محسوب می شود. تعداد اتم های کربن موجود در ساختار شیمیایی پارافین ها، تعیین کننده ی نقطه ذوب آن هاست؛ به طوریکه هرچه قدر تعداد کربن در آن بیشتر باشد، نقطه ذوب آن نیز بالاتر خواهد بود.

جدول 4 خواص ترموفیزیکی تعدادی از مواد تغییر فاز دهنده

ماده	نقطه ذوب (°C)	گرمای نهان ذوب (kJ/kg)	مرجع
n-Octadecane	27/7	210	[24]
Mn(NO ₃) ₂ . 6H ₂ O	25/8	125/9	[25]
PEG 600	22	127/2	[26]
CaCl ₂ . 6H ₂ O	29	188/34	[27]
Coconut oil	22-24	103/25	[28]

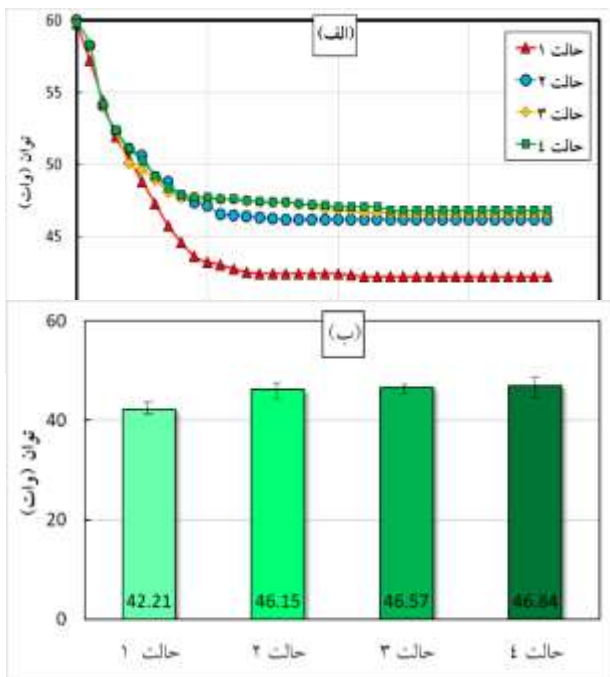
شکل 4 الف) تغییرات دمای پنل در طول زمان، ب) دمای پنل در حالت پایا

2-5 تغییرات توان

توان تولیدی توسط پنل خورشیدی، متغیر بعدی است که در اینجا مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل (5) که در آن مقادیر توان تولیدی در طول زمان و همچنین در حالت پایا برای حالات مختلف مورد بررسی، نشان داده شده اند، مشاهده می شود که حالت 4، بیشترین توان تولیدی را داشته است. با توجه به شکل (5-ب)، میانگین توان خروجی برای حالات دارای ماده تغییرفازدهنده 46/52 وات است که نسبت به پنل عادی، افزایش 10/2 درصدی را نشان می دهد. برای داشتن درکی بهتر از اختلاف توان های خروجی ذکر شده در شکل (5)، نمودار میله ای شکل (6) ترسیم شده است. این نمودار، بیان کننده آنست که اگر نیروگاهی 10 کیلوواتی در شرایط چهارگانه ی مورد بحث در این مقاله احداث گردد، چه میزان توان خروجی بدست خواهد آمد. بر این اساس، اگر از پنل های عادی استفاده شود، حدود 7 کیلووات توان خروجی را شاهد خواهیم بود در حالیکه استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در پشت پنل ها افزایش 0/66 کیلوواتی را در توان تولیدی نیروگاه شاهد بوده ایم.

3-5 تغییرات بازدهی الکتریکی

شکل (7) نشان دهنده ی تغییرات در بازدهی الکتریکی پنل ها در چهار حالت مختلف می باشد. همانطور که مشخص است، منحنی مربوط به حالت (1) پایین تر از سایر منحنی ها قرار گرفته است که با مطالب گفته شده در بخش های پیشین مقاله، در تطابق کامل است؛ چرا که بر اساس شکل (4) که تغییرات دما را در طول آزمایش نشان می دهد، انتظار داریم که در بالاترین دما، کمترین بازدهی را شاهد باشیم. با توجه به شکل (7-ب)، افزایش بازدهی در حالات 2 تا 4 نسبت به پنل عادی، به ترتیب به میزان 0/96٪، 1/26٪ و 1/38٪ نشان داده شده است.



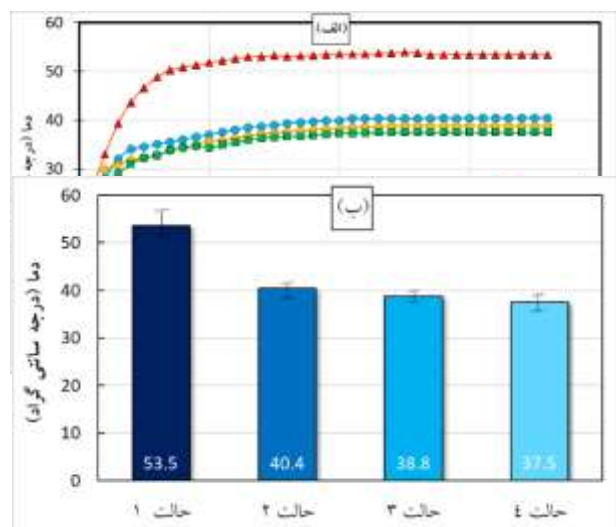
از آزمایش ها 180 دقیقه، معادل 3 ساعت می باشد. به منظور اطمینان از نتایج آزمایشات، هر آزمایش 2 تا 3 بار تکرار شد و اختلاف در نتایج توسط error bar بر نمودارهای میله ای مربوط به حالت پایا نشان داده شد. لازم به توضیح است که error bar ها برای نمودارهای مربوط به بازدهی الکتریکی و توان، مشابه هم هستند که این حالت به آن دلیل است که متغیرهای محاسباتی برای بازدهی الکتریکی و توان، یکسان هستند. با رجوع مجدد به معادلات (1) و (2) می توان این نکته را بخوبی دریافت.

5- بحث و نتایج

در 4 حالت مختلف، به بررسی اثر استفاده از ماده تغییرفاز دهنده و جریان هوا بر خنک کاری پنل های فتوولتائیک پرداخته شده است. به این دلیل که بخشی از آزمایشات باید در شرایط کنترل شده ای از سرعت وزش باد انجام شوند، کلیه تست ها در آزمایشگاه فتوولتائیک و در شرایط شبیه سازی شده ای از نور و گرمای خورشید و همچنین تحت وزش باد مصنوعی در سرعت های مورد نظر انجام شدند. در این قسمت، نتایج حاصل از داده برداری ها به همراه تحلیل های لازم، ارائه می شوند.

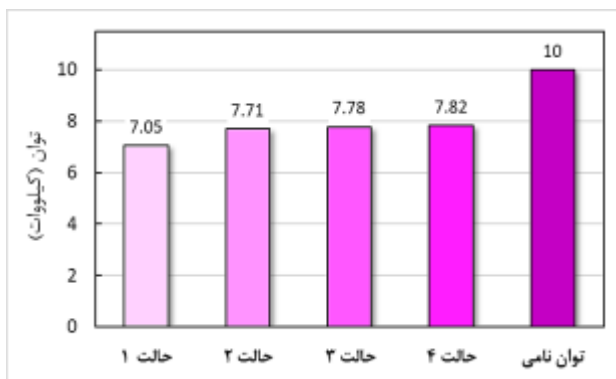
1-5 تغییرات دما

تغییرات دمای پنل برای حالات چهارگانه مورد بررسی، در شکل (4) نشان داده شده اند. همانطور که دیده می شود، پس از گذشت حدودا 80 دقیقه از شروع آزمایش، دمای پنل ها در تمامی حالات به شرایط پایا رسیده است. در حالت (1) که هیچ گونه خنک کاری در سیستم وجود نداشته است، دمای پنل از 53 درجه سانتی گراد نیز تجاوز کرده است؛ در حالیکه در سایر حالات، دمای پایا بین 37 تا 41 درجه سانتی گراد متغیر بوده است. به بیان دقیق تر، برای حالات 2 تا 4، به ترتیب 13/1، 14/7 و 16 درجه سانتی گراد کاهش دما را شاهد بوده ایم. پس می توان ادعا کرد که مواد تغییر فاز دهنده، نقش اصلی را در خنک کاری پنل ایفا کرده است و استفاده از جریان هوا تاثیر چندانی در کاهش دمای پنبلی که دارای ماده تغییر فاز دهنده باشد، نداشته است. نکته دیگر، آنست که افزایش سرعت وزش باد از 2 به 4 کیلومتر بر ساعت، منجر به کاهش دمای پنل به میزان 1/3 درجه سانتی گراد شده است.

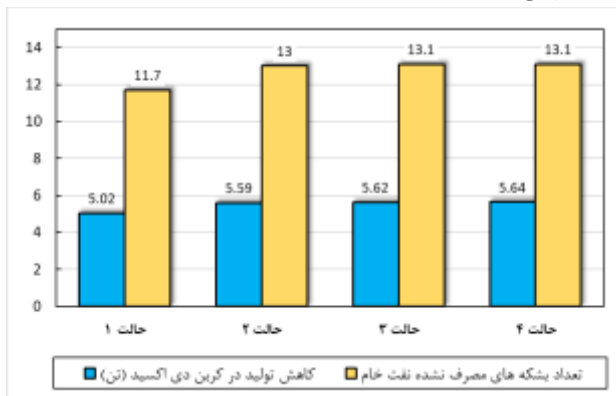


5-5 ارزیابی زیست محیطی

نیروگاه های فتوولتائیک از جمله روش های پاک دوست دار محیط زیست در تولید الکتریسیته محسوب می شوند. از این رو، در این بخش به بررسی و تخمین اثرات مثبت زیست محیطی آن ها پرداخته شده است. بدین منظور از نرم افزار RETScreen استفاده شده است. این نرم افزار، ابزاری قوی در زمینه انواع تحلیل های اقتصادی و محیط زیستی در نیروگاه های تجدیدپذیر و غیرتجدیدپذیر می باشد. شکل (8) نشان دهنده ارزیابی محیط زیستی صورت گرفته برای چهار حالت مورد بررسی در این مقاله می باشد. در این شکل، کاهش تولید کربن دی اکسید توسط یک نیروگاه فتوولتائیک، در مقایسه با یک نیروگاه حرارتی بر پایه گاز نشان داده شده است. بر همین اساس، کاهش مصرف تعداد



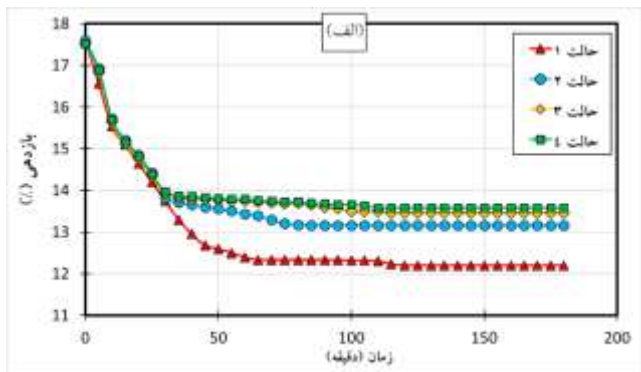
بشکه های نفت خام نیز تخمین زده شده است. با رجوع به این شکل، کاملاً مشخص است که استفاده از ماده تغییرفاز دهنده در پشت پنل، موجب می شود تا سالانه حدود 600 کیلوگرم کربن دی اکسید کمتری منتشر گردد و این مقدار کاهش انتشار کربن دی اکسید معادل با کاهش مصرف سالانه 1/3 بشکه نفت خام می باشد.



شکل 8 اثرات زیست محیطی سالانه نیروگاه فتوولتائیک، برای حالات مورد مطالعه

6- نتیجه گیری

در این مقاله به طور تجربی به بررسی خنک کاری پنل فتوولتائیک با استفاده از پارافین به عنوان ماده تغییرفاز دهنده و همچنین وجود جریان باد پرداخته شد و نتایج حاصل از این تغییرات با حالت عادی مقایسه گردید. نتایج بدست آمده را می توان به صورت زیر جمع بندی نمود:



شکل 5 (الف) تغییرات توان تولیدی در طول زمان، (ب) توان تولیدی در حالت پایا

شکل 6 مقایسه ی توان خروجی یک نیروگاه 10 کیلوواتی برای حالات چهارگانه

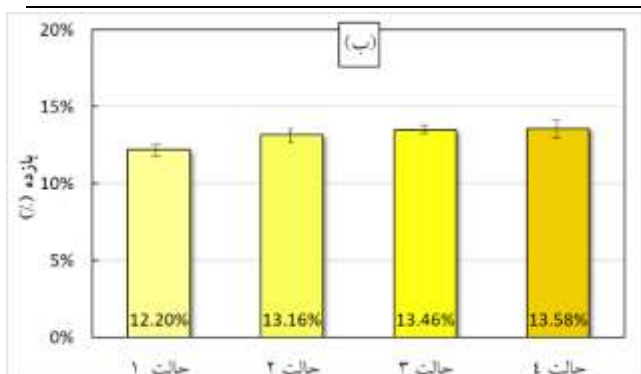
5-4 مقایسه با سایر پژوهش ها

یکی از کارهایی که می تواند بخوبی نشان دهنده ی دقت نتایج حاصل از یک کار پژوهشی باشد، مقایسه ی یافته های تحقیق با نتایج سایر تحقیقات مشابه است. همانطور که در آخرین پاراگراف از مقدمه این مقاله نیز اشاره شد، هیچ پژوهشی مشابه با نوآوری تحقیق حاضر یافت نشد و لذا نتایج حالتی که در آن فقط از ماده تغییر فازدهنده استفاده شد، با نتایج سایر مقالات مقایسه می گردد. از اینرو جدول (5) ارائه شده است. در این جدول بخوبی نزدیک بودن نتایج این تحقیق با سایر مقالات مشخص است.

شکل 7 بازدهی الکتریکی (الف) در طول زمان، (ب) در حالت پایا

جدول 5 مشخصات الکتریکی پنل فتوولتائیک

ردیف	ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده	افزایش بازدهی	مرجع
1	پلی اتیلن گلاکول 600	2/4 %	[26]
2	RT44	2/2 %	[31]
3	پارافین	2/5 %	[32]
4	پارافین	2/4 %	[33]
5	پارافین	0/6 %	[34]
6	پارافین	1/8 %	[35]
7	پارافین	1/2 %	پژوهش حاضر



- Performance of Photovoltaic Panels, *Sustainability*, vol. 14, p. 16986, 2022.
- [11] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. M. Adeli, An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Applied Energy*, vol. 87, no. 7, pp. 2328-2339, 2010.
- [12] M. Naghavi, A. Esmaeilzadeh, B. Singh, B. Ang, T. Yoon, and K. Ong, Experimental and numerical assessments of underlying natural air movement on PV modules temperature, *Solar Energy*, vol. 216, pp. 610-622, 2021.
- [13] S. Krauter, Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 82, no. 1-2, pp. 131-137, 2004.
- [14] H. M. Maghrabie, A. Mohamed, A. M. Fahmy, and A. A. A. Samee, Performance enhancement of PV panels using phase change material (PCM): An experimental implementation, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 42, p. 102741, 2023.
- [15] N. Nesari, An investigation on employing PCM in order to decrease the temperature of PV panel, *Sixth international conference on novel energy saving methods*, vol. 28, no. 3, pp. 111-131, 2016.
- [16] A. Bria, B. Raillani, D. Chaatouf, M. Salhi, S. Amraqui, and A. Mezrhab, Effect of PCM Thickness on the Performance of the Finned PV/PCM System, *Materials Today: Proceedings*, vol. 72, pp. 3617-3625, 2023.
- [17] F. Hachem, B. Abdulhay, M. Ramadan, H. El Hage, M. G. El Rab, and M. Khaled, Improving the performance of photovoltaic cells using pure and combined phase change materials-Experiments and transient energy balance, *Renewable Energy*, vol. 107, pp. 567-575, 2017.
- [18] M. Firoozzadeh, A. H. Shiravi, and M. Shafiee, Using Polyethylene Glycol, as a Phase Change Material and Fins for the Cooling of Photovoltaic Cells of the Crystalline Type (in Persian), *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 6, pp. 101-110, 2018.
- [19] M. Firoozzadeh and A. H. Shiravi, Simultaneous Use of Porous Medium and Phase Change Material as Coolant of Photovoltaic Modules; Thermodynamic Analysis, *Journal of Energy Storage*, vol. 54, p. 105276, 2020.
- [20] E. Ebrahimi, Experimental investigation on the performance increment of a PV module using PCM and CuO nanofluid, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 52, no. 2, pp. 281-296, 2020.
- [21] M. Baygi and M. Ameli, Design and build a cooling system in order to efficiency increment by PCM, *Sharif Journal of Mechanical Engineering*, vol. 323, no. 1, pp. 77-82, 2019.
- [22] M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, M.-J. Maghrebi, and M. Ghazikhani, Experimental study of using both ZnO/water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 161, pp. 62-69, 2017.
- [23] M. Hemmat Esfe, M. H. Kamyab, and M. Valadkhani, Application of nanofluids and fluids in photovoltaic thermal system: An updated review, *Solar Energy*, vol. 199, pp. 796-818, 2020.
- [24] E. M. Alawadhi, Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and buildings*, vol. 40, no. 3, pp. 351-357, 2008.
- [25] K. Nagano, T. Mochida, S. Takeda, R. Domański, and M. Rebow, Thermal characteristics of manganese (II) nitrate hexahydrate as a phase change material for cooling systems, *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 229-241, 2003.
- [26] M. Firoozzadeh, A. H. Shiravi, and M. Shafiee, Thermodynamics assessment on cooling photovoltaic modules by phase change materials (PCMs) in critical operating temperature, *Journal of thermal analysis and calorimetry*, vol. 144, no. 4, pp. 1239-1251, 2020/04/13 2021.
- [27] M. Rezvanpour, D. Borooghani, F. Torabi, and M. Pazoki, Using CaCl₂·6H₂O as a phase change material for thermo-regulation and enhancing photovoltaic panels' conversion efficiency: Experimental study and TRNSYS validation, *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 1907-1921, 2020.
- 1- کاهش دمای پنل‌ها به افزایش بازدهی الکتریکی و به تبع آن توان خروجی آن‌ها منجر شده است. این افزایش بازدهی الکتریکی برابر با 1%/، 2%/ و 1/4% به ترتیب برای استفاده از ماده تغییر فازدهنده، ماده تغییر فاز دهنده و جریان باد با سرعت 2 کیلومتر بر ساعت و 4 کیلومتر بر ساعت بوده است.
- 2- استفاده از ماده تغییر فاز دهنده موجب کاهش دمای پنل به میزان 13/1 درجه سانتی گراد شده است. علاوه بر آن، زمانیکه از جریان هوا نیز در سیستم استفاده شد، این کاهش دما تا 16 درجه سانتی گراد ارتقا یافت. پس می‌توان دریافت که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده نقش اصلی و کلیدی را در کاهش دمای پنل ایفا کرده است.
- 3- بر اساس ارزیابی‌های انجام شده، اگر یک نیروگاه فتوولتائیک 10 کیلوواتی با استفاده از مواد تغییر فازدهنده احداث گردد، این نیروگاه قادر خواهد بود تا 0/66 کیلووات توان بیش‌تری تولید نماید.
- 4- مقدار افزایش ایجاد شده در برق تولیدی منجر به کاهش سالانه حدودا 600 کیلوگرم در انتشار کربن دی اکسید، به عنوان اصلی‌ترین عامل آلوده کننده هوا خواهد شد که از حیث زیست محیطی بسیار مهم تلقی می‌شود.

مراجع

- [1] A. D. Shaeri-nejad, The effect of smart glasses on the performance of a solar refrigeration in a building in Bushehr, *Iranian Journal of Mechanical Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 97-117, 2018.
- [2] M. R. Saffarian, M. Moravej, and M. H. Doranehgard, Heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with different flow path shapes using nanofluid, *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2316-2329, 2020.
- [3] H. Adun *et al.*, Synthesis and application of ternary nanofluid for photovoltaic-thermal system: Comparative analysis of energy and exergy performance with single and hybrid nanofluids, *Energies*, vol. 14, no. 15, p. 4434, 2021.
- [4] A. Dhass, E. Natarajan, and P. Lakshmi, An investigation of temperature effects on solar photovoltaic cells and modules, *International Journal of Engineering Transaction B: Applications*, vol. 27, no. 11, pp. 1713-1722, 2014, doi: doi: 10.5829/idosi.ije.2014.27.11b.09.
- [5] A. H. Shiravi and M. Firoozzadeh, Performance Assessment of a finned Photovoltaic Module exposed to an Air Stream; An Experimental Study, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 44, no. 11, p. 535, 2022.
- [6] M. Firoozzadeh, M. Lotfi, A. H. Shiravi, and M. Rajabzadeh Dezfali, An experimental study on using water streaks and water film over PV module to enhance the electrical efficiency, *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 1-13, 2023.
- [7] H. A. Hasan *et al.*, Experimental Evaluation of the Thermoelectrical Performance of Photovoltaic-Thermal Systems with a Water-Cooled Heat Sink, *Sustainability*, vol. 14, no. 16, p. 10231, 2022.
- [8] M. Firoozzadeh, A. H. Shiravi, M. Lotfi, S. Aidarova, and A. Sharipova, Optimum Concentration of Carbon Black Aqueous Nanofluid as Coolant of Photovoltaic Modules: A Case Study, *Energy*, vol. 225, p. 120219, 2021, doi: doi: 10.1016/j.energy.2021.120219.
- [9] M. Ahmadinejad, A. Soleimani, and A. Gerami, The effects of a novel baffle-based collector on the performance of a photovoltaic/thermal system using SWCNT/Water nanofluid, *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 34, p. 101443, 2022.
- [10] M. Firoozzadeh, M. Lotfi, and A. H. Shiravi, An Experimental Study on Simultaneous Use of Metal Fins and Mirror to Improve the

- [28] E. Mettawee and A. Ead, Energy saving in building with latent heat storage, *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 21-30, 2013.
- [29] P. Tatsidjoudoug, N. Le Pierrès, and L. Luo, A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18, pp. 327-349, 2013.
- [30] Rubitherm-GmbH, Available at: <https://www.rubitherm.eu/>.
- [31] A. Waqas and J. Ji, Thermal management of conventional PV panel using PCM with movable shutters—A numerical study, *Solar Energy*, vol. 158, pp. 797-807, 2017.
- [32] M. Lotfi, A. H. Shiravi, and M. Firoozzadeh, Experimental Study on Simultaneous Use of Phase Change Material and Reflector to Enhance the Performance of Photovoltaic Modules, *Journal of Energy Storage*, vol. 55, 2022.
- [33] J. Zhao, T. Ma, Z. Li, and A. Song, Year-round performance analysis of a photovoltaic panel coupled with phase change material, *Applied Energy*, vol. 245, pp. 51-64, 2019.
- [34] Z. Luo, N. Zhu, P. Hu, F. Lei, and Y. Zhang, Simulation study on performance of PV-PCM-TE system for year-round analysis, *Renewable Energy*, vol. 195, pp. 263-273, 2022.
- [35] M. Sharaf, A. Huzayyin, and M. S. Yousef, Performance enhancement of photovoltaic cells using phase change material (PCM) in winter, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 6, pp. 4229-4239, 2022.