پیاده‌سازی سیستم خنک‌کننده جهت افزایش راندمان پنل‌های فتوولتائیک با استفاده از روش نیم‌لوله

علی شرفی[۱]، ابراهیم آقاجری [۲*]، علیرضا توکلی[۲]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲. استادیارگروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران ،

[*]نویسنده مسئول : aghajari@iauahvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۱

چکیده

خنک‌سازی پنل‌ها با استفاده از روش نیم‌لوله یکی از مهم‌ترین روش‌های مورد استفاده جهت افزایش بازده منابع خورشیدی است. از این‌رو در این مقاله، یک تحقیق تجربی برای ساخت یک پنل خورشیدی مبتنی بر روش خنک‌سازی نیم‌لوله با هدف افزایش بازدهی پنل‌های خورشیدی انجام شده است. در طرح پیشنهادی، نیم‌لوله‌ها مستقیماً روی سطح زیرین پنل تعبیه شده‌اند. سیال موجود که در این تکنیک آب می‌باشد درون نیم‌لوله‌ها و در تماس مستقیم با پنل بوده و فرآیند خنک‌سازی را به صورت مارپیچ روی سطح پنل انجام می‌دهد. از دو پنل جهت مقایسه عملکرد پنل مجهز به نیم-لوله و پنل فاقد این سیستم بهره گرفته شده است. پنل‌ها دارای ابعاد ۱۸۰×۱۵۰ سانتی‌متر و توان ۲۰۰ وات می‌باشند. از سه حسگر برای اندازه‌گیری دمای پنل‌ها و محیط استفاده شده است. نتایج بیانگر این است که بکارگیری روش نیم‌لوله می‌تواند دمای پنل‌ها را تا حدود ۱۰ درجه سانتیگراد کاهش دهد. علاوه بر این، نتایج بیانگر افزایش بازده ۳۶ درصدی پنل خورشیدی با بکارگیری روش نیم‌لوله می باشد.

کلمات کلیدی: سیستم فتوولتائیک، پنل خورشیدی، سیستم خنک‌سازی، افزایش بازده، حسگر دما.

مقدمه

در سال‌های اخیر بکارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر[۱] نظیر منابع فتوولتائیک پیوسته در حال افزایش می‌باشد. با توجه به اینکه توان خروجی این منابع، وابسته به شدت تابش، دما و ولتاژ ترمینال است، کنترل نقطه‌کار امری حائز اهمیت است. دمای بالای پنل‌ها در فصول گرم سبب کاهش میزان بازدهی می‌شود. لذا، از روش‌های خنک‌سازی جهت کاهش دمای پنل‌های فتوولتائیک و افزایش بازدهی آن‌ها استفاده می‌گردد. با توجه به محدود بودن منابع انرژی تجدید ناپذیر[۲] ، مانند نفت و گاز و همچنین مشکلات و نگرانی‌های زیست محیطی که به‌واسطه این انرژی‌ها بوجود آمده است مانند تغییرات اقلیم، آلودگی هوا و تخریب محیط زیست و هزینه‌های رو به افزایش آن‌ها، لزوم تلاش‌ها برای استفاده از انواع انرژی تجدیدپذیر را تقویت نموده است. حسب ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان به مزایای این انرژی در مقایسه با منابع تجدیدناپذیر، از جمله پایداری این منابع، عدم آلایندگی و یا آلودگی بسیار کم، حداقل تأثیرات زیست محیطی، هزینه تعمیر و نگهداری پایین و طول عمر بالا، امکان تولید انرژی در محل مصرف (کاهش تلفات شبکه) و غیره اشاره نمود. در کنار مزایای فوق، این منابع انرژی علاوه بر نیاز به زیرساخت‌های اساسی دارای معایبی از جمله وابستگی میزان انرژی تولید شده به پارامترها و شرایط محیطی، راندمان پایین تبدیل انرژی‌های تجدیدپذیر، فناوری جدید آن‌ها و نیاز به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا می‌باشند. درمیان منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی[۳] در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. میزان انرژی دریافتی زمین از

[1] Renewable Energy Resources
[2] Non-Renewable Energy Resources
[3] Solar Power

خورشید بسیار زیاد بوده به‌طوری که در هر ثانیه، هر متر مربع زمین حدود ۳۴۰ وات انرژی از خورشید دریافت می‌کند. از این قابلیت می‌توان با استفاده از پنل‌های فتوولتائیک گرمای حاصل از خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل نمود[۱]. عوامل مختلفی میزان انرژی تولید شده توسط پنل‌های خورشیدی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از جمله این عوامل می‌توان به میزان گرد و غبار، سایه‌ها، زاویه نصب پنل‌ها، دمای محیط و غیره اشاره کرد[۲]. برای سیستم‌های فتوولتائیک[1](PV) دمای عملکرد پنل‌ها یکی از پارامترهای اصلی و موثر بر بازده[2] آن‌هاست. گزارش شده است که هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش در دمای پنل‌های خورشیدی می‌تواند باعث حدود ۰/۴۵٪ کاهش در بازده سلول‌های خورشیدی شود[۳]. با این‌حال، بازده و طول عمر پنل‌های خورشیدی به طور قابل توجهی تحت تأثیر شرایط آب و هوایی مانند دمای محیط و دمای عملیاتی قرار دارند. گزارش شده است که تنها حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد از تابش خورشیدی جذب شده توسط پنل خورشیدی می‌تواند به انرژی الکتریکی تبدیل شود، مابقی به صورت گرما هدر می‌رود[۴]. گرمای بیش از حد جذب‌شده از خورشید، انرژی تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی را محدود خواهدکرد که این مشخصه اهمیت خنک‌سازی پنل‌ها[3] را مشخص می‌کند و محققان را ملزم به به تحقیق و پژوهش در جهت رفع این مشکل دارد. از این‌رو روش‌های مختلفی جهت خنک‌سازی ارائه شده است، از جمله آن-ها می‌توان به خنک‌سازی با اسپری کردن آب، هوا، نانوسیال، ژل‌های پلیمری اشاره نمود البته که هرکدام مزایا و معایب خود را دارند[۵]. بازده پنل‌های خورشیدی در کنار همه عوامل دیگر، بخش مهمی از طراحی یک سیستم فتوولتائیک کارآمد محسوب می‌شود. کارآمدی یک پنل خورشیدی مانند راندمان سوخت در یک خودرو، به‌معنای استفاده از مواد اولیه کمتر، ردپای زیست محیطی کوچک‌تر و فضای کمتر برای تولید انرژی الکتریکی است. علاوه بر این، در برخی از موارد، استفاده از پنل‌های خورشیدی با بهره‌وری بالا، تنها گزینه است. چنانچه فضای نصب محدود باشد، توجه به کارایی پنل‌های خورشیدی به منظور اطمینان از تولید انرژی الکتریکی کافی بسیار اهمیت دارد. این اصل بیشتر برای ساختمان‌های مسکونی کوچک‌تر که مساحت سقف یا زمین‌های بلا استفاده در آن‌ها محدود است، صدق می‌کند. یکی از روش‌های افزایش بازده پنل‌های فتوولتائیک خنک-سازی آن‌ها و کاهش دمای سلول‌هاست. بنابراین، بررسی و مطالعه پیرامون روش‌های خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک امری ضروری و حائز اهمیت می‌باشد. در این میان، روش نیم‌لوله که مبتنی بر گردش آب است یکی از روش‌های مهم و پرکاربرد در فرآیند خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک و در نتیجه بهبود راندمان آن‌ها به شمار می‌رود که بررسی پیاده‌سازی عملی آن در محیط‌هایی که امکان انجام آزمایشات منابع فتوولتائیک وجود دارد نظیر نیروگاه خورشیدی تحقیقاتی دانشگاه آزاد واحد اهواز، امری ضروری و قابل‌توجه می‌باشد. کلمکار و همکاران[۶]، جهت بهبود کارایی پنل‌های خورشیدی، یک روش تنظیم هوای فشرده ارائه و مورد مطالعه و آزمایش قرار دادند که می‌تواند به‌طور همزمان پنل‌ها را تمیز و خنک کند. در این مطالعه، از مکانیزم چسبندگی و جداسازی گرد و غبار استفاده شده و تغییرات دمایی ناشی از فرآیند وزش هوا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این روش، مدل‌های دینامیک انتشار هوای فشرده برای افزایش خروجی توان پنل‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان داده است که چگونه ناکارآمدی ناشی از فرسودگی و دماهای بالا را می‌توان با جریان هوای فشرده تنظیم شده کاهش داد. ریوپینگ و همکاران[۷] آرایه‌های پنل‌های فتوولتائیک یک منطقه خشک برای مطالعه و بررسی انتخاب نمودند. این پژوهش به بررسی دقیق تأثیر سطح جلو، سطح پشت پنل و خنک‌سازی ترکیبی سطح جلو و عقب بر روی سیستم‌های فتوولتائیک مبتنی بر آب پرداخته است. نتایج نشان داده که در گام اول خنک‌سازی سطح جلو، کاهش دمای ۲۲ الی ۲۷ درجه سانتیگراد و در گام دوم پاکیزگی سطح پنل انجام خواهد شد. ابدل و همکاران [۸] و همچنین معادی و همکاران [۹] از سیستم خنک‌کننده اسپری آب درسطح جلویی پنل و ساختار خاک رس و پنبه در بخش پشت پنل استفاده کردند. در این روش، از نوعی سیستم کلکتور جاذب حرارتی فتوولتائیک استفاده شده است که از دیدگاه تولید انرژی الکتریکی و گرمایی و از لحاظ اقتصادی برتر است و همچنین برای پشت پنل‌ها از تکنیک خنک‌سازی تبخیری با استفاده از ساختار خاک رس و

[1] Photovoltaic System
[2] Efficiency
[3] Panel Cooling System

پنبه راه‌حل موثری برای یک سیستم پیاده‌سازی گردیده است. در پژوهش آنها اثبات شده که خنک‌سازی دوگانه برای پنل‌های فتوولتائیک در یک منطقه گرم و خشک مناسب خواهد بود. جعفرپور و همکاران[۱۰] برخی از روش‌های جدید خنک‌سازی پنل‌های خورشیدی از جمله روش نیم‌لوله تشریح و مورد بررسی قرار دادند و با مقایسه معایب، مزایا و ویژگی‌های هر روش، روش‌های بهینه و مناسب برای هر یک از شرایط آب و هوایی و جغرافیایی معرفی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب روش خنک‌کاری پنل خورشیدی متناسب با وضعیت مالی، جغرافیایی و همچنین، آب و هوایی منطقه مورد نظر، اثر به سزایی در بازدهی پروژه و به دنبال آن، توجیه‌پذیری بهتر پروژه‌های ساخت منابع فتوولتائیک دارد. صدرزاده و همکاران [۱۱] با بکارگیری روشی مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی، نتایج تجربی حاصل از بکارگیری یک لوله حرارتی ترموسیفون جهت خنک‌سازی پنل‌های خورشیدی ارائه و مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار دادند. در مطالعات صورت گرفته، تأثیر پارامترهایی نظیر زاویه پنل، شدت تابش نور خورشید، دمای هوا و همچنین، غلظت نانوسیال مورد استفاده به منظور حصول بالاترین میزان بازدهی پنل خورشیدی بررسی شده است. شبکه‌های عصبی چند لایه جهت به دست آوردن تعداد بهینه نورون ها آموزش داده شده است. سپس، با استفاده از روش بهینه‌سازی رقابت استعماری، صحت و دقت این آموزش به صورت بهینه تعیین شده است. نتایج بیانگر این است که خطای این روش بسیار پایین است. لذا، به منظور تخمین بهترین شرایط بهره برداری از لوله‌های حرارتی ترموسیفون از روش مذکور استفاده گردیده است. بعد از بهینه‌سازی آموزش در شبکه‌های عصبی و بکارگیری این شبکه به شکل بهینه، شرایط بهره‌برداری بهینه نانوسیال در شرایط دمایی و تابشی مختلف تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای تابش در روزهای معمولی و دمای هوای ۲۵ درجه سانتیگراد، بیشینه توان تولیدی منابع خورشیدی برابر ۳۴/۴۵ وات است که در مقایسه با حالتی که این روش خنک‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته است، افزایش ۸ درصدی را نشان می‌دهد. صالحی و همکاران[۱۲] سیستم توسعه یافته از دو بخش اصلی پنل خورشیدی و واحدهای خنک-کننده ارائه نمودند. عملکرد سیستم در دو حالت خنک‌کننده استفاده از ماژول ترموالکتریک و خنک‌کننده طبیعی سیستم با همرفت آزاد مقایسه شده است. نتایج نشان داده است که استفاده از ماژول ترموالکتریک می‌تواند بازده و توان پنل‌های خورشیدی را به طور متوسط ۱۰/۵۰ درصد افزایش دهد. دمای پنل خورشیدی در طول زمان آزمایش به طور متوسط حدود ۱۰/۰۴ درجه سانتیگراد کمتر از شرایط بهره‌برداری عادی بوده است. نتایج این مطالعه نشان داد که طراحی صنعتی پنل‌های خورشیدی با سیستمی برای کاهش گرمای اضافی ناشی از تابش خورشیدی می‌تواند نقش مؤثری در بهبود بازدهی این پنل‌ها داشته باشد. هان و همکاران[۱۳] روش دیگری که می‌توان جهت خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک و کاهش دمای آن‌ها به کار گرفت، بیان نمودند. روش مبتنی بر شناور شدن در سیالی مانند آب می‌باشد. با بکارگیری این روش خنک‌سازی، یک پنل فتوولتائیک در سازه‌های بزرگ نظیر رودخانه‌ها، اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، کانال‌ها و غیره شناور می‌گردد. آب به عنوان سیال غوطه‌وری، حرارت را از پنل‌های فتوولتائیک جذب نموده و دمای سطح پنل را حفظ می‌نماید. لذا، زمانی که آب، حرارت را از پنل فتوولتائیک جذب می‌نماید، بازده پنل بهبود پیدا می‌کند. از مهم‌ترین مزایای این روش خنک‌سازی می‌توان به هزینه‌های پایین، سازگاری بالا با محیط زیست می‌باشد. در مقابل از معایب این روش کاهش بازدهی در روزهای ابری و تحت تأثیر قرار گرفتن راندمان پنل فتوولتایک توسط آب یونیزه است. شریواستاوا و همکاران[۱۴] به بررسی روش مبتنی بر گردش اجباری هوا پرداختند. این روش نیازمند ادوات و تجهیزاتی جدید جهت ایجاد جریان هوا با سرعت بالا روی سطح پنل فتوولتائیک است. از مزایای آن، بالا بودن نرخ انتقال حرارت و هم‌چنین عدم وابستگی روش به دمای هوا، سرعت، جهت باد و معایب آن، بالا بودن هزینه اولیه ادوات، مصرف بالای انرژی الکتریکی و سروصدای زیاد تجهیزات است. استفاده از این روش سبب بهبود بازدهی پنل‌های خورشیدی و در نتیجه افزایش میزان توان تولیدی این منابع می‌شود. نکته حائز اهمیتی که در مورد استفاده از این روش وجود دارد، این است که میزان انرژی الکتریکی تولیدی در مقایسه با انرژی مورد نیاز جهت ایجاد سیستم جریان اجباری هوا پایین‌تر است و به همین دلیل، این روش راه مطلوب و مناسبی جهت کنترل دمای سطح پنل‌های فتوولتائیک نیست.

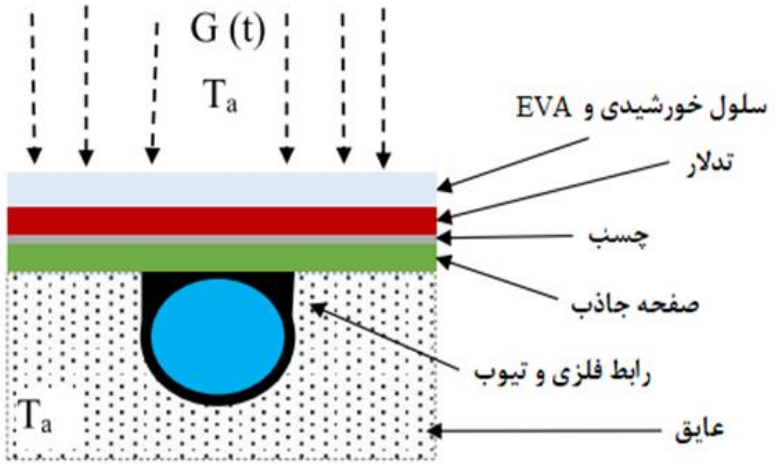
با توجه به مطالعات صورت پذیرفته و بررسی روش‌های موجود و نظر به اقلیم گرم و خشک استان خوزستان و در راستای کاهش هزینه، این تحقیق مبتنی بر اجرای روش خنک‌سازی مبتنی بر گردش آب با استفاده از تکنیک نیم‌لوله می‌باشد که گام

عملی و اجرایی آن جهت سامانه خورشیدی تحقیقاتی دانشگاه آزاد اهواز انجام می‌گردد. به‌همین منظور، پیاده‌سازی و اجرای یک روش مناسب برای کاهش دمای پنل‌های فتوولتائیک با توجه به منطقه جغرافیایی و اقلیم استان خوزستان و منطقه گرم و خشک مد نظر می‌باشد.

روش پیشنهادی سیستم خنک کننده

ابتدا طرح پیشنهادی برای خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک با استفاده از روش نیم‌لوله ارائه می‌شود. این طرح به صورت عملی نیز پیاده‌سازی شده است که مراحل انجام و مشخصات طراحی تشریح شده است. هرچند نتایج خروجی در این مقاله مبتنی بر روش پیاده‌سازی عملی پنل‌های خورشیدی و روش نیم‌لوله است نه محاسبات نرم‌افزاری، اما در ادامه فرمول‌بندی و مدل‌سازی ریاضی مربوط به روش خنک‌سازی نیم‌لوله جهت درک بهتر این روش و تأثیر آن بر بازده پنل‌های خورشیدی ارائه می‌شود.

در این طرح، نیم‌لوله‌ها مستقیم روی سطح پنل تعبیه شده‌اند و جهت مبدل یک رادیاتور و فن می‌باشد. برای به گردش درآوردن آب از پمپ با یک شیر جهت کم کردن فشار آب استفاده می‌شود و آب در داخل این نیم‌لوله‌ها جریان دارد. آبی که داخل نیم‌لوله‌ها و در تماس با پنل است برای خنک‌کردن می‌باشد و بعد از گردش به صورت مارپیچ روی سطح پنل وارد رادیاتور جهت خنک‌سازی می‌شود در ادامه مجددا آب برای خنک‌سازی توسط پمپ به‌گردش در می‌آید. لازم به ذکر است که از دو پنل برای نمونه گیری توسط دیتالاگر[1] استفاده شد که پنل اول، پنلی عادی و بدون هیچ گونه خنک‌سازی می‌باشد. پنل دوم نیز از روش نیم‌لوله برای خنک‌سازی بهره می‌برد. بار مصرفی برای هر کدام از این پنل‌ها، جهت گرفتن بیشترین جریان از ۴ لامپ ۲۴ولت DC با توان مصرفی ۶۰ وات استفاده شده که دو به دو به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. در یک سیستم خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک، لایه‌های قسمت‌های مختلف سیستم مطابق شکل (۱) می‌باشند.



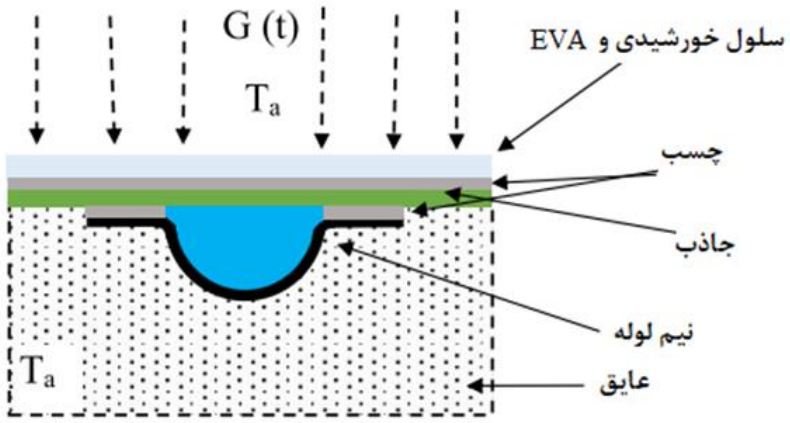
شکل ۱: بخش مشترک سیستم‌های خنک‌سازی پنل‌های فتوولتائیک

برای نوع رایج، لایه‌بندی از بالای پنل به شرح زیر است:

شیشه، EVA، سلول‌های خورشیدی، چسب، صفحه جاذب، رابط فلزی (اتصال جوش)، لوله و عایق.

در این طرح، با حذف چندین لایه، مقاومت حرارتی کل سیستم کاهش می‌یابد. بر این اساس، شکل (۲) نشان می‌دهد که سلول‌های خورشیدی روی یک صفحه فلزی قرار می‌گیرند.

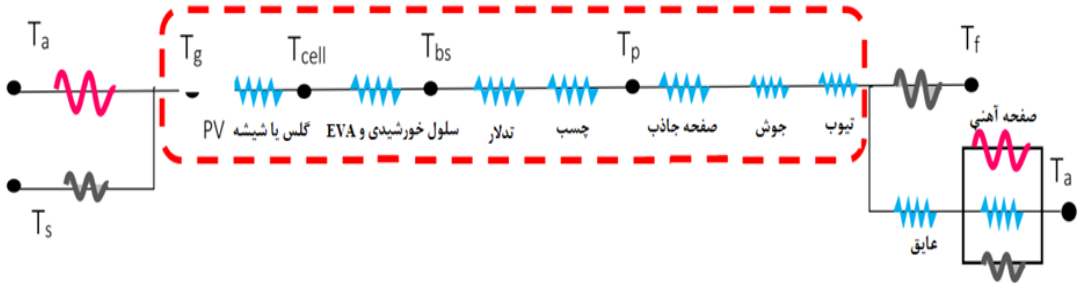
[1] Data Logger



شکل ۲: بخش اتصال نیم‌لوله به پنل‌های فتوولتائیک

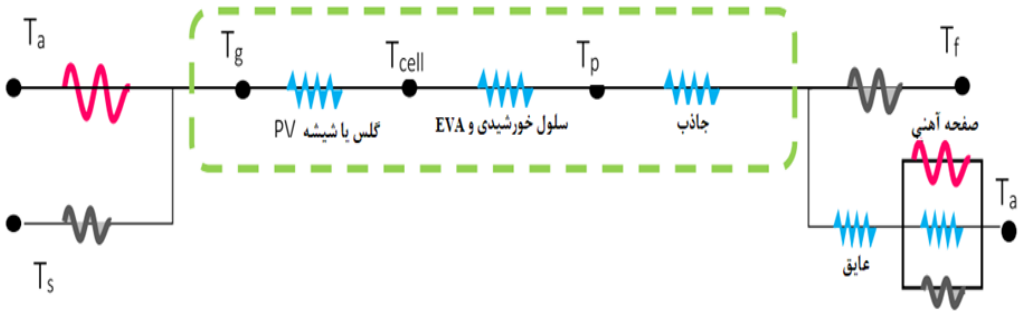
این صفحه برای جلوگیری از اتصال کوتاه آنودیزه می‌شود. علاوه بر این، نیم‌لوله به جای لوله کامل به عنوان کانال سیالی که منجر به تماس مستقیم آب با صفحه جاذب می‌شود، استفاده می‌گردد. نیم‌لوله با استفاده از چسب‌های مخصوص به صفحه جذب‌کننده چسبانده می‌شود.

شکل (۳)، مقاومت حرارتی لایه‌های مختلف را برای سیستم فتوولتائیک مورد نظر نشان می‌دهد.



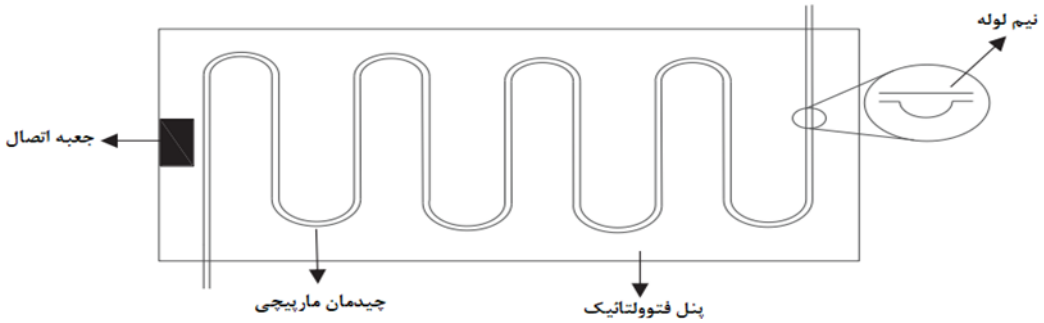
شکل ۳: مدار مقاومت حرارتی در سیستم‌های خنک‌سازی سنتی

سه نوع مکانیسم انتقال حرارت به عنوان هدایت، همرفت و تابش در مکان‌های مختلف نشان داده شده است. در طرح جدید که در شکل (۴) نشان داده شده است، مقاومت حرارتی تدلار، چسب (ارتباط بین تدلار و صفحه جاذب)، رابط فلزی و دیواره لوله حذف شده است. بنابراین، پیشرفت‌های قابل توجهی در فرآیند انتقال حرارت از سلول‌های خورشیدی به سیال و در نتیجه بهبود فرآیند خنک‌سازی پنل‌های خورشیدی انتظار می‌رود.



شکل ۴: مدار مقاومت حرارتی در سیستم‌های خنک‌سازی پیشنهادی

بر اساس طرح فوق، نیم‌لوله دارای باله‌هایی با آرایه مارپیچ است که در شکل (۵) نشان داده شده است. طراحی به گونه‌ای است که پشت هر ردیف سلول خورشیدی یک ردیف نیم‌لوله وجود دارد.



شکل ۵: اتصال نیم‌لوله مارپیچ به پنل فتوولتائیک

با نصب تجهیزات اندازه‌گیری شامل دماسنج و روتامتر، دما و دبی جریان آب قابل اندازه‌گیری است. داده‌های مربوط به میزان شدت تابش نور خورشید نیز می‌تواند توسط یک تحلیلگر منابع فتوولتائیک اندازه‌گیری و ثبت شود. علاوه بر این، این آنالایزر سیستم خورشیدی می‌تواند مشخصات الکتریکی پنل خورشیدی مانند ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه، منحنی جریان-ولتاژ، تابش خورشید، دمای پنل، محاسبه حداکثر توان پنل خورشیدی و ولتاژ و جریان مربوط به این نقطه و بازده پنل خورشیدی را نیز اندازه‌گیری نماید. توان هر یک از پنل‌ها را نیز جهت مقایسه ارائه می‌دهد. برای گردش جریان آب از پمپ استفاده می‌شود. در تنظیمات آزمایشگاهی، دماسنج با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد مجهز به نمایشگر دیجیتال بر روی ورودی و خروجی پنل قرار می‌گیرد.

مدل سازی

با توجه به معادلات مقاومت حرارتی و انرژی تعادلی که در مطالعات قبلی برای پنل‌های خورشیدی ارائه شده است، معادلات ریاضی برای مدل‌سازی سیستم مشترک قابل استخراج است.

دمای شیشه یا گلس پنل خورشیدی را می‌توان بر حسب شدت تابش نور خورشید از رابطه زیر به دست آورد:

$$T_g = \left(\tau_G \alpha_g G(t) - \left(\frac{t_g}{k_g}\right) T_c + \left(h_{conv,t} + h_{r,gs}\right) T_{amb}\right) / \left(\left(h_{conv,t} + h_{r,gs}\right) - \left(\frac{t_g}{k_g}\right)\right) \quad (۱)$$

ضرایب انتقال حرارت همرفتی و تابشی بین شیشه و محیط را می‌توان به ترتیب، از روابط زیر محاسبه نمود:

$$h_{conv,t} = 2.8 + 3V_w \quad (۲)$$

$$h_{r,gs} = \varepsilon_G \sigma \left(T_G^2 + T_s^2\right)\left(T_G + T_s\right) \quad (۳)$$

که در آن، V_w سرعت باد، ε_G ضریب انتشار شیشه، σ ثابت بولتزمن، T_G دمای تابش خورشید و T_S دمای آسمان است.

دمای سیال نیز از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

$$T_{f,out} = T_{f,in} + \left(\frac{\dot{Q}_u}{\dot{m} C_{pw}}\right) \quad (۴)$$

$$T_f = \frac{T_{f,out} - T_{f,in}}{2} \quad (۵)$$

که در آن، $T_{f,out}$ دمای سیال بیرونی، $T_{f,in}$ دمای سیال درونی، $\dot{Q}_u$ نرخ انتقال حرارت مفید، $\dot{m}$ نرخ جرم- شارش سیال و C_{pw} ظرفیت حرارتی ویژه آب می‌باشد.

حال، می‌توان پارامترهای عملکردی مانند راندمان حرارتی، راندمان الکتریکی و راندمان کل سیستم را محاسبه کرد. راندمان حرارتی مدل بر اساس رابطه زیر به صورت نسبت گرمای مفید جذب شده توسط سیال عامل به مقدار انرژی تابش خورشیدی ساطع شده بر روی سطح پنل فتوولتائیک تعریف شده است.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G(t)} = F_R \left[h_{p1} h_{p2} (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U_L \left(T_{f,in} - T_{amb}\right)}{G(t)} \right] \quad (۶)$$

راندمان الکتریکی بر حسب دمای فتوولتائیک با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن، $\eta_{el.ref}$ در دمای مرجع ۲۵ درجه سانتیگراد تعریف شده است. بازدهی کل سیستم نیز از مجموع بازدهی الکتریکی و حرارتی به دست می‌آید.

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref} \left[1 - \beta \left(T_{cell} - T_{ref} \right) \right] \quad (۷)$$

$$\eta_{ov} = \eta_{th} + \eta_{el} \quad (۸)$$

که در آن، η_{ov} بازدهی کل، η_{th} بازدهی حرارتی و η_{el} بازدهی الکتریکی می‌باشد.

بررسی نتایج

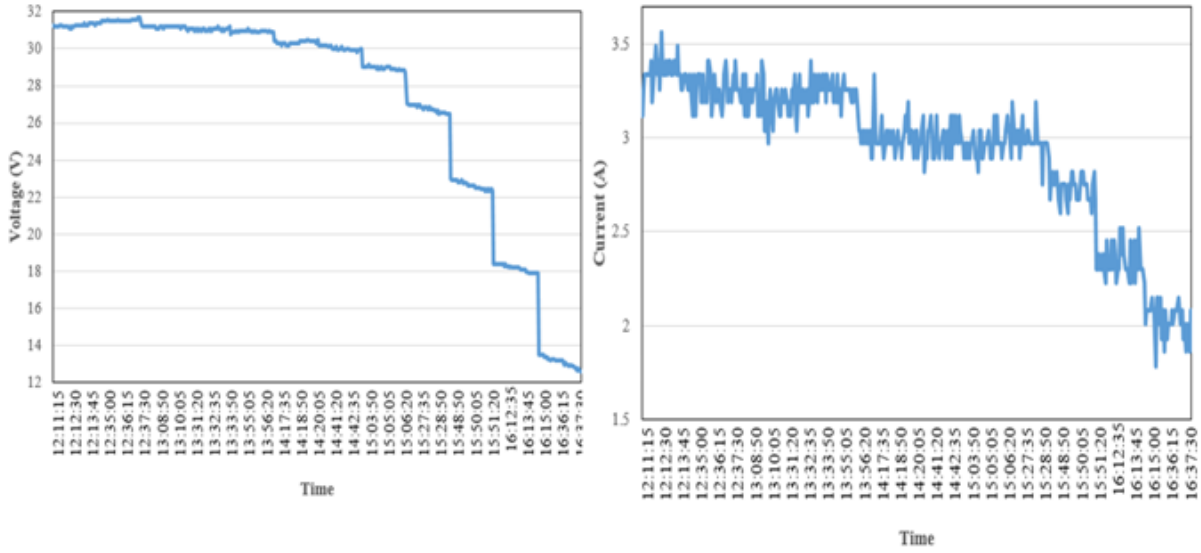
طرح پنل خورشیدی ساخته شده در دو حالت با و بدون بکارگیری روش نیم‌لوله جهت خنک‌سازی پنل، مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی طرح، استخراج، بررسی و تجزیه و تحلیل شد.

بدین منظور از دو پنل با ابعاد ۱۸۰×۱۵۰ سانتیمتر استفاده شده است که توان آن‌ها ۲۰۰وات است. بدیهی است که در شرایط بهره‌برداری عملی به علت اینکه بازدهی پنل‌های خورشیدی ۱۰۰ درصد نیست، نمی‌توان انتظار دریافت توان ۲۰۰وات را در خروجی داشت. پنل‌ها در شرایط کاملاً مشابه از نظر مکان، زمان و زاویه قرارگیری در برابر خورشید قرار گرفتند. در این مطالعه، دمای آب ورودی ۲۳درجه سانتیگراد و دمای آب خروجی نیز ۲۹درجه سانتیگراد بوده است. تصویری از آماده‌سازی پنل خورشیدی با نیم لوله‌های سیستم خنک کننده در شکل (۶) قابل مشاهده است.

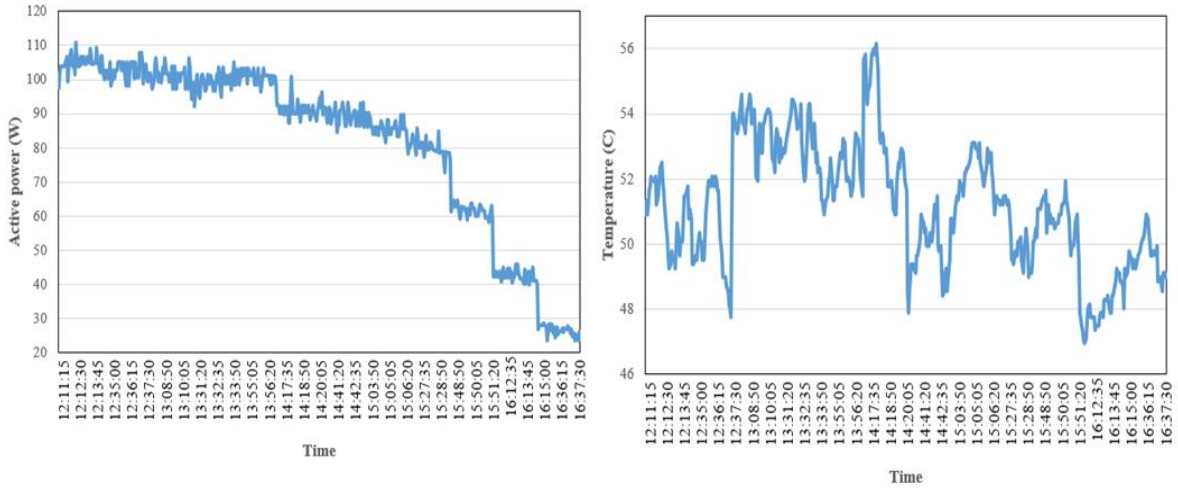
شکل ۶: رادیاتور و نیم‌لوله‌های سیستم خنک‌کننده

علاوه بر این از آنجا که هدف این مطالعه بررسی تاثیر استفاده از روش نیم‌لوله بر بازدهی پنل‌های خورشیدی بوده است ابتدا، تأثیر روش نیم‌لوله بر میزان کاهش دمای پنل‌ها اندازه‌گیری شد. زاویه قرارگیری پنل نسبت به سطح افق در این مطالعه برابر ۱۵درجه است. بدون استفاده از روش نیم‌لوله، دمای پنل‌ها در حدود ۵۴/۳ درجه سانتیگراد بوده که با بکارگیری روش نیم‌لوله، دمای پنل‌ها به ۴۴/۳درجه سانتیگراد رسیده است. در واقع، روش نیم‌لوله توانسته است دمای پنل‌ها را در شرایط بهره-برداری حدود ۱۰ درجه کاهش دهد. البته در شرایط دمایی مختلف این عدد متغیر است.

در مرحله اول، بدون استفاده از روش نیم‌لوله، پنل خورشیدی مورد بهره‌برداری قرار گرفت و نتایج خروجی توسط دیتالاگر اندازه‌گیری گردید. با در اختیار داشتن مقادیر جریان و ولتاژ در بازه‌های زمانی مختلف، میزان توان اکتیو خروجی را به‌دست آورد. در این مرحله در بهترین حالت، میزان توان تولیدی حدود ۱۱۱وات بود. با توجه به اینکه پنل مورد استفاده ۲۰۰واتی است مشاهده شد در بهترین حالت، بازده پنل خورشید بدون استفاده از روش خنک‌سازی نیم‌لوله ۵۶٪ است. با گذشت زمان و تغییر زاویه تابش خورشید، به تدریج میزان توان تولیدی کاهش یافته به نحوی که در ساعت ۱۶:۳۰ میزان توان تولیدی به کمترین میزان خود یعنی ۲۵ وات و بازده پنل به ۱۲/۵ درصد یعنی پایین‌ترین مقدار ممکن رسید. شکل‌های (۷) و (۸) منحنی‌های دریافتی توسط دیتالاگر را درحالت بدون نیم لوله نشان می‌دهد.

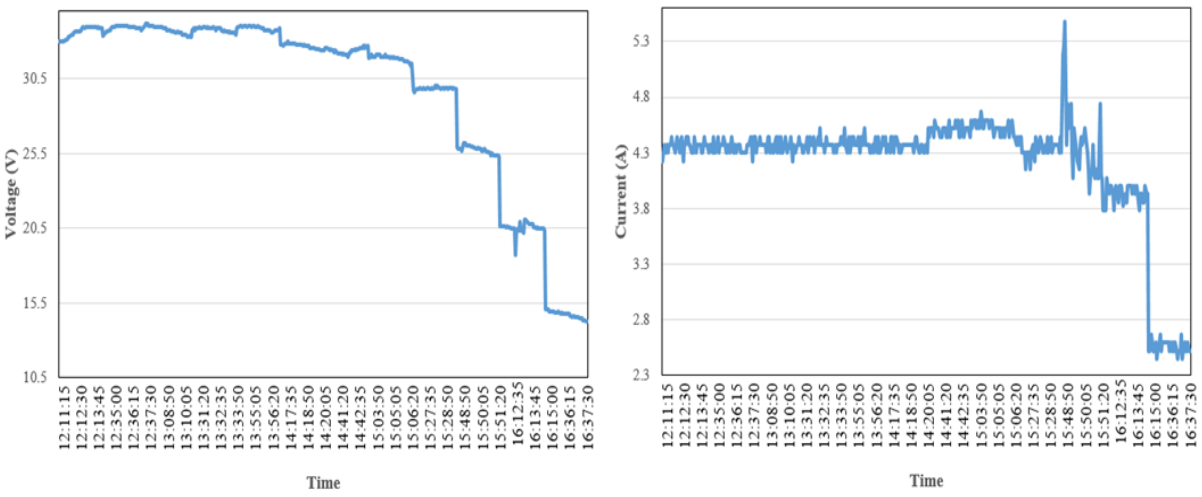


شکل ۷: منحنی‌های جریان و ولتاژ پنل در حالت بدون استفاده از نیم‌لوله



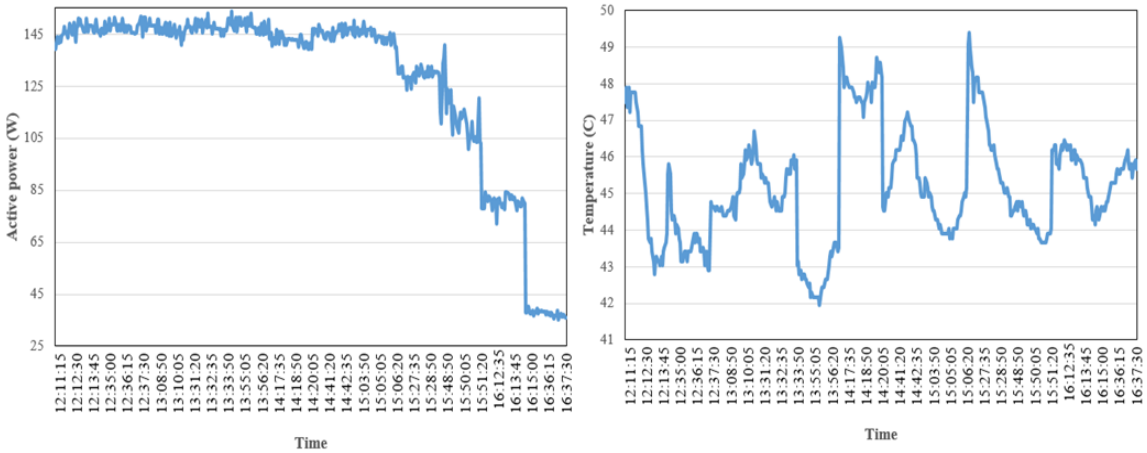
شکل ۸: منحنی‌های دما و توان پنل در حالت بدون استفاده از نیم‌لوله

در مرحله دوم، به منظور افزایش بازده پنل‌های خورشیدی از روش نیم‌لوله به منظور خنک‌سازی یا کاهش دمای پنل‌ها استفاده گردید. در این حالت، توان اکتیو تا ۱۵۱وات نیز می‌رسد که این امر به معنای بازدهی بیش از ۷۵درصدی پنل خورشیدی می‌باشد. تا ساعت حدود ۱۵، توان تولیدی پیرامون مقدار ۱۵۰وات نوسان می‌کند اما پس از آن، به تبعیت از ولتاژ و جریان، توان خروجی نیز کاهش پیدا می‌کند به نحوی که در کمترین حالت به ۳۷وات می‌رسد که بیانگر بازده ۱۶/۴درصدی پنل خورشیدی است. بنابراین، بیشینه و کمینه توان تولیدی در این حالت نسبت به حالتی که از روش نیم‌لوله استفاده نشده است، افزایش پیدا کرده است (شکل ۹).



شکل ۹: منحنی‌های جریان و ولتاژ پنل در حالت استفاده از نیم‌لوله

برای اندازه‌گیری دما از سه حسگر استفاده شده است، که مشاهده گردید دمای پنل با نوسانات زیادی روبرو است. دامنه تغییرات این نوسانات از ۴۷ تا ۵۶ درجه سانتیگراد در مرحله اول (بدون نیم‌لوله) می‌باشد. نکته حائز اهمیت دیگر این است که دمای پنل تابع شدت تابش نور خورشید نمی‌باشد و با وجود اینکه شدت تابش نور خورشید در بازه زمانی ساعت ۱۲ نسبت به ساعت ۱۴ بیشتر است اما دمای پنل روندی معکوس را نشان می‌دهد. به طور کلی، افزایش دمای پنل سبب کاهش بازده پنل خورشیدی می‌شود و علت استفاده از روش‌های خنک‌سازی نیز کاهش همین دما با هدف افزایش بازده پنل می‌باشد. در مرحله دوم (استفاده از نیم لوله) دما در محدوده ۴۲ تا ۴۹/۵ درجه سانتیگراد در حال نوسان است. در شکل (۱۰) به‌وضوح مشخص است که روش نیم‌لوله سبب کاهش دمای پنل خورشیدی در کلیه زمان‌ها شده است.



شکل ۱۰: منحنی‌های دما و توان پنل در حالت استفاده از نیم‌لوله

یکی از پارامترهایی که تاثیر قابل توجهی بر عملکرد پنل‌های خورشیدی دارد، زاویه قرارگیری پنل‌ها در برابر نور خورشید است. به منظور بررسی نقش این پارامتر بر عملکرد پنل‌های ساخته شده، زاویه قرارگیری آن‌ها نسبت به سطح افق از ۱۵درجه در مطالعه قبل به ۲۹ درجه تغییر داده شد و نتایج استخراج گردید. در مقایسه با مطالعه قبل که زاویه قرارگیری برابر ۱۵ درجه انتخاب شده بود، بیشینه توان خروجی از پنل خورشیدی در این حالت برابر ۱۰۵وات است که نسبت به حالتی که زاویه قرارگیری پنل ۱۵درجه است، ۶ وات کمتر شده است. به عبارت دیگر، این تغییر زاویه سبب شده است که میزان بازدهی پنل خورشیدی در حالت عدم استفاده از نیم‌لوله صرفا به سبب تغییر زاویه حدود ۶ درصد کاهش پیدا کند. بنابراین، زاویه قرارگیری در برابر پنل خورشیدی فاکتوری اثرگذار بر بازدهی پنل‌ها است و در کنار مسائلی نظیر بکارگیری روش‌های بهینه برای خنک‌سازی، بایستی مسائل فنی نظیر زاویه قرارگیری پنل جهت حداکثرسازی توان تولیدی پنل نیز مد نظر قرار گیرد. بررسی تاثیر زاویه قرارگیری پنل‌های فتولتائیک در حالتی که پنل مجهز به سیستم خنک‌سازی نیم‌لوله می‌باشد، نشان می‌دهد که زاویه قرارگیری نامناسب در این حالت سبب افت توان بیشینه از ۱۵۱وات به حدود ۱۴۸وات شده است. در این حالت نیز روش نیم‌لوله اثر زاویه نامناسب در برابر پنل به وضوح مشخص است زیرا بدون استفاده از روش نیم‌لوله تغییر زاویه با افت ۶ درصدی توان روبرو گردیده، که این افت توان و در نتیجه افت بازده پنل تنها در حدود ۲درصد بوده است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، به بررسی یک سیستم تولید توان خورشیدی مبتنی بر روش خنک‌سازی نیم‌لوله با هدف افزایش بازدهی پرداخته شد. به منظور بررسی تاثیر استفاده از روش نیم‌لوله بر بازدهی پنل‌های خورشیدی، دو پنل مشابه یکی از آنها بدون سیستم خنک‌کننده و دیگری مجهز به سیستم خنک‌سازی نیم‌لوله استفاده گردیده است. نتایج مربوط به شرایط دما، جریان، ولتاژ و توان پنل‌ها در هر دو سیستم نشان می‌دهد که استفاده از سیستم خنک‌سازی به طور میانگین دمای پنل‌ها را در شرایط بهره‌برداری حدود ۱۰درجه بهبود خواهد بخشید. بررسی و اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان نشان داد که در زمان‌های اولیه تا قبل از ظهر بهره‌برداری ولتاژ در محدوده ۷۵ درصد نامی خود قابل استحصال بوده و البته سیر نزولی آن ابتدا با توجه به کم بودن دما دارای شیبی کند است. اما دامنه تغییرات ولتاژ و نوسانات آن در محدوده ۴۷ تا ۵۶ درجه سانتیگراد با شیب بالاتری کاهش می‌یابد که سیستم خنک‌ساز بازه زمانی حداکثر تابش به راحتی این محدوده ولتاژ را تثبیت می‌نماید. با توجه با بار مصرفی تعریف شده و جریان مورد نیاز بار مشاهدات آزمایش نشان داد که میزان اثرگذاری سیستم خنک سازی نیم‌لوله در افزایش جریان بیش از افزایش ولتاژ موثر می‌باشد. به عبارت دیگر، با بکارگیری روش نیم‌لوله، جریان خروجی پنل‌ها در مقایسه با ولتاژ خروجی، بهبود بیشتری می‌یابد. در نهایت از نقطه نظر توان تولیدی پنل خورشیدی میزان توان تولیدی بازده پنل خورشیدی بدون استفاده از روش خنک‌سازی نیم‌لوله در بهترین حالت میزان ۱۰۰ وات بوده که در بررسی نتایج در حالت فعال بودن سیستم خنک‌ساز توان اکتیو قابلیت افزایش تا ۱۵۱ وات را دارا است.

مراجع

[۱] انجوی ارسنجانی، م.، یعقوبی، م.، جعفرپور، خ.، (۱۳۹۳)، ارزیابی پتانسیل انرژی خورشیدی در چند اقلیم آب و هوایی ایران با استفاده از روش شبکه عصبی، اولین کنفرانس و نمایشگاه بین المللی انرژی خورشیدی.

[۲] عبدی علمی، الف.، میرعبداله لواسانی، الف.، (۱۳۹۶)، مروری بر روش ها و کارهای انجام شده در زمینه خنک سازی پنل های فتوولتاییک در جهت افزایش راندمان الکتریکی پنل، سومین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و مهندسی.

[3] Salehi, R., Jahanbakhshi, A., Golzarian,M . R., Khojastehpour, M., (2021), Evaluation of solar panel cooling systems using anodized heat sink equipped with thermoelectric module through the parameters of temperature, power and efficiency. Energy Conversion and Management: X 11, pp 100-102.

[4] Laseinde, O. T., Ramere, M. D., (2021), Efficiency Improvement in polycrystalline solar panel using thermal control water spraying cooling. Procedia Computer Science 180, pp 239-248.

[5] Li, D., King, M., Dooner, M., Guo, S., Wang, J., (2021), Study on the cleaning and cooling of solar photovoltaic panels using compressed airflow. Solar Energy 221, pp 433-444.
[6] Bhakre, S. S., Sawarkar, P. D., Kalamkar, V. R., (2021), Performance evaluation of PV panel surfaces exposed to hydraulic cooling–A review. Solar Energy 224, pp 1193-1209.
[7] Ruoping, Y., Xiaohui, Y., Fuwei, L., Huajun, W., (2020), Study of operation performance for a solar photovoltaic system assisted cooling by ground heat exchangers in arid climate, China. Renewable Energy 155, pp 102-110.
[8] Abdel-Khalik, S., (1976). Heat removal factor for a flat-plate solar collector with a serpentine tube. Solar Energy 18(1), pp 59-64.
[9] Maadi, S. R., Kolahan, A., Passandideh-Fard, M., Sardarabadi, M., Moloudi, R., (2017), Characterization of PVT systems equipped with nanofluids-based collector from entropy generation. Energy conversion and management 150, pp 515-531.
[۱۰] عفرپور، س. و صادق زاده، س. م.، (۱۴۰۰)، خنک‌سازی پنل‌های فتوولتاییک، راهبردی برای آینده، هفتمین کنفرانس بین المللی فناوری و مدیریت انرژی، اردبیل.
[۱۱] صدرزاده خراسانی، م.، نصرالله زاده، ب.، نوعی، س. م.، (۱۳۹۵)، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی خنک کردن یک پنل خورشیدی، کنگره بین المللی نوآوری در مهندسی و توسعه تکنولوژی، تبریز.
[12] Salehi, R., Jahanbakhshi, A., Golzarian, M. R., Khojastehpour, M., (2021), Evaluation of solar panel cooling systems using anodized heat sink equipped with thermoelectric module through the parameters of temperature, power and efficiency, Energy Conversion and Management: X 11, pp 100102.
[13] Han, J., Zhang, X., Yeung, R. W., (2022), Hydrodynamic behavior of a circular floating solar pond with an entrapped two-layer fluid. Physics of Fluids, 34(1), 012114.
[14] Shrivastava, A., Jose, J. P. A., Borole, Y. D., Saravanakumar, R., Sharifpur, M., Harasi, H., Afzal, A. (2022), A study on the effects of forced air-cooling enhancements on a 150 W solar photovoltaic thermal collector for green cities. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 49, 101782.