



بررسی آزمایشگاهی بهبود عملکرد خنک‌سازی یک ماژول فتوولتائیک با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده-نانوذرات اکسید مس

ابراهیم ابراهیمی*

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۱/۱۸
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۳/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۵/۰۲

کلمات کلیدی:

مواد تغییر فاز دهنده
فتوولتائیک
اکسید مس
خنک‌سازی

خلاصه: در این مطالعه، تاثیر استفاده از ترکیب یک ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس به عنوان عامل خنک‌ساز بر روی عملکرد یک ماژول فتوولتائیک به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ماده تغییر فاز که در محفظه پشت ماژول قرار گرفته و از طریق میلی‌لوله‌های مارپیچی با آب سرد خنک‌سازی شده است. ماده تغییر فاز دهنده به دلیل دریافت مقدار زیادی از گرمای سطح ماژول و در نتیجه کنترل ظرفیت حرارتی سیستم به افزایش راندمان آن کمک می‌کند. اثر غلظت نانوذرات اکسید مس (۰/۵ تا ۴ درصد وزنی) و مقدار ماده تغییر فاز (۱/۲۵ تا ۲ کیلوگرم) بر پارامترهای مختلف مانند دمای سطح ماژول، افزایش توان بیشینه و بازده خنک‌سازی ماژول فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص به طور چشمگیری باعث کاهش دمای سطح ماژول از $58/34^{\circ}\text{C}$ به $51/7^{\circ}\text{C}$ شده است. همچنین، داده‌ها نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید مس به ماده تغییر فاز دهنده خالص منجر به افزایش بازده خنک‌سازی و توان تولیدی از ماژول شده است. افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب آن با اکسید مس ۴٪ از 1 kg به $2/25\text{ kg}$ منجر به کاهش دمای سطح ماژول به ترتیب از $51/7^{\circ}\text{C}$ به $48/1^{\circ}\text{C}$ و از 45 به $42/9^{\circ}\text{C}$ شده است. همچنین، با افزایش غلظت نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده، بازده خنک‌سازی و مقدار توان تولیدی افزایش یافته و بالاترین مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر $22/87\%$ و $3/46\text{ W}$ مربوط به حالت استفاده از $2/25\text{ kg}$ ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ می‌باشد.

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به الکتریسیته و دمای سطح ماژول‌های فتوولتائیک رابطه مستقیم وجود دارد و حداکثر مقادیر بازدهی بین ۱۴ تا ۱۷ درصد است [۴]. کارایی ماژول‌های فتوولتائیک به ازای هر ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش دمای سطح آن‌ها، ۰/۵ درصد کاهش می‌یابد [۸-۶]. بنابراین، پیدا کردن روش‌های کارآمد برای خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک به منظور حذف مقدار بالایی از حرارت از سطح آن‌ها به طور جدی مورد نیاز است.

تعداد زیادی روش‌های جدید فعال^۲ و منفعل^۳ به منظور افزایش عملکرد و خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک استفاده شده است. در روش‌های خنک‌کننده فعال مانند استفاده از اسپری آب [۹] و جت برخوردکننده هیبریدی^۴ [۱۰]، به استفاده از یک نیروی محرکه

انرژی خورشیدی به عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود که همیشه در دسترس است و ضایعات خاصی تولید نمی‌کند [۳-۱]. تقاضا برای انرژی ارزان و فراوان، استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک^۱ برای تولید برق از طریق تابش خورشید را افزایش داده است. کارایی، بهره‌وری و طول عمر ماژول‌های فتوولتائیک به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تاثیر شرایط آب و هوایی مانند سرعت باد، جهت جریان باد و دمای محیط قرار می‌گیرد [۴]. در منابع گزارش شده است که فقط حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از تابش خورشیدی جذب شده توسط ماژول فتوولتائیک را می‌توان به برق تبدیل کرد و بقیه به عنوان گرما از بین می‌رود [۵]. بین بازده تبدیل

- 2 Active
- 3 Passive
- 4 Hybrid Jet Impingement

- 1 Photovoltaic (PV)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ebrahimi@iauksh.ac.ir



خارجی^۱ برای جریان دادن به سیال عامل نیاز دارند. تکنیک‌های خنک‌سازی فعال دارای راندمان بالایی هستند و منجر به تولید مقدار زیاد انرژی می‌شوند. روش‌های خنک‌سازی منفعل به سه گروه اصلی شامل خنک‌سازی منفعل هوا^۲، خنک‌سازی منفعل آب^۳ و خنک‌سازی هدایتی^۴ تقسیم می‌شوند. یک نوع خاص از خنک‌کننده هدایتی منفعل در ماژول‌های فتوولتائیک، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده است که توسط بسیاری از نویسندگان مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۶]. مواد تغییر فاز دهنده به دلیل داشتن توانایی بالا برای دریافت مقدار زیادی از حرارت سطح ماژول‌های فتوولتائیک و در نتیجه کنترل ظرفیت حرارتی سیستم به افزایش راندمان آن‌ها کمک می‌کند [۱]. معمول‌ترین ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده برای خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک واکس پارافین است. واکس پارافین به منظور ذخیره‌سازی حرارت استفاده می‌شود، زیرا دارای ظرفیت بالا برای ذخیره‌سازی گرما در طیف گسترده‌ای از دما بوده و ارزان، غیرسمی و سازگار با محیط زیست است. همچنین، مطالعات زیادی روی خنک‌سازی ماژول‌های فتوولتائیک با استفاده از ترکیب ماده تغییر فاز دهنده با نانومواد انجام شده است.

کارونامورسی^۵ و همکاران [۱۷] اثر وجود نانوذرات اکسید مس^۶ در پارافین تغییر فاز دهنده روی افزایش هدایت حرارتی آن را بررسی کرده و مشاهده کردند که هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده بهبود یافته است. آنان اظهار داشتند که این مسئله امکان غلبه بر میزان نسبتاً کم انتقال حرارت در کاربردهای ذخیره انرژی حرارتی را فراهم کرد.

سردارآبادی^۸ و همکاران [۱۸] مطالعه آزمایشگاهی یک مجموعه سیستم حرارتی-فتوولتائیک مبتنی بر نانوسیالاکسید روی^۹ با پارافین تغییر فاز دهنده را انجام دادند. نانوسیال در لوله‌هایی که در مخزن ذخیره‌سازی ماده تغییر فاز دهنده قرار داشتند جاری بود. استفاده از این تکنیک خروجی الکتریکی سیستم را نسبت به مدل فتوولتائیک

- 1 External Driving Force
- 2 Air Passive Cooling
- 3 Water Passive Cooling
- 4 Conductive Cooling
- 5 Phase Change Material (PCM)
- 6 Karunamurthy
- 7 CuO
- 8 Sardarabadi
- 9 ZnO

معمولی حدود ۱۳٪ افزایش داده است.

موسوی بایگی و صدر عاملی [۱۹] اثر استفاده از ماده تغییر فاز پلی اتیلن گلیکول ۱۰۰۰ بر خنک‌سازی و بهبود عملکرد یک پنل فتوولتائیک را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. طبق اظهار این محققین، در این پژوهش برای اولین بار در مقیاس نیمه‌صنعتی از مواد تغییر فاز به عنوان کنترل‌کننده دمای سلول فتوولتائیک استفاده شده است. نتایج آنان نشان داد که این سامانه می‌تواند دمای سطح پنل فتوولتائیک را حدود 15°C کاهش دهد که باعث بهبود راندمان در حدود ۸٪ شد.

ال وائلی^{۱۰} و همکاران [۱] اثر استفاده از ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات سیلیسیم کاربید^{۱۱} به عنوان ماده تغییر فاز برای خنک‌سازی سیستم حرارتی-فتوولتائیک و بهبود عملکرد آن را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. در این پژوهش، علاوه بر وجود نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده، نانوسیال سیلیسیم کاربید در لوله‌هایی که در مخزن ذخیره‌سازی ماده تغییر فاز دهنده قرار داشتند جاری بود. نتایج نشان داد که استفاده از این تکنیک، منجر به کاهش دمای سطح ماژول شده و بازده حرارتی سیستم را نسبت به مدل فتوولتائیک معمولی حدود ۷۲٪ افزایش داده است.

گستره استفاده از ترکیب مواد تغییر فاز با نانوذرات به تحقیق بیشتر به منظور ارائه بهترین حالت‌ها و روش ممکن برای بهبود خنک‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک و کاهش هزینه‌های انرژی، همراه با افزایش فروش تجاری سیستم‌های مبتنی بر انرژی خورشیدی نیاز دارد.

در این پژوهش، تاثیر استفاده از ترکیب ماده تغییر فاز و نانوذرات اکسید مس به عنوان عامل خنک‌ساز بر روی عملکرد و خنک‌سازی یک سیستم فتوولتائیک به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. درواقع، نوآوری این تحقیق استفاده همزمان از نانوذرات اکسید مسو ماده تغییر فاز به منظور خنک‌سازی یک ماژول فتوولتائیک است در حالتی که این ترکیب توسط آب خنک‌کننده جاری در میلی لوله‌های مسی مارپیچی، تغییر فاز می‌دهند و خنک می‌شوند. در مراجع زیادی از ترکیب نانولوله‌های کربنی و نانوذرات اکسید آلومینیوم^{۱۲}، بوهمیت و ... با آب برای تولید نانوسیال و جهت خنک‌سازی مواد تغییر فاز

- 10 Al-Waeli
- 11 SiC
- 12 Al₂O₃

ترموتر مدل لوترون، بی.تی.ام-۴۲۰۸.اس.دی^۳ استفاده شد. یک دستگاه الکتریکی^۴ به منظور اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها به ماژول فتولتائیک متصل شده است.

ماژول فتولتائیک مورد استفاده از مدل زد.تی.۱۰-۱۸-پی، تایوان^۵ بوده و در واقع یک ماژول سیلیکونی مونوکریستالی^۶ است که شامل ۷۲ سلول بوده که به صورت موازی و سری بهم متصل شده‌اند. ناحیه فعال هر ماتریس در ماژول فتولتائیک به صورت ۳۶×۳۶ mm است. به منظور اندازه‌گیری دمای سطح ماژول فتولتائیک، تعداد ۹ ترموکوپل به سطح آن متصل شد. ۵ ترموکوپل به سطح بالایی ماژول و ۴ ترموکوپل به سطح پایینی آن متصل شدند. همچنین دو ترموکوپل به ورودی و خروجی آب خنک‌کن متصل شده و دماهای آب را در ورود به لوله پی.وی.سی^۷ پایین و خروج از لوله پی.وی.سی بالایی اندازه می‌گیرند. خطای ترمومتر لوترون، بی.تی.ام-۴۲۰۸.اس.دی برابر ۰/۴٪ و خطای هر ترموکوپل برابر ۰/۱۵± تا ۰/۲۵± °C است. شکل ۲ شماتیکی از ماژول فتولتائیک، ابعاد آن و نحوه قرارگیری ترموکوپل‌ها را نشان می‌دهد.

به منظور به تعویق انداختن ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، از میلی لوله‌های مسی که در آن‌ها آب سرد جریان دارد، استفاده شده است. لوله‌های مسی در فاصله ۰/۵ سانتی‌متری از سطح ماژول قرار گرفته و در تماس با آن نیستند و تنها نقش خنک‌کننده ماده تغییر فاز دهنده در حالت مذاب را به عهده دارند. لوله‌های مسی به صورت مارپیچی از دو سر به دو لوله پی.وی.سی متصل شده و در محفظه پشت ماژول قرار گرفته‌اند. درب شیشه‌ای این محفظه طوری ساخته شده که حجم آن را متغیر می‌سازد و می‌توان مقادیر مختلف از وزن ماده تغییر فاز دهنده را تا حداکثر ۲/۵ kg استفاده کرد. شماتیکی از برش عرضی از مجموعه ماژول فتولتائیک و لوله‌های مسی احاطه شده با ترکیب ماده تغییر فاز دهنده-اکسید مس را می‌توان در شکل ۳ (الف) مشاهده کرد. همچنین، شکل ۳ (ب) نمای بالا از نحوه قرارگیری لوله‌های مسی در محفظه پشت ماژول فتولتائیک را نشان می‌دهد. آب سرد از مخزن خارج شده و به یکی لوله‌های پی.وی.سی وارد و از لوله دیگر خارج می‌شود. به منظور

دهنده استفاده شده است. در این مقاله، نانوذرات اکسید مس به دلیل داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا، جهت افزایش ضریب هدایت حرارتی پارافین و همچنین برای افزایش ظرفیت جذب حرارت، به آن اضافه شده است. استفاده از میلی لوله‌های مارپیچی برای عبور سیال خنک‌کن به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت، نسبت به لوله‌های مستقیم موجود در مراجع دیگر، به عنوان یکی دیگر از نوآوری‌های این مقاله در نظر گرفته می‌شود. همچنین، در هیچ کدام از مراجع بررسی شده در این زمینه، اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده بر عملکرد و خنک‌سازی ماژول بررسی نشده که در این مطالعه این موضوع به طور کامل ارزیابی شده است. به طور کلی، اثر غلظت نانوذرات اکسید مس (درصد وزنی ۰/۵ تا ۴ درصد) و وزن ماده تغییر فاز دهنده (۱/۲۵ تا ۲ کیلوگرم) بر پارامترهای مختلف مانند دمای سطح ماژول، افزایش توان ماکزیمم و بازده خنک‌سازی ماژول فتولتائیک مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

۲- کار آزمایشگاهی

۲-۱- تجهیزات آزمایشگاهی

یک سیستم آزمایشگاهی به منظور بررسی اثر ترکیب ماده تغییر فاز دهنده با نانوذرات اکسید مس بر عملکرد ماژول فتولتائیک ساخته شد که شماتیک آن در شکل ۱ قابل مشاهده است. اجزا اصلی این سیستم عبارتند از: شبیه‌ساز خورشیدی، مخزن آب، سیستم ثبت‌کننده داده‌ها و ماژول فتولتائیک. یک شبیه‌ساز خورشیدی به منظور تولید تابش خورشیدی لازم طراحی شده است. ایده اولیه ساخت شبیه‌ساز خورشیدی مورد استفاده در این پژوهش، از یک منبع معتبر استخراج شده است [۲۰]. از آنجایی که نور خورشید همیشه در دسترس نیست، از ۵ لامپ متال هالید^۱ مدل اچ.آی.دی-تی-۴۰۰ دلبیو/دی^۲ با توان ۴۰۰ وات به منظور تولید مستمر نور استفاده شده است. همه لامپ‌ها روی سطح یک صفحه آلومینیومی بر روی سقف یک اتاقک متصل شده و در فاصله ۶۰ cm از سطح ماژول قرار گرفته‌اند. در تمامی آزمایشات، قدرت تابش نور از لامپ‌ها ثابت و برابر ۱۰۰۰ W/m^۲ تنظیم شده است. به منظور اندازه‌گیری دمای سطح ماژول از یک

3 Lutron, BTM-4208SD

4 Electrical Load

5 ZT10-18-P ACDC, Taiwan

6 Mono-Crystalline Silicon

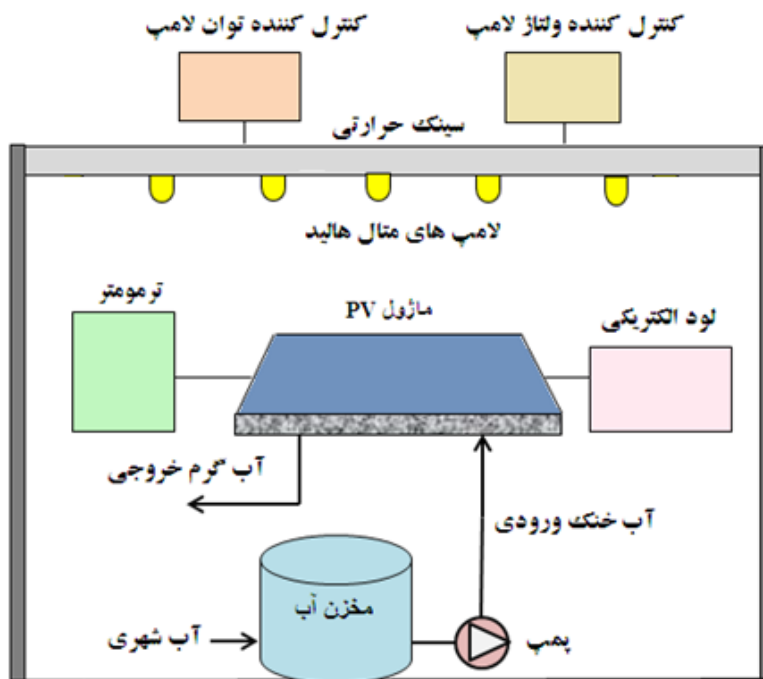
7 Polyvinyl Chloride (PVC)

Metal Halide Lamps 1

HID-T400 W/D 2



(الف)



(ب)

شکل ۱: نمایی از سیستم آزمایشگاهی راه اندازی شده در این مطالعه. (الف) شکل واقعی تجهیزات آزمایشگاهی، (ب) شماتیکی از تجهیزات آزمایشگاهی.

Fig. 1: Overview of the experimental set up launched in this study. (A) The actual shape of the set up equipment; (b) a schematic of the set up equipment.



شکل ۲: شماتیک ماژول فتوولتائیک مورد مطالعه و نحوه قرارگیری ترموکوپل‌ها روی سطح آن.

Fig. 2: Schematic of the photovoltaic module studied and positioning of the thermocouples on the surface.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز مورد استفاده در این مطالعه.

Table 1: Thermophysical Properties of changing Phase Material (PCM) using in this study.

مشخصات نانوذرات اکسید مس	پارامتر
شرکت سیگما آلدریج	کشور سازنده
99/5%	درصد خلوص
6300	دانسیتته (kg/m^3)
29	سطح ویژه (m^2/g)
<50	قطر متوسط نانوذرات (mm)
20	هدایت حرارتی ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$)
1326	دمای نقطه ذوب ($^\circ\text{C}$)
531	ظرفیت گرمای ویژه حالت جامد ($\text{kJ/kg}\cdot^\circ\text{C}$)

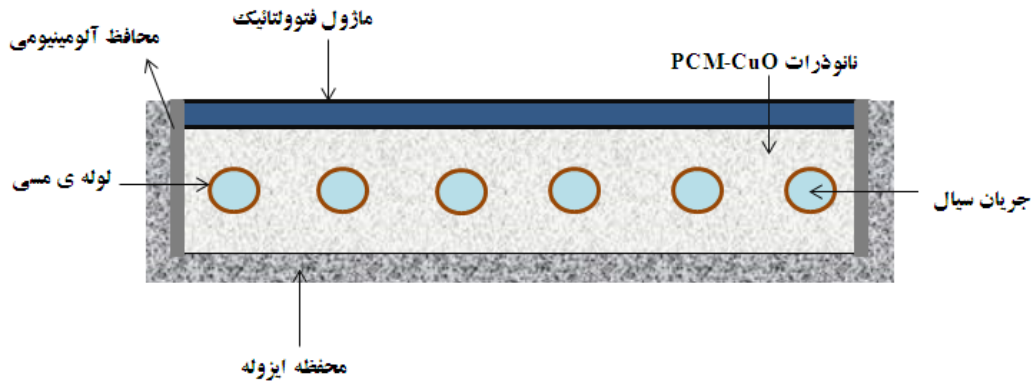
و خواص فیزیکی آن طبق اطلاعاتی که این شرکت ارائه کرده، در جدول ۱ آمده است.

همچنین، مشخصات نانوذرات اکسید مس مورد استفاده که از شرکت سیگما آلدریج خریداری شده در جدول ۲ آمده است.

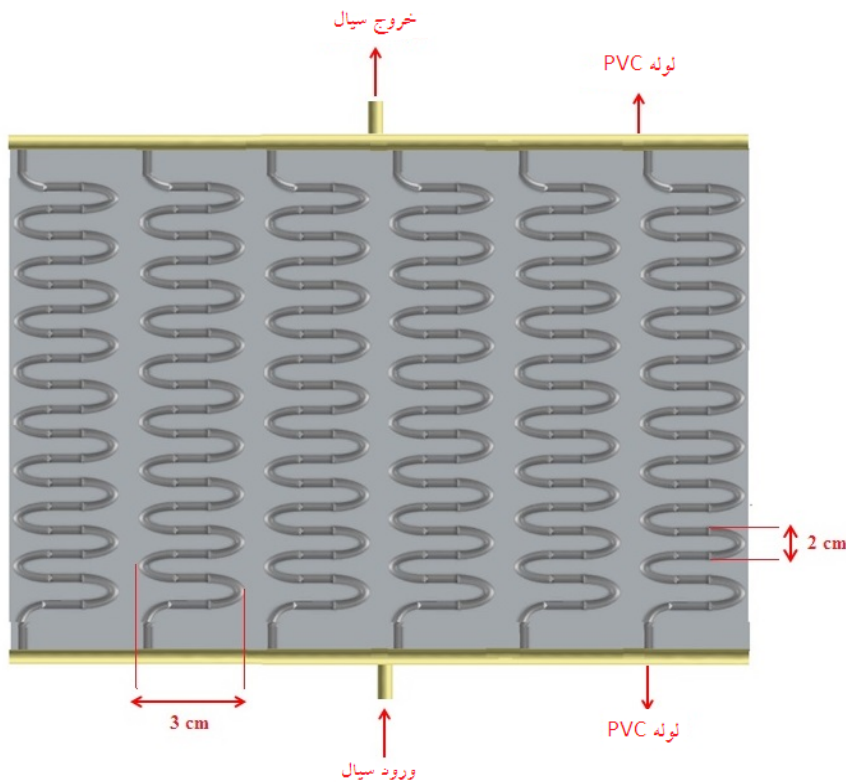
نانوذرات با درصد جرمی‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد در ماده تغییر فاز دهنده مذاب پراکنده شده و ۵ سوسپانسیون با درصد جرمی‌های مختلف نانوذرات بدست آمده است. عمل اختلاط

اینکه در طول انجام آزمایشات لوله‌های مسی پر از آب باشند، ماژول فتوولتائیک با افق شیب ۱۵ درجه داشته و آب سرد به لوله پی‌وی‌سی پایین وارد می‌شود.

۲-۲- آماده سازی ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده در این پژوهش، واکس پارافین بوده که از شرکت هایا شیمی رازی (کرمانشاه) خریداری شده



الف) برش عرضی از مجموعه ماژول فتوولتائیک و لوله های مسی احاطه شده با ترکیب ماده تغییر فاز دهنده-اکسید مس.



ب) نمای بالا از نحوه قرارگیری لوله های مسی در پشت ماژول فتوولتائیک.

شکل ۳: شماتیک ماژول فتوولتائیک مورد مطالعه.

Fig. 3: Schematic of the photovoltaic module studied

حاوی سوسپانسیون در حمام آب و یخ قرار داده شد. بعد از همگن شدن، رنگ محلول سوسپانسیون از عسلی روشن به قهوه ای تیره-سیاه تغییر می کند. مقادیر گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و دانسیته سوسپانسیون پارافین مذاب و نانوذرات اکسید مس با استفاده از معادلات مربوط به خواص فیزیکی نانوسیال موجود در مرجع [۲۱] محاسبه گردید که در جدول ۳ آمده است.

مقادیر دمای ذوب ترکیب جامد پارافین و نانوذرات در درصد

نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده مذاب، توسط همزن التراسونیک (مدل هیلسچر-یو.پی. ۴۰۰، اس ۱، ساخت کشور آلمان) با فرکانس ۲۴ کیلوهرتز و توان ۴۰۰ وات، تحت دمای کنترل شده ۲۹۳ تا ۲۹۸ کلوین، به صورت همگن درآورده شد. برای حصول مخلوط همگن و پایدار، این فرآیند یک ساعت به طول انجامید. به منظور کنترل دما ضمن همگن شدن سوسپانسیون توسط همزن التراسونیک، ظرف

1 Hielscher-UP400S

جدول ۲: مشخصات نانوذرات اکسید مس مورد استفاده در این مطالعه.

Table 2: Specifications of CuO nanoparticles using in this study.

مشخصات نانوذرات اکسید مس	پارامتر
شرکت سیگما آلدريج	کشور سازنده
99/5%	درصد خلوص
6300	دانسیته (kg/m^3)
29	سطح ویژه (m^2/g)
<50	قطر متوسط نانوذرات (mm)
20	هدایت حرارتی ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
1326	دمای نقطه ذوب ($^\circ\text{C}$)
531	ظرفیت گرمای ویژه حالت جامد ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)

جدول ۳: مشخصات ترکیب پارافین و نانوذرات اکسید مس مورد استفاده در این مطالعه.

Table 3: Properties of Composition of paraffin and CuO nanoparticles using in this study.

پارامتر	$\square=0/5\%$	$\square=1\%$	$\square=2\%$	$\square=3\%$	$\square=4\%$
دانسیته حالت مایع (kg/m^3)	865/31	892/62	947/24	1001/86	1056/48
هدایت حرارتی حالت مایع ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	0/213	0/216	0/222	0/228	0/235
دمای نقطه ذوب ($^\circ\text{C}$)	52-53	52-53	50-51	49-50	49
ظرفیت گرمای ویژه حالت مایع ($\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$)	21/353	394/29	724/53	1018/76	1282/57

و جریان ماکزیم (I_{\max}) ضبط شدند. دماهای ۹ نقطه از سطح ماژول با استفاده از ترمومتر همزمان ضبط شدند. همه آزمایشات در دمای اتاق و حدود ۱۶-۱۷ درجه سانتی‌گراد در فصل زمستان انجام شدند.

۲-۴- خطاهای آزمایشگاهی و آنالیز عدم قطعیت

مقادیر واقعی از داده‌های اندازه‌گیری شده در این کار ناشناخته است. بنابراین، دقت داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که داده‌های اندازه‌گیری تکرار شده چقدر به یکدیگر نزدیک هستند. از آنجاکه عدم قطعیت در مقادیر اندازه‌گیری شده یک دلیل عدم قطعیت در مقادیر محاسبه شده است، به عدم قطعیت دمای سطح ماژول، ولتاژ و توان اندازه‌گیری شده نیاز است. داده‌های اندازه‌گیری به عنوان "مقدار اندازه‌گیری \pm عدم قطعیت" گزارش شده است. محاسبات به این شرح است: برای یک مجموع N تایی از مقادیر اندازه‌گیری شده برای برخی از کمیت‌ها، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده (\bar{x}) و انحراف استاندارد (σ_x) به صورت زیر محاسبه شد [۲۲]:

جرمی‌های مختلف ۰/۵، ۱، ۲، ۳ و ۴ درصد به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد که در جدول ۳ آمده است.

۲-۳- روند انجام آزمایشات

قبل از انجام آزمایشات، تست وجود نشتی برای مجموعه لوله‌های مسی در بالاترین دبی آب انجام شد و مشکلات نشتی به طور کامل رفع گردید. برای هر آزمایش مقدار مشخص از سوسپانسیون ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات به درون محفظه پشت ماژول ریخته شده و ۲۴ ساعت به سیستم استراحت داده شده تا این به طور کامل جا گرفته و ترکیب به جامد تبدیل شود. در هنگام انجام آزمایشات، دبی آب سرد ورودی روی مقدار دلخواه تنظیم شد. مقادیر ولتاژ خروجی مختلف در جریان‌های الکتریکی مختلف با استفاده از دستگاه الکتریکی تنظیم شد. در حین آزمایشات، خروجی الکتریکی فتولتائیک به دستگاه الکتریکی متصل بوده و بعد از اینکه سیستم به حالت پایا رسید (حدود ۶۵ دقیقه)، مقادیر I-V به منظور بدست آوردن ماکزیم توان تولیدی (P_{\max}) و مقادیر ولتاژ ماکزیم (V_{\max})

دمای متوسط سطح ماژول بعد از ۶۵ دقیقه حدود $58/34^{\circ}\text{C}$ است. در مرحله بعد ۱ kg از ماده تغییر فاز دهنده خالص درون محفظه پشت ماژول ریخته شده و آزمایشات تکرار شدند تا اثر ماده تغییر فاز خالص بر کاهش دمای سطح ماژول بررسی شود. سپس آزمایشات در غلظت‌های مختلف ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس تکرار شدند. در همه این مراحل، دماهای سطح ماژول تا وقتی که سیستم به حالت پایا برسد ضبط می‌شدند. در ابتدا برای انجام آزمایشات ذکر شده، دبی آب سرد (Q) روی 1 Lit/min تنظیم شده و مقدار ۱ kg ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده است. شکل ۴ تغییرات دمای متوسط سطح ماژول فتوولتائیک را در سه حالت ذکر شده نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در حالت بدون سیستم خنک‌کننده، دمای سطح ماژول با شیب تندی در حال افزایش یافتن بوده و تقریباً بعد از ۶۵ دقیقه به سمت ثابت شدن پیش رفته و به حدود $58/34^{\circ}\text{C}$ رسیده است. اما در مورد حالت‌های استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس مقادیر دمای سطح ماژول کاهش چشمگیری داشته و شیب افزایش دما کاهش یافته است. بعد از گذشت ۶۰ دقیقه، مقادیر دمای سطح ماژول برای حالت‌های استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس ثابت شده و سیستم به حالت پایدار رسیده است. دلیل کاهش دمای سطح ماژول در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، جذب گرمای اضافی از سطح آن توسط ماده تغییر فاز و است.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (1)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

مقادیر اندازه‌گیری شده را می‌توان به صورت $x = \bar{x} \pm \sigma_x$ و $x = \bar{x} \pm RSD(\%)$ گزارش نمود. در حالی که، RSD که انحراف استاندارد نسبی است، می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$RSD(\%) = 100 \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \quad (3)$$

ماکزیم مقدار عدم قطعیت برای داده‌های دمای سطح ماژول فتوولتائیک $4/4\%$ ، برای ولتاژ $3/6\%$ و برای توان اندازه‌گیری شده $4/1\%$ است.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

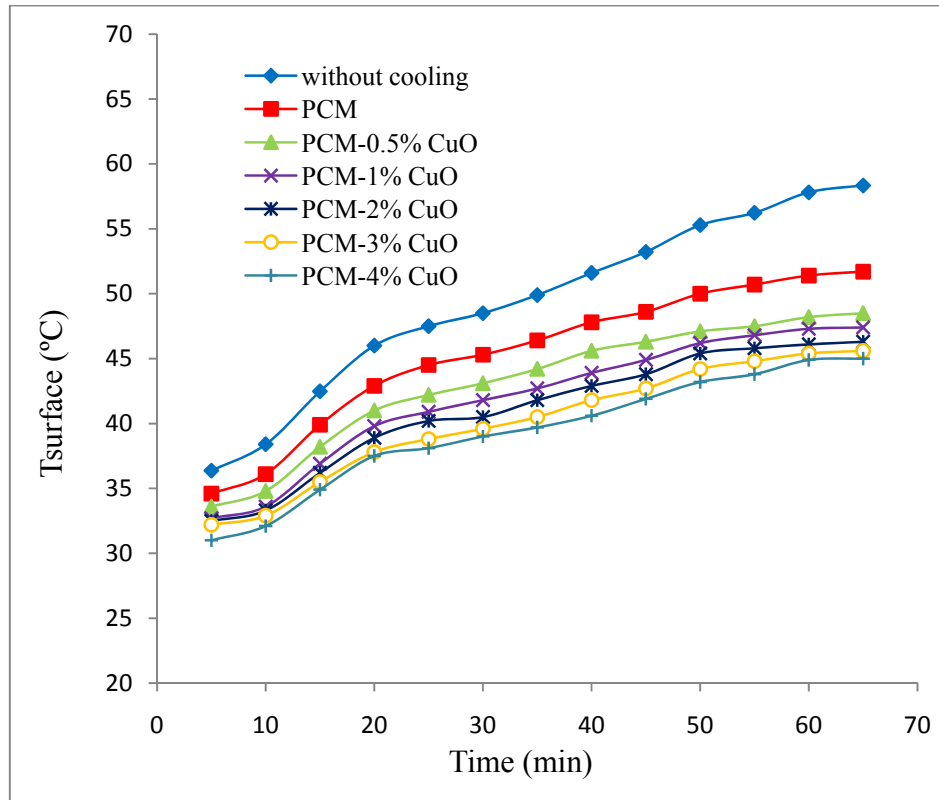
۳-۱- بررسی اثر ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس بر دمای سطح ماژول فتوولتائیک

در ابتدا آزمایشات برای حالت بدون سیستم خنک‌کننده انجام شده و همه داده‌ها شامل دمای سطح ماژول، ولتاژ و جریان ثبت شدند. جدول ۴ دماهای ۹ نقطه از سطح ماژول فتوولتائیک و همچنین میانگین آن‌ها را با گذشت زمان تا رسیدن به حالت پایا در حالت بدون سیستم خنک‌کننده نشان می‌دهد. مطابق این جدول، دما در اکثر نقاط سطح ماژول بعد از گذشت حدوداً ۶۰ دقیقه به حالت پایا رسیده و حداکثر

جدول ۴: تغییرات دمای سطح ماژول فتوولتائیک با زمان در حالت بدون سیستم خنک‌کننده.

Table 4: Surface temperature changing of the photovoltaic module over time without cooling system.

T _{ave}	T ₉ (°C)	T ₈ (°C)	T ₇ (°C)	T ₆ (°C)	T ₅ (°C)	T ₄ (°C)	T ₃ (°C)	T ₂ (°C)	T ₁ (°C)	زمان (دقیقه)
36/37	37/2	35/9	37/3	37/1	35/8	36	36/2	35/2	36/6	5
38/40	38/3	38	38/2	38/3	38/8	38/7	39	38	38/3	10
42/48	42	43/2	42/6	43/2	42/3	42/2	42/6	41/3	42/9	15
46/00	46/3	46/5	46	46/2	45/8	46/1	45/8	45/6	45/7	20
47/50	47/8	47	47/6	47/7	47/2	47/8	47/3	47/7	47/4	25
48/50	48/4	48/8	48/6	48/7	48/7	48/9	48/8	47/9	47/7	30
49/90	49/6	50/2	50	49/6	50/2	49/7	50/5	49/7	49/6	35
51/60	51/5	52/7	51/2	51/4	51/6	51/7	51/8	50/7	51/8	40
53/22	53/8	54/3	53/3	53/4	53/6	52/8	53	52/5	52/3	45
55/29	55/9	56/5	55/5	55/9	54/8	55/7	54	54/8	54/5	50
56/23	56/7	57/4	56/6	56/8	56/4	56/2	55/5	55	55/5	55
57/81	58/8	59/1	58/1	58	57/9	57/7	57	56/8	56/9	60
58/34	59	59/2	58/6	58/7	58/3	58/8	57/5	57/6	57/4	65



شکل ۴: تغییرات دمای متوسط سطح ماژول با زمان برای حالت بدون سیستم خنک‌کننده، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات (Q=1 Lit/min, W=1 kg).

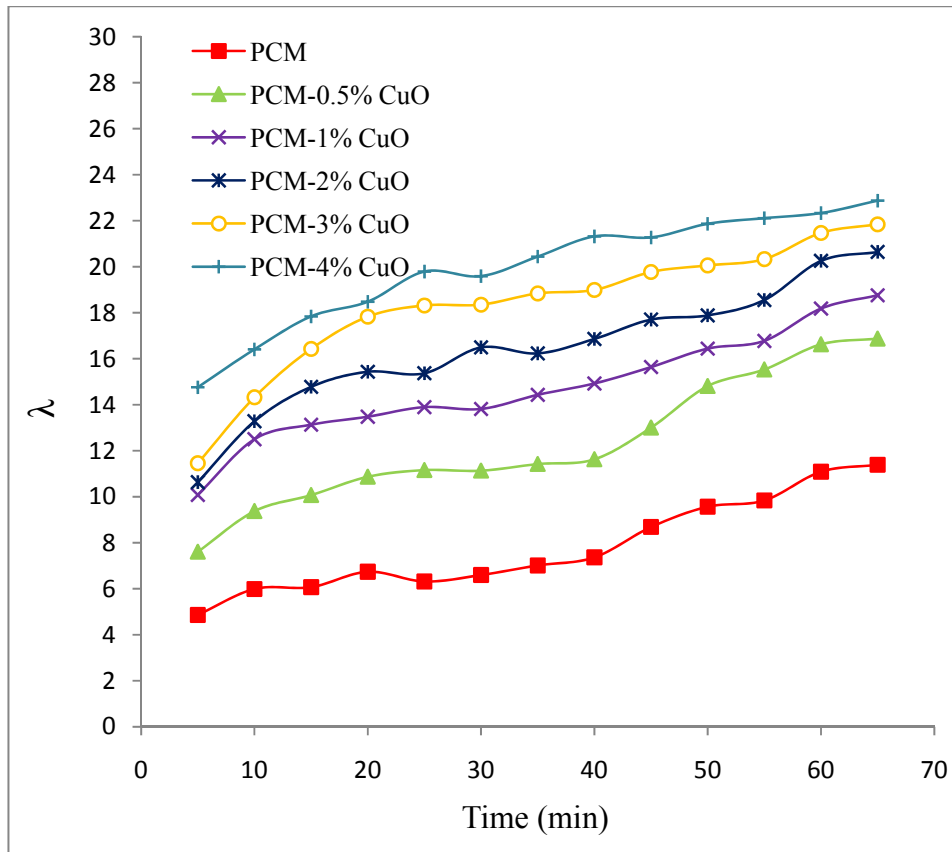
Fig. 4: Mean temperature variations of the module surface over time for cooling-free mode, using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously (Q = 1 Lit / min, W = 1 kg).

شکل ۵ نشان می‌دهد که با که در همه حالت‌ها، بازده خنک‌سازی با زمان با شیب نسبتاً تندی در حال افزایش بوده و تقریباً بعد از ۶۰ دقیقه به سمت ثابت شدن پیش رفته است. حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص کمترین بازده را داشته و حداکثر مقدار آن به ۱۱/۳۸ درصد می‌رسد. نانوذرات اکسید مس به علت داشتن ضریب هدایت حرارتی و همچنین ظرفیت گرمایی ویژه بالا منجر به افزایش ظرفیت جذب گرمای ماده ماده تغییر فاز دهنده شده و بنابراین بازده خنک‌سازی را افزایش می‌دهد.

همان‌طور که شکل ۵ نشان می‌دهد، با افزایش غلظت نانوذرات در ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس مقادیر λ افزایش چشمگیری داشته و بالاترین بازده خنک‌سازی مربوط به استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ بوده که حدود ۲۲/۸۷٪ است. بنابراین، در آزمایشات بعدی ماده ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ به عنوان یک حالت بهینه انتخاب شده است.

همچنین، مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس، کاهش دمای سطح ماژول افزایش یافته و بهترین حالت مربوط به ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ است که دما به ۴۵ °C رسیده است. وجود نانوذرات اکسید مس در ماده تغییر فاز منجر به افزایش هدایت حرارتی آن شده و ظرفیت جذب گرما را بالا می‌برد. همچنین افزودن نانوذرات به پارافین مطابق جدول ۳ منجر به کاهش نقطه ذوب آن شده که به نفع خنک‌سازی سیستم است. درصد نسبت کاهش دمای نسبی سطح ماژول در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده به دمای سطح ماژول در حالت بدون سیستم خنک‌کننده را به عنوان یک معیار بدون بعد به نام بازده خنک‌سازی می‌نامند. به منظور مقایسه عملکرد خنک‌سازی ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس، بازده کاهش دمای متوسط سطح ماژول فتوولتائیک نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کننده (λ) به صورت زیر تعریف شده است [۲۲]:

$$\lambda = \left| \frac{T_{PCM} - T_{no\ cooling}}{T_{no\ cooling}} \right| \times 100 \quad (4)$$



شکل ۵: تغییرات درصد کاهش دمای متوسط سطح ماژول نسبت به حالت بدون سیستم خنک‌کننده (λ) با زمان برای حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات ($Q=1$ Lit/min, $W=1$ kg).

Fig. 5: Changing percentage reduction of mean temperature of the module surface relative to the no-cooling system (λ) with time using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously ($Q = 1$ Lit / min, $W = 1$ kg).

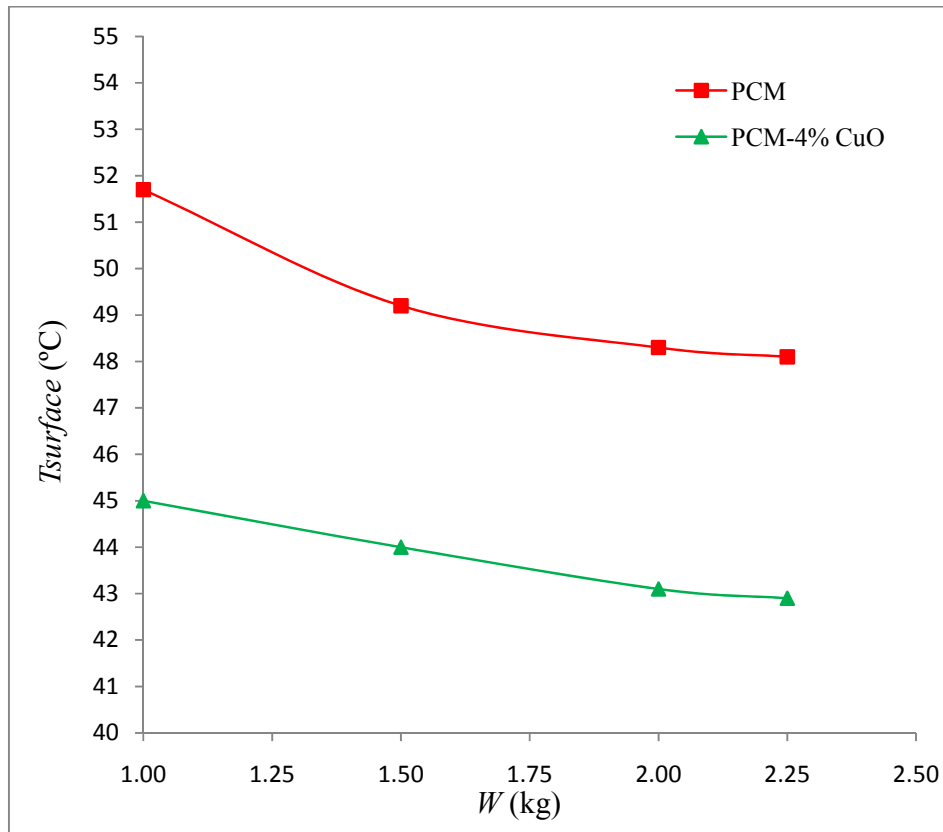
همان طور که انتظار می‌رود، مقایسه بین دمای سطح ماژول با ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ نشان می‌دهد که شیب تغییرات دمایی با مقدار ماده تغییر فاز دهنده با حالت استفاده از اکسید مس ۴٪ کمتر بوده است. در واقع، اثر مقدار مقدار ماده (W) در ماده تغییر فاز دهنده خالص مشهودتر بوده و با اضافه کردن نانوذرات به ماده تغییر فاز دهنده می‌توان ظرفیت جذب گرمای آن را بالا برده و از مقدار کمتر آن استفاده کرد. در پایان، در آزمایشات مرحله بعد مقدار ۲ kg به عنوان یک حالت مناسب برای ماده تغییر فاز دهنده انتخاب شده است.

۳-۳- اثر دبی آب خنک‌کن بر کاهش دمای سطح ماژول فتوولتائیک و راندمان کل

همان طور که گفته شد، به منظور به تعویق انداختن ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، از میلی لوله‌های مسی که در آنها

۲-۳- اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده بر کاهش دمای سطح ماژول فتوولتائیک

شکل ۶ اثر وزن ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب آن با ۴٪ نانوذرات اکسید مس بر تغییرات دمای سطح ماژول را نشان می‌دهد. در ابتدا با تغییر وزن ماده تغییر فاز دهنده از ۱ kg به ۱/۵ kg دمای سطح ماژول با شیب تندی در حال کاهش یافتن بوده و با تغییر وزن ماده تغییر فاز دهنده به ۲ kg شیب تغییرات دما کمتر شده است. افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده به معنای افزایش توانایی جذب گرمای سطح ماژول است. اما همان طور که در شکل مشاهده می‌شود تغییرات محسوس دمایی برای مقدار ماده تغییر فاز دهنده برابر ۲ kg و ۲/۲۵ kg مشاهده نمی‌شود و این بدین معناست که مقدار ۲ kg از ماده تغییر فاز دهنده برای دو حالت خالص و ترکیب آن با ۴٪ نانوذرات توانایی جذب گرمای سطح ماژول را داشته و به منظور صرفه‌جویی اقتصادی و همچنین راحتی کار، مقدار بیشتر آن توصیه نمی‌شود.



شکل ۶: اثر مقدار ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده (W) بر دمای متوسط سطح ماژول برای حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات (Q=۱ Lit/min, ϕ =۴% CuO).

Fig. 6: The effect of the amount of PCM (W) on the average surface temperature of the module using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously (Q = 1 Lit / min, ϕ = 4% CuO).

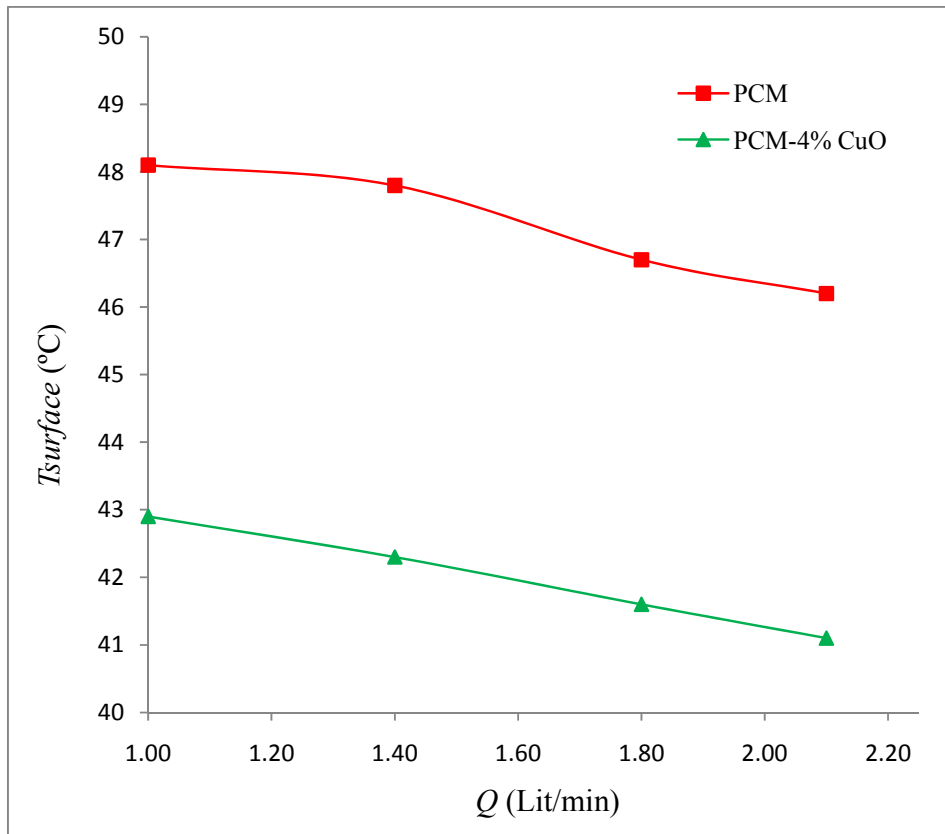
(Q) منجر به افزایش سرعت انتقال حرارت بین آب و ماده تغییر فاز دهنده اطراف لوله‌ها خواهد شد و بنابراین عملکرد ماده تغییر فاز دهنده برای کاهش دمای سطح ماژول را بهبود می‌بخشد.

در شکل ۷ مقایسه بین دمای سطح ماژول با ماده تغییر فاز دهنده خالص و ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴ درصد نشان می‌دهد که در حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ دمای سطح ماژول کمتر از ماده تغییر فاز دهنده خالص است که با نتایج قبلی تطابق دارد. در پایان، در آزمایشات مرحله بعد دبی برابر ۲/۱ Lit/min به عنوان یک حالت مناسب برای دبی آب خنک‌کن انتخاب شده است.

۴-۳- عملکرد الکتریکی

به منظور بررسی تأثیرات خنک‌سازی ماده تغییر فاز بر تولید برق توسط ماژول فتوولتائیک، ابتدا عملکرد ماژول بدون سیستم

آب سرد جریان دارد، استفاده شده است. لوله‌های مسی با فاصله از سطح ماژول قرار گرفته و در تماس با آن نبوده و تنها نقش خنک‌کننده ماده تغییر فاز دهنده در حالت مذاب را به عهده دارد. شکل ۷ دبی آب خنک‌کن (Q) جاری در میلی لوله‌های مسی که توسط ماده تغییر فاز دهنده احاطه شده‌اند را بر تغییرات دمای سطح ماژول را نشان می‌دهد. در واقع، آب سرد داخل لوله‌ها به منظور تبادل انتقال حرارت با ماده تغییر فاز دهنده به کار برده شده‌اند. با افزایش دمای سطح ماژول به مقدار بیشتر از دمای نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده، شاهد ذوب شدن آن خواهیم بود. بنابراین با جریان دادن آب خنک داخل لوله‌های مسی می‌توان مجدداً ماده تغییر فاز دهنده را به حالت جامد برگرداند و فرایند تبادل گرمای سطح ماژول به ماده تغییر فاز دهنده و تغییر حالت آن ادامه پیدا می‌کند. مطابق شکل، افزایش دبی آب خنک‌کن منجر به کاهش دمای سطح ماژول شده که به دلیل جلوگیری از ذوب شدن پارافین بوده است. در واقع، افزایش



شکل ۷: اثر دبی آب خنک‌کن (Q) بر دمای متوسط سطح ماژول برای حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده و استفاده همزمان ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات (W=۲ kg, ϕ=۴% CuO).

Fig. 7: The effect of cooling water flow (Q) on the average surface temperature of the module using PCM and PCM with nanoparticle simultaneously (W = 2 kg, ϕ = 4% CuO).

میزان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شده، روند مشخصی در افزایش توان تولیدی وجود دارد. با توجه به این شکل، حداکثر توان خروجی از سیستم فتوولتائیک ماده تغییر فاز دهنده برابر با ۳/۴۷ وات است که مربوط به W=۲/۲۵ kg در ولتاژ ۱۰/۲ V است.

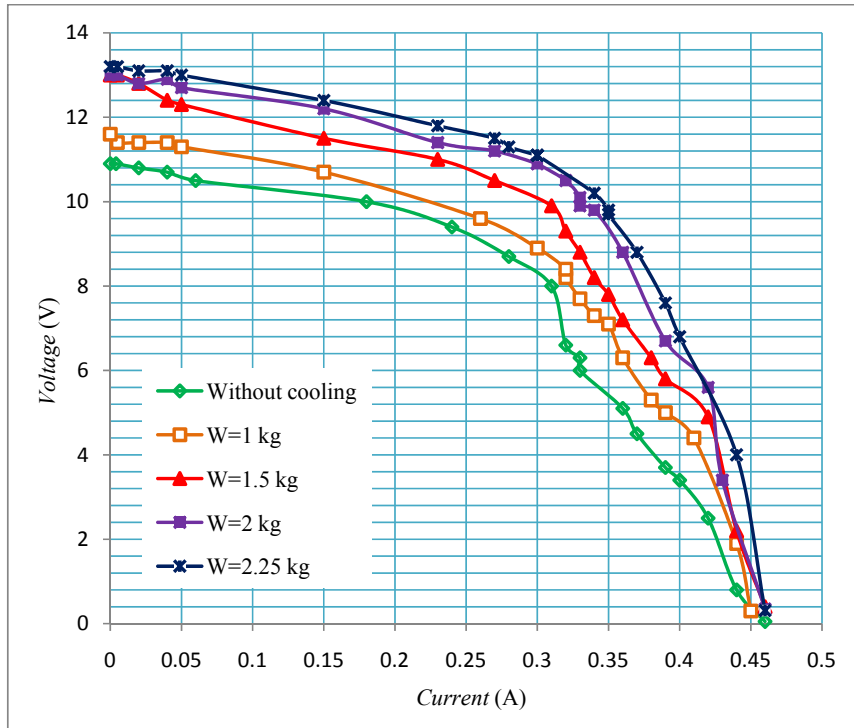
حداکثر توان خروجی تولید شده از ماژول (P_{max}) فتوولتائیک را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد [۲۳]:

$$P_{\max} = I_{PV} \times V_{PV} \quad (5)$$

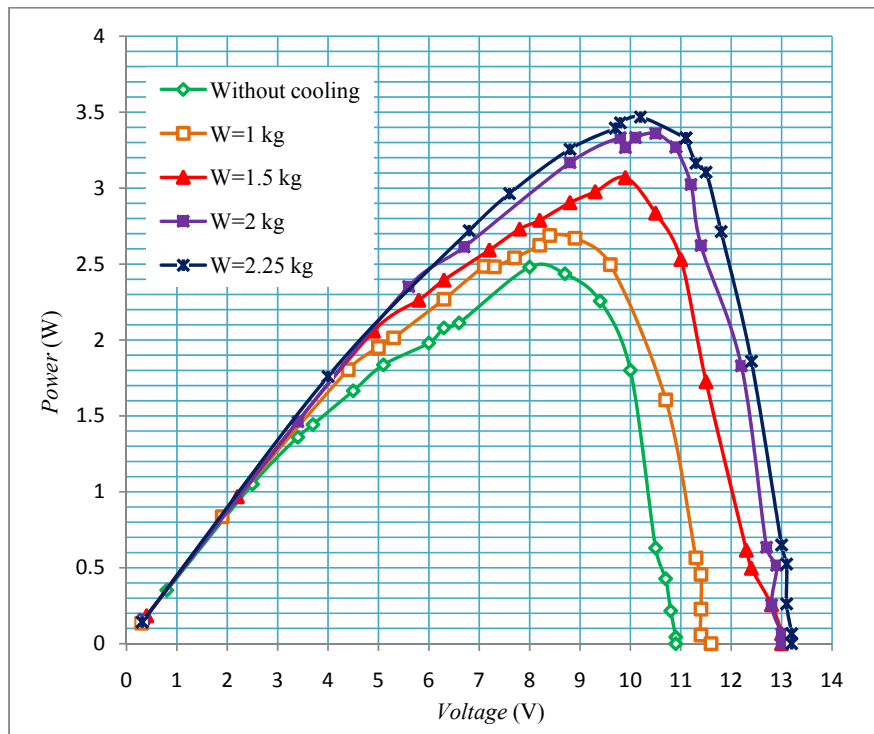
همان‌طور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، انرژی تولید شده از ماژول فتوولتائیک، با افزایش غلظت نانوذرات در ماده تغییر فاز دهنده و همچنین وزن ماده تغییر فاز دهنده، افزایش می‌یابد. همان‌طور که در بالا ذکر شد، افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس در پارافین موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی آن شده و در نتیجه عملکرد خنک‌کنندگی ماده تغییر فاز دهنده برای کاهش دمای سطح ماژول فتوولتائیک افزایش می‌یابد. بنابراین، توان تولیدی خروجی به علت کاهش دمای ماژول فتوولتائیک افزایش می‌یابد.

خنک‌کننده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس، داده‌های I-V از آزمایشات در چهار وزن مختلف از پارافین در ترکیب با ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ جمع‌آوری می‌شود. داده‌های آزمایشگاهی I-V ماژول فتوولتائیک در محدوده زمانی استاندارد، برای حالت بدون خنک‌سازی و برای (W=۱-۲/۲۵ kg) در شکل ۸ ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل زیر دیده می‌شود، مساحت تحت منحنی I-V با افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده افزایش می‌یابد. از آنجا که مساحت ناحیه زیر منحنی I-V میزان توان تولید برق را نشان می‌دهد، این نتایج به معنای افزایش توان خروجی از ماژول فتوولتائیک با افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده در ترکیب آن با نانوذرات اکسید مس است. مشابه داده‌های دمای سطح ماژول، تغییرات داده‌های I-V برای W=۲ kg و W=۲/۲۵ kg بسیار کم است.

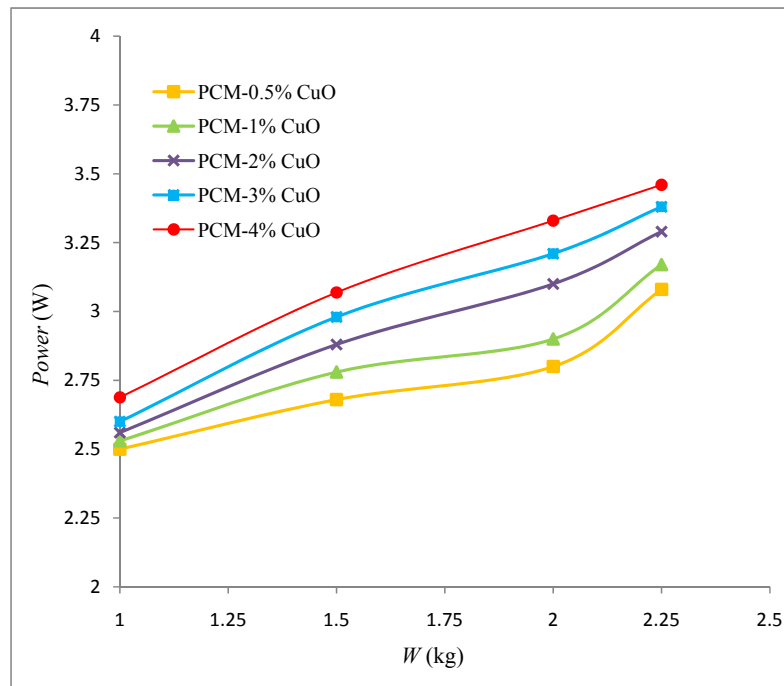
توان تولید شده از ماژول فتوولتائیک که با ماده تغییر فاز دهنده و اکسید مس ۴٪ کار می‌کند، به عنوان تابعی از ولتاژ خروجی در شکل ۹ ترسیم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش



شکل ۸: نمودار ولتاژ-جریان برای حالت‌های بدون سیستم خنک‌کننده و مقادیر مختلف ماده تغییر فاز دهنده ($Q=2.1$ Lit/min, $\phi=4\%$ CuO)
Fig. 8: Voltage-current diagram for coolant-free modes and different PCM values ($Q = 2.1$ Lit / min, $\phi = 4\%$ CuO)



شکل ۹: نمودار ماکزیمم توان-ولتاژ برای حالت‌های بدون سیستم خنک‌کننده و مقادیر مختلف ماده تغییر فاز دهنده ($Q=2.1$ Lit/min, $\phi=4\%$ CuO)
Fig. 9: Maximum voltage-voltage diagram for non-cooling modes and different values of PCM ($Q = 2.1$ Lit / min, $\phi = 4\%$ CuO)



شکل ۱۰: ماکزیمم توان‌های تولید شده ماژول فتوولتائیک با تغییر غلظت نانوذرات و وزن ماده تغییر فاز دهنده (Q=۲/۱ Lit/min)

Fig. 10: Maximum power produced by photovoltaic module by varying concentration of nanoparticles and weight of PCM (Q = 2.1 Lit / min).

از گرمای سطح ماژول و کنترل ظرفیت حرارتی سیستم منجر به افزایش بازده خنک‌سازی و توان تولیدی آن می‌شود. به منظور به تعویق انداختن ذوب شدن ماده تغییر فاز دهنده، لوله‌های مارپیچی مسی با فاصله کمی از سطح ماژول و در درون ماده تغییر فاز دهنده در محفظه پشت ماژول قرار گرفته‌اند و آب خنک از داخل آن‌ها در جریان است. افزودن نانوذرات اکسید مس به ماده تغییر فاز دهنده موجب افزایش ضریب هدایت حرارتی و توانایی جذب آن برای دریافت گرما شده و منجر به کاهش دمای سطح ماژول شده است. اثر غلظت نانوذرات و مقدار ماده تغییر فاز دهنده بر پارامترهای مختلف دمای سطح ماژول، افزایش توان ماکزیمم و بازده خنک‌سازی ماژول فتوولتائیک بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، استفاده از ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده و نانوذرات اکسید مس منجر به کاهش دمای سطح ماژول، افزایش بازده خنک‌سازی و همچنین افزایش توان تولیدی ماژول فتوولتائیک می‌شود. افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده خالص و ترکیب ماده تغییر فاز دهنده با CuO اکسید مس ۴٪، از ۱ kg به ۲/۲۵ kg منجر به کاهش دمای سطح ماژول به ترتیب از ۵۱/۷ به ۴۸/۱ سانتی‌گراد و از ۴۵ به ۴۲/۹ درجه سانتی‌گراد شده است. افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس، منجر به افزایش بازده خنک‌سازی

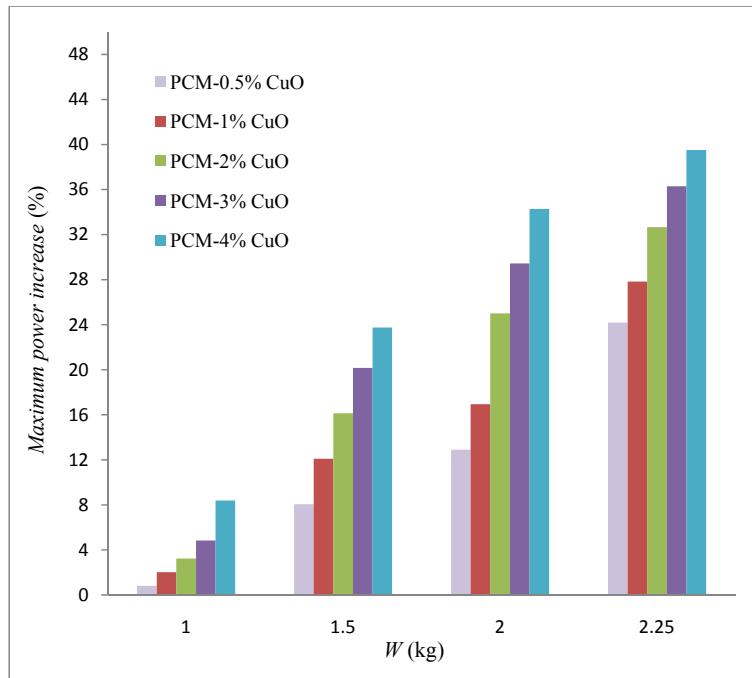
در این مطالعه، معادله (۶) برای محاسبه درصد افزایش ماکزیمم توان خروجی، P_{\max} ، استفاده می‌شود که به شرح زیر تعریف می‌شود:

$$P_{(\max)\text{increase}} = \left(\frac{P_{\text{PCM}} - P_{\text{no cooling}}}{P_{\text{no cooling}}} \right) \times 100 \quad (6)$$

درصد افزایش توان خروجی ماژول فتوولتائیک برای ترکیب تغییر فاز دهنده و نانوذرات با غلظت‌های مختلف در وزن‌های مختلف پارافین در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این شکل نیز نشان می‌دهد که افزایش غلظت نانوذرات اکسید مس در ماده تغییر فاز دهنده و افزایش وزن ماده تغییر فاز دهنده منجر به افزایش عملکرد خنک‌کنندگی آن شده و در نتیجه دمای سطح ماژول فتوولتائیک کاهش می‌یابد. بنابراین، انتظار می‌رود که درصد افزایش ماکزیمم توان خروجی نیز به علت کاهش دمای ماژول فتوولتائیک افزایش یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از ماده تغییر فاز دهنده جهت خنک‌سازی و کاهش دمای سطح یک ماژول فتوولتائیک استفاده شده است. ماده تغییر فاز دهنده در محفظه پشت ماژول قرار گرفته و با دریافت مقدار زیادی



شکل ۱۱: درصد افزایش توان تولید شده ماژول فتوولتائیک نسبت به حالت بدون سیستم خنک کننده در غلظت‌های مختلف نانوذرات و با تغییر وزن ماده تغییر فاز دهنده (Q=۲/۱ Lit/min).

Fig. 11: Percentage of power generated by the photovoltaic module compared to the no-cooling state at different concentrations of nanoparticles using changing of weight of PCM material (Q = 2.1 Lit / min).

	حروف یونانی
بازده خنک‌سازی (-)	λ
غلظت نانوذرات (-)	φ
	زیرنویس
ماکزیمم	max
بدون سیستم خنک کننده	no cooling
	اختصارات
فتوولتائیک	PV
ماده تغییر فاز دهنده	PCM
انحراف استاندارد نسبی	RSD

و مقدار توان تولیدی ماژول فتوولتائیک شده و بالاترین مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۲۲/۸۷٪ و ۳/۴۶ W مربوط به حالت استفاده از ماده تغییر فاز دهنده ۲/۲۵ kg و اکسید مس ۴٪ است.

تقدیر و تشکر

تحقیق حاصل بخشی از طرح پژوهشی با عنوان طراحی و ساخت خشک‌کن خورشیدی می‌باشد. بدین وسیله از حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه تقدیر و تشکر می‌گردد.

فهرست علائم

شدت میانگین بر سطح جاذب (W/m^2)	I
دمای سطح ماژول ($^{\circ}C$)	T
جریان ماژول فتوولتائیک (A)	I_{PV}
ولتاژ ماژول فتوولتائیک (V)	V_{PV}
ماکزیمم توان ماژول فتوولتائیک (W)	P_{max}
دبی آب خنک‌کن (Lit/min)	Q
مقدار ماده تغییر فاز دهنده مورد استفاده (kg)	W

منابع

- [1] Al-Waeli AH, Sopian K, Chaichan MT, Kazem HA, Hasan HA, Al-Shamani AN. An experimental investigation of SiC nanofluid as a base-fluid for a photovoltaic thermal PV/T system. Energy Convers Manage 2017; 142: 547-558.
- [2] Chandel S, Agarwal T. Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2017; 73: 1342-1351.

- module using phase change material. *Energy* 2018; 142: 803-812.
- [14] Preet S. Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 82: 791-807.
- [15] Nižetić S, Arıcı M, Bilgin F, Grubišić-Čabo F. Investigation of pork fat as potential novel phase change material for passive cooling applications in photovoltaics. *J of Clean Prod* 2018; 170: 1006-1016.
- [16] Su Y, Zhang Y, Shu L. Experimental study of using phase change material cooling in a solar tracking concentrated photovoltaic-thermal system. *Sol Energy* 2018; 159: 777-785.
- [17] Karunamurthy K, Murugumohankumar K, Suresh S. Use of CuO nano-material for the improvement of thermal conductivity and performance of low temperature energy storage system of solar pond. *Digest J Nano Mater Bio Struct* 2012; 7(4): 1833-1841.
- [18] Sardarabadi M, Passandideh-Fard M, Maghrebi M-J, Ghazikhani M. Experimental study of using both ZnO/water nanofluid and phase change material (PCM) in photovoltaic thermal systems. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2017; 161: 62-69.
- [19] Mousavi Baegi Seyed Reza, Sadrameli Seyed Mojtaba, Designs and Builds a Cooling System to Increase the Efficiency of Photovoltaic Panels Using Changing Phase Materials. *Sharif Mechanical Engineering Journal*, Volume 3-23, Number 1, pp. 77-82 (2016).(in Persian)
- [20] Chandrasekar M, Suresh S, Senthilkumar T. Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures. *Energy Convers Manage* 2013; 71: 43-50.
- [21] Karami E, Rahimi M, Azimi N. Convective heat transfer enhancement in a pitted microchannel by stimulation of magnetic nanoparticles. *Chem Eng Process* 2018; 126: 156-167.
- [22] Rostami Z, Rahimi M, Azimi N. Using high-frequency ultrasound waves and nanofluid for increasing the efficiency and cooling performance of a PV module. *Energy Convers Manage* 2018; 160: 141-149.
- [23] Karami N, Rahimi M. Heat transfer enhancement in a PV cell using Boehmite nanofluid. *Energy Convers Manage* 2014; 86: 275-285.
- [3] Kazem HA, Al-Badi HA, Al Busaidi AS, Chaichan MT. Optimum design and evaluation of hybrid solar/wind/diesel power system for Masirah Island. *Environ Dev Sustain* 2017; 19(5): 1761-1778.
- [4] Popovici CG, Hudişteanu SV, Mateescu TD, Cherecheş N-C. Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks. *Energy Procedia* 2016; 85: 425-432.
- [5] Emam M, Ookawara S, Ahmed M. Performance study and analysis of an inclined concentrated photovoltaic-phase change material system. *Sol Energy* 2017; 150: 229-245.
- [6] Kalogirou SA, Tripanagnostopoulos Y. Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production. *Energy Convers Manage* 2006; 47(18-19): 3368-3382.
- [7] Sardarabadi M, Passandideh-Fard M, Heris SZ. Experimental investigation of the effects of silica/water nanofluid on PV/T (photovoltaic thermal units). *Energy* 2014; 66: 264-272.
- [8] Ghadiri M, Sardarabadi M, Pasandideh-fard M, Moghadam AJ. Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids. *Energy Convers Manage* 2015; 103: 468-476.
- [9] Barrau J, Rosell J, Chemisana D, Tadriss L, Ibáñez M. Effect of a hybrid jet impingement/micro-channel cooling device on the performance of densely packed PV cells under high concentration. *Sol Energy* 2011; 85(11): 2655-2665.
- [10] Bahaidarah H, Subhan A, Gandhidasan P, Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions. *Energy* 2013; 59: 445-453.
- [11] Preet S, Bhushan B, Mahajan T. Experimental investigation of water based photovoltaic/thermal (PV/T) system with and without phase change material (PCM). *Sol Energy* 2017; 155: 1104-1120.
- [12] Klemm T, Hassabou A, Abdallah A, Andersen O. Thermal energy storage with phase change materials to increase the efficiency of solar photovoltaic modules. *Energy Procedia* 2017; 135: 193-202.
- [13] Karthick A, Murugavel KK, Ramanan P. Performance enhancement of a building-integrated photovoltaic