



امکان سنجی آزمایشگاهی استفاده هم‌زمان سلول فتوولتائیک با سیستم حرارتی در کلکتور های خورشیدی - هیبریدی

امین صمیمی بهبهان^{۱*}، حسین حسینی پور^۲

^۱ استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران.

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، ایران.

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۴

چکیده

انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از پایدارترین منابع تأمین انرژی، نقش کلیدی در پاسخ به چالش‌های فزاینده انرژی ایفا می‌کند. سلول‌های خورشیدی با تبدیل نور به برق، تولید انرژی می‌کنند؛ با این حال، افزایش دمای سلول‌های فتوولتائیک به‌طور مستقیم موجب افت بازدهی الکتریکی آن‌ها می‌شود. از این‌رو، مدیریت حرارتی مؤثر به‌عنوان راهکاری اساسی برای بهبود عملکرد مطرح است. در این پژوهش، یک کلکتور خورشیدی سه‌منظوره شامل تولید هم‌زمان برق و بازیابی حرارت برای گرم کردن آب و هوا مورد بررسی تجربی قرار گرفته است. همچنین، تأثیر به‌کارگیری بازتابنده‌ها و راهکارهای تقویت انتقال حرارت بر عملکرد سامانه ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد افزایش دبی سیالات منجر به کاهش بازدهی حرارتی می‌شود، درحالی‌که سیال مایع در مقایسه با گاز، کارایی بالاتری در انتقال حرارت دارد. علاوه بر این، کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک به بهبود بازدهی الکتریکی منجر شده، به‌گونه‌ای که در اوج ساعات تابش خورشید بازدهی الکتریکی برای حالت‌های مختلف آزمایش بین ۳ تا ۵/۷ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سلول فتوولتائیک؛ کلکتور خورشیدی؛ انرژی خورشیدی؛ کلکتور هیبریدی؛ سلول خورشیدی.

Experimental investigation of concurrent utilization of photovoltaic cells with thermal systems in hybrid solar collectors

A. Samimi Behbahan^{1,*}, H. Hosseinipour²

¹ Assist. Prof., Mech. Eng., Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

² MSc, Mech. Eng., Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

Abstract

Solar energy, as one of the most sustainable energy resources, plays a pivotal role in addressing the growing global energy demand. However, the rise in photovoltaic (PV) cell temperature directly leads to a reduction in electrical efficiency; therefore, effective thermal management is essential for performance enhancement. In this study, a tri-generation solar collector integrating simultaneous electricity generation with thermal energy recovery for water and air heating is experimentally investigated. Furthermore, the effects of incorporating reflectors and enhancing heat transfer mechanisms on the overall system performance are systematically evaluated. The results indicate that increasing the fluid flow rate leads to a reduction in thermal efficiency, while liquid working fluids exhibit superior heat transfer performance compared to gaseous media. Additionally, reducing the operating temperature of PV cells improves electrical efficiency; specifically, during peak solar irradiance periods, an enhancement in electrical efficiency ranging from 3% to 5.7% is observed across different experimental conditions.

Keywords: Photovoltaic cell; solar collector; solar energy; solar cell; hybrid collector.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، رشد جمعیت و پیشرفت فناوری موجب افزایش چشمگیر تقاضا برای انرژی شده است. این روند، نیاز به بهره‌برداری بیشتر از منابع انرژی متعارف را افزایش داده، اما مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی و تولید گازهای گلخانه‌ای نگرانی‌های زیست‌محیطی جهانی را به همراه داشته است. در نتیجه، استفاده از منابع انرژی جایگزین به‌عنوان راهکاری ضروری برای مقابله با این چالش‌ها مطرح شده است [۱].

انرژی خورشیدی به عنوان منبعی پاک و تجدیدپذیر، راه‌حلی مؤثر برای مقابله با کمبود انرژی‌های متعارف و مشکلات زیست‌محیطی محسوب می‌شود. امروزه انرژی خورشیدی در حوزه‌های مختلفی مانند تأمین آب گرم، تهویه مطبوع، رفع کم‌آبی، خشک‌کردن محصولات کشاورزی و تولید برق در نیروگاه‌ها کاربرد دارد. یکی از روش‌های رایج بهره‌برداری از این انرژی، استفاده از کلکتورهای خورشیدی است که به دلیل ساختار ساده و نگهداری آسان، محبوبیت زیادی یافته‌اند [۲-۱۰ و ۱۸].

سلول‌های فتوولتائیک یا خورشیدی، با استفاده از مواد نیمه‌رسانا مانند سیلیکون، نور خورشید را مستقیماً به برق تبدیل می‌کنند. این فرآیند با جذب فوتون‌ها و آزادسازی الکترون‌ها انجام می‌شود که در نهایت منجر به تولید جریان الکتریکی می‌گردد. سیستم‌های فتوولتائیک (PV) با اتصال سلول‌های خورشیدی به‌صورت سری و موازی، برق مورد نیاز مصرف‌کننده را تأمین می‌کنند. این سیستم‌ها به دلیل نداشتن قطعات متحرک، نیاز به نگهداری کمی دارند و عمر طولانی دارند. از آن‌ها می‌توان برای تأمین برق مناطق دورافتاده، سیستم‌های پشتیبان و تولید برق در مقیاس وسیع استفاده کرد. بهره‌گیری از منابع پاک و تجدیدپذیر در این سیستم‌ها، نقش مؤثری در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. پیشرفت فناوری و کاهش هزینه‌ها نیز موجب گسترش استفاده از این سیستم‌ها در سطح جهانی شده است. تا کنون در زمینه‌های مختلفی از جمله سیستم‌های گرمایش خورشیدی، سیستم‌های فتوولتائیک و همچنین ادغام این دو سیستم نیز تحقیقات متعددی صورت گرفته است.

کورتبش و دورموش [۱۱] به بررسی راندمان و تحلیل اکسرژی یک گرمکن هوای خورشیدی پرداختند. آن‌ها پنج

کلکتور خورشیدی را طراحی کردند که مسیر جریان هوا در آن‌ها با تغییرات هندسی شکل یافته است. نتایج نشان داد که تغییرات هندسی موجب ایجاد آشفتگی در جریان هوا و افزایش انتقال حرارت می‌شود.

ازگن و همکاران [۱۲]، به بررسی تجربی عملکرد حرارتی یک گرم‌کننده هوای خورشیدی با جریان دوطرفه و صفحه جاذب ساخته‌شده از قوطی‌های آلومینیومی پرداختند. نتایج بیانگر آن بودند که تغییرات هندسی صفحه جاذب موجب افزایش آشفتگی جریان هوا و بهبود انتقال حرارت می‌شود، و استفاده از موانع مانند قوطی‌های آلومینیومی در طراحی گرم‌کننده‌های هوای خورشیدی می‌تواند عملکرد آن‌ها را بهبود بخشد.

شریف و همکاران [۱۳]، عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی صفحه تخت را با استفاده از نانوسیال Al_2O_3 -آب مورد بررسی تجربی قرار دادند. این مطالعه نشان داد که استفاده از نانوذرات Al_2O_3 در سیال کاری کلکتور خورشیدی می‌تواند عملکرد حرارتی را به شکل قابل توجهی افزایش داده و گزینه‌ای مناسب برای ارتقای سیستم‌های خورشیدی باشد.

ژانگ و همکاران [۱۴] با هدف افزایش بهره‌وری کل سیستم خورشیدی، یک سامانه ترکیبی انرژی خورشیدی موسوم به SECS توسعه دادند. آن‌ها از الکترولیت فعال حرارتی $ZnAc_2/MnAc_2$ استفاده کردند که با خنک‌سازی سلول و تبدیل هم‌زمان گرمای اتلافی به برق، موجب افزایش پایداری و راندمان شد. این مطالعه اثبات کرد که ترکیب سامانه‌های PV با باتری نه تنها موجب خنک‌سازی مؤثر، بلکه بازیابی گرما و ذخیره‌سازی هم‌زمان انرژی را ممکن می‌سازد و بستر مناسبی برای توسعه گسترده انرژی خورشیدی فراهم می‌آورد.

آسته و همکاران [۱۵] عملکرد حرارتی و الکتریکی یک کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی (PVT) هوا را که برای نصب روی سقف شیب‌دار طراحی شده، به‌صورت تجربی بررسی کردند. ساختار کلکتور شامل لایه PV، کانال عبور هوا، و جعبه عایق حرارتی است که جایگزین لایه خارجی سقف می‌شود. تحلیل داده‌ها نشان داد که جریان هوا موجب کاهش دمای سلول تا ۱۰ درجه شده و عملکرد کلی سیستم به حدود ۴۰ درصد رسید. همچنین کلکتورهای PVT هوایی نه تنها موجب افزایش بهره‌وری انرژی، بلکه گزینه مناسبی برای تلفیق با سازه‌های ساختمان و تأمین هم‌زمان برق و گرما هستند.

پنل‌های متداول عمدتاً در دو نوع مونوکریستال و پلی کریستال طبقه‌بندی می‌شوند. تفاوت اصلی میان این دو نوع، در میزان بازده تبدیل انرژی آن‌هاست؛ به‌طوری که پنل‌های مونوکریستال از بازده الکتریکی بالاتری نسبت به مدل‌های پلی کریستال برخوردارند. با این حال، در دماهای بالا، پنل‌های پلی کریستال نسبت به مونوکریستال افت توان کمتری را تجربه می‌کنند. شکل زیر پنل مونوکریستال مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. مشخصات این پنل نیز در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات پنل خورشیدی		
ردیف	مشخصه فنی	مقدار
۱	توان ماکزیمم	۲۰۰ وات
۲	ولتاژ مدار باز	۲۲/۴ ولت
۳	جریان اتصال کوتاه	۱۱/۵۸ آمپر
۴	حداکثر ولتاژ بیشینه	۱۸/۴ ولت
۵	حداکثر جریان بیشینه	۱۰/۸۷ آمپر
۶	ابعاد پنل (mm)	۲۸ × ۱۰۰۰ × ۱۳۹۰

در این پژوهش، یک مبدل حرارتی با ساختار آلومینیومی جهت خنک‌کاری پنل خورشیدی طراحی و اجرا شده است (شکل ۲). این مبدل شامل مجموعه‌ای از لوله‌های آلومینیومی برش‌خورده به‌شکل نیم‌دایره بوده که بر روی یک صفحه آلومینیومی به ابعاد ۱۳۰ سانتی‌متر در ۶۴ سانتی‌متر نصب شده‌اند. قطر خارجی هر لوله برابر ۳ سانتی‌متر و قطر داخلی آن‌ها برابر ۲/۵ سانتی‌متر انتخاب شده است.

این ساختار با هدف افزایش سطح تماس حرارتی میان سیال خنک‌کننده و صفحه جاذب طراحی گردیده، به‌طوری که انتقال حرارت با راندمان بالاتری صورت پذیرد. برای جمع‌آوری آب در قسمت پایین صفحه، از یک پروفیل آلومینیومی با سطح مقطع ۳×۵ سانتی‌متر مربع استفاده شده است که عملکردی مشابه کلکتور خروجی را ایفا می‌کند. طراحی مذکور با هدف دستیابی به انتقال مؤثر حرارت، استفاده از مصالح مقرون‌به‌صرفه، و حفظ دقت هندسی سطح جاذب توسعه یافته است و می‌تواند در سامانه‌های خنک‌کاری پنل‌های خورشیدی با دمای کاری متوسط مورد استفاده قرار گیرد.

حسینی و همکاران [۱۶] به‌صورت تجربی یک سیستم فتوولتائیک-حرارتی ترکیبی را طراحی و آزمایش کردند که شامل جریان نازک آب روی سطح سلول خورشیدی بدون پوشش شیشه‌ای و یک مبدل حرارتی برای بازیابی گرمای جذب‌شده بود. نتایج آزمون‌ها نشان داد که دمای سلول در سیستم ترکیبی تا ۱۸/۷ درجه سلسیوس کمتر از حالت معمولی بود و این کاهش دما موجب افزایش قابل‌توجه بازده الکتریکی تا ۳۳ درصد در برخی ساعات شد.

پژوهش حاضر با هدف ارائه روشی دقیق برای بهینه‌سازی ساختارهای کلکتور، مدل‌سازی سینک‌های حرارتی، و تعیین پارامترهای مؤثر بر راندمان، گامی مؤثر در جهت ارتقاء فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی فناوری PVT برمی‌دارد. نوآوری‌های پژوهش حاضر شامل طراحی و بررسی یک کلکتور خورشیدی سه منظوره (تولید همزمان الکتریسیته، آب گرم و هوای گرم) با استفاده از دو سیال هوا و آب و بررسی اثرات ترکیبی آنها و ارایه تحلیل همزمان عملکرد حرارتی و الکتریکی در شرایط واقعی جهت بهبود عملکرد کلکتورها می‌باشد.

۲- تجهیزات و روش آزمایش

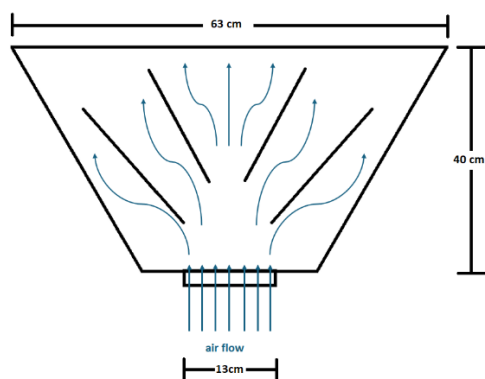
سامانه‌های فتوولتائیک-حرارتی (PVT) این امکان را فراهم می‌سازند تا علاوه بر تولید برق، گرمای تولیدشده در سطح پنل را نیز به‌طور هم‌زمان بازیابی و در کاربردهای گرمایی متنوع به‌کار گیرند. در این بخش، ساختار پیشنهادی یک سامانه PVT مورد بررسی قرار می‌گیرد. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده این سیستم از منظر عملکرد حرارتی و الکتریکی معرفی شده و تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده جهت پایش عملکرد و فرآیند داده‌برداری شرح داده خواهند شد.



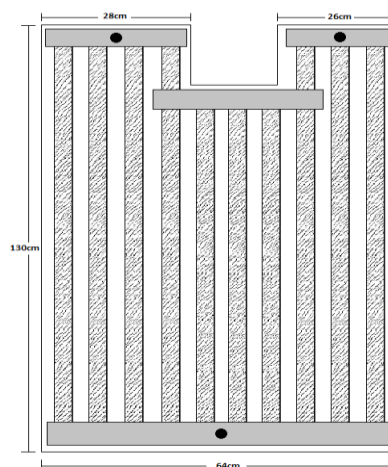
شکل ۱- پنل مونوکریستال استفاده شده در این آزمایش

جهت کاهش اتلاف حرارت از سطح کلکتور خورشیدی و بهبود عملکرد حرارتی آن، از یونولیت (پلی‌استایرن انبساطی) به‌عنوان ماده‌ی عایق استفاده شد. یونولیت با ساختار سلولی بسته، وزن سبک، و ضریب هدایت حرارتی پایین، گزینه‌ای مناسب برای عایق‌کاری سطوح فلزی در سامانه‌های خورشیدی محسوب می‌شود. استفاده از این ماده در بخش زیرین و جانبی کلکتور، موجب کاهش انتقال حرارت به محیط اطراف و حفظ دمای مطلوب در مسیر جذب انرژی خورشیدی گردید.

در طراحی سامانه‌های حرارتی و تهویه، کنترل جهت و شدت جریان هوا نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد و افزایش بازدهی دارد. دمپر هوا یکی از اجزای کلیدی در این زمینه محسوب می‌شود که با تنظیم مسیر عبور هوا، امکان تطابق شرایط کاری با نیاز سیستم را فراهم می‌آورد. در این پژوهش، یک دمپر هوای آزمایشگاهی (شکل ۳) با هدف کنترل جریان و جهت‌دهی هوا برای کاربرد در کلکتور خورشیدی طراحی و ساخته شده است. ساختار مکانیکی دمپر از صفحات MDF با ضخامت ۳ میلی‌متر تشکیل شده و ابعاد نهایی آن برابر با ۶۳ سانتی‌متر عرض و ۴۰ سانتی‌متر طول می‌باشد و جریان هوا از یک روزنه به قطر ۱۳ سانتی‌متر وارد دمپر می‌شود. جهت حرکت هوا از طریق این دمپر توسط آرایش هندسی آن کنترل می‌شود، به‌طوری‌که امکان کاهش تلاطم، افزایش سطح تماس و تنظیم دمای داخلی کلکتور فراهم گردد. این دمپر از طریق اتصال به دیواره بالایی کلکتور خورشیدی نصب شده و با یک روزنه با ابعاد ۸×۶۳ سانتی‌متر ترکیب شده است که نقش ورودی جریان هوا را ایفا می‌نماید.



شکل ۳- طرح‌واره از طراحی دمپر هوا

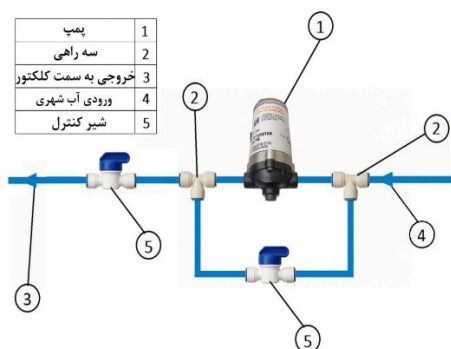


شکل ۲- پنل استفاده شده در این آزمایش

در راستای بهینه‌سازی انتقال حرارت از سطح پشتی پنل خورشیدی به مبدل حرارتی، از خمیر سیلیکون صنعتی مدل Ultracool MAP10003 استفاده شد. این خمیر با ضریب انتقال حرارت ۳ ($\text{W/m}^2\text{K}$) و خاصیت چسبندگی نیمه‌پایدار، قادر است ناصافی‌ها و خلل و فرج میان سطح فلزی پنل و مبدل را به‌طور مؤثری پر کرده و مسیر مستقیم‌تری برای انتقال گرما فراهم کند.

بدنه قاب کلکتور خورشیدی با استفاده از چهار قطعه نوئپان طراحی و ساخته شده است. اجزای قاب شامل دو تکه نوئپان به ابعاد ۲۵×۷۵ سانتی‌متر برای بالا و پایین، و دو تکه دیگر به ابعاد ۲۵×۱۵۰ سانتی‌متر برای طرفین قاب هستند. سطح بالایی قاب به‌صورت دو لایه شیشه نازک با ابعاد ۷۵×۱۴۵ سانتی‌متر تعبیه شده است که با فاصله‌ای برابر با ۴ میلی‌متر از یکدیگر، بر روی سطح بالای کلکتور نصب شده‌اند. این طراحی دولایه شیشه‌ای با هدف کاهش اتلاف حرارتی و افزایش مقاومت مکانیکی صورت گرفته است. به‌منظور تهویه داخل قاب و گردش هوا، در دیواره‌های بالایی و پایینی هرکدام یک روزنه با ابعاد ۸×۶۳ سانتی‌متر ایجاد شده که روزنه بالایی به دمپر متصل گردیده است. این دمپر نقش مهمی در کنترل جریان هوا و تنظیم دمای داخلی کلکتور ایفا می‌کند. استفاده از نوئپان در ساختار قاب، ضمن فراهم آوردن پایداری مکانیکی مناسب، امکان تولید مقرون‌به‌صرفه و قابل اجرای آزمایشگاهی را فراهم آورده است.

بیشتر در دبی سیال ورودی به کلکتور، متصل هست تا بتوان دبی را کنترل کرد. پمپ مورد استفاده مدل Lowara-PM16 با حداکثر آبدهی ۳۵ لیتر در دقیقه و توان ۳۰۰ وات بوده است.



شکل ۴- طرح‌واره از طراحی دمپر هوا

برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی بر سطح پنل‌ها یا سطوح جذب‌کننده از سولار متر مدل TES-1333 استفاده شده است. این سولارمتر محدوده اندازه‌گیری تا ۲۰۰۰ وات با دقت ۱ درصد و زمان نمونه برداری حدود ۰/۴ ثانیه را دارد. همچنین از یک دبی سنج با محدوده عملکردی ۱۶ تا ۱۶۰ لیتر بر ساعت در این تحقیق استفاده شده است. این نوع فلومتر دارای بدنه‌ای شفاف و لوله مدرج است که حرکت شناور داخلی آن به تناسب دبی جریان، شاخصی مستقیم برای اندازه‌گیری لحظه‌ای سیال فراهم می‌سازد. به منظور ارزیابی دقیق جریان هوای ورودی به کلکتور نیز از بادسنج دیجیتال BENETECH GM8901 Plus با محدوده سرعت هوا ۰ تا ۴۵ متر بر ثانیه استفاده شده است. این دستگاه، با قابلیت اندازه‌گیری سرعت هوا، امکان پایش لحظه‌ای سرعت جریان را می‌دهد. نصب آن در نقطه ورودی جریان هوا به کلکتور می‌باشد و نقش مهمی در ارزیابی عملکرد خنک‌کاری و یکنواختی دمایی سطح جاذب ایفا کرده است. از سنسور دیجیتال DS18B20 برای اندازه‌گیری دمای سطح بالایی و پایینی پنل‌های خورشیدی استفاده شده است. این سنسور با دقت ± 0.5 درجه سانتی‌گراد در بازه عملیاتی -۱۰ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد قابل استفاده است. در کنار سنسور دیجیتال، دماسنج پنبلی TPM-10 نیز برای اندازه‌گیری دمای آب ورودی و خروجی مبدل حرارتی و همچنین دمای هوای ورودی و خروجی کلکتور خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته است.

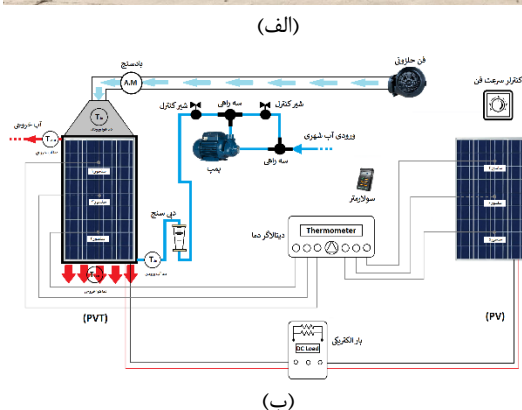
در راستای افزایش میزان تابش دریافتی توسط پنل خورشیدی و بهینه‌سازی بازده الکتریکی آن، از چهار قطعه آینه با آرایش خاص در اطراف کلکتور استفاده شد. این آینه‌ها در دو طرف کلکتور و به صورت طولی نصب گردیده‌اند، به گونه‌ای که هر دو آینه در یک طرف، در امتداد طولی با یکدیگر متصل شده‌اند. زاویه قرارگیری هر آینه نسبت به سطح کلکتور برابر با ۴۵ درجه در نظر گرفته شد که هدف آن بازتاب نور خورشید به سطح بالای پنل و افزایش تراکم تابش در سطح فعال سلول‌های فتوولتائیک می‌باشد. ابعاد هر قطعه آینه 75×50 سانتی‌متر مربع است که با توجه به اندازه‌ی کلکتور و زاویه نصب، پوشش مناسبی جهت بازتاب مؤثر نور فراهم می‌سازد. این آرایش بازتابی موجب افزایش شدت نور مؤثر در بازه زمانی تابش مستقیم خورشید شده و در نتیجه، توان خروجی لحظه‌ای پنل خورشیدی به‌طور محسوسی ارتقاء می‌یابد. طراحی متقارن دو به دو آینه‌ها، علاوه بر حفظ تعادل ساختاری، امکان استفاده از نور بازتابی از دو جهت را فراهم کرده که در شرایط زاویه‌ای متغیر تابش خورشید، عملکرد مناسبی از خود نشان می‌دهد.

به منظور افزایش بازدهی حرارتی پنل خورشیدی، از فن حلزونی مدل Ario-T50 با توان ۲۵۰ وات و حداکثر حجم هوای ۱۳۰۰ مترمکعب به عنوان بخش اصلی سامانه تهویه فعال استفاده شده است. این فن در موقعیتی هوا را به بالادست قاب کلکتور انتقال می‌دهد و با دمیدن جریان مداوم هوا به سطح پنل، فرآیند خنک‌کاری مؤثر را فراهم می‌سازد. همچنین برای خنک‌کاری سیستم از آب شهری در دبی‌های ۸۰ و ۱۲۰ لیتر بر ساعت استفاده شده است. آب شهری با دبی مورد بررسی وارد سیستم شده و پس از انجام فرایند کاهش دمای پنل، از سیستم خارج شده و برای جلوگیری از هدر رفت آب در این پژوهش، آب به یک منبع منتقل می‌شود. از پمپ آب نیز در یک سامانه خورشیدی به عنوان عنصر محرک برای عبور سیال در مدار کلکتور استفاده شده است.

شکل ۴ سیستم کنترل جریان و دبی آب را که شامل اجزای کلیدی نظیر پمپ آب، سه‌راهی، شیر کنترل جریان و خروجی به کلکتور است را نشان می‌دهد. آب شهری وارد پمپ شده و سپس از خروجی پمپ به سمت کلکتور هدایت می‌شود. برای کنترل جریان عبوری یک شیر به صورت موازی توسط دو سه‌راهی به ورودی و خروجی پمپ و یک شیر دیگر برای دقت

سنسورهای جریان ACS712 و ولتاژ ۰ تا ۲۵ ولت، امکان پایش لحظه‌ای خروجی پنل و محاسبه راندمان واقعی تحت بار را فراهم می‌نماید.

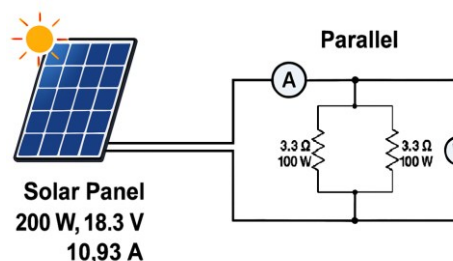
با توجه به موقعیت جغرافیایی این تحقیق که شهر گناوه در جنوب ایران (عرض جغرافیایی تقریباً ۲۹ درجه شمالی) می‌باشد، تعیین جهت و زاویه مناسب نصب پنل‌های خورشیدی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این راستا، جهت افقی پنل‌ها نسبت به جنوب جغرافیایی تنظیم شد، چرا که در نیم‌کره شمالی این جهت‌گیری موجب دریافت بیشترین میزان تابش مستقیم در طول سال می‌گردد. علاوه بر جهت‌گیری افقی، زاویه شیب پنل‌ها با سطح افق برابر با عرض جغرافیایی محل (حدود ۲۹ درجه) انتخاب شد. این زاویه به‌عنوان مقدار بهینه برای دریافت تابش سالانه در نظر گرفته شده است. شکل ۶ تصویر کلکتور و پنل مرجع نصب شده و همچنین شماتیک کلی آزمایش را با نشان دادن محل قرارگیری وسایل اندازه‌گیری نشان می‌دهد.



شکل ۶- الف) تصویر کلکتور و پنل مرجع نصب شده و
ب) شماتیک کلی آزمایش

در این آزمایش، برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان دو پنل خورشیدی، از سنسور ولتاژ ۰ تا ۲۵ ولت مستقیم و سنسور جریان ACS712 استفاده شده است. سنسور ولتاژ بر اساس تقسیم مقاومتی داخلی عمل کرده و با دقت تفکیک حدود ۰/۰۴۸۹ ولت، امکان اندازه‌گیری ولتاژ تا ۲۵ ولت را از طریق پین آنالوگ فراهم می‌سازد. سنسور جریان ACS712 نیز با بهره‌گیری از اثر هال، جریان عبوری را به ولتاژ آنالوگ تبدیل می‌کند. در این تحقیق، یکی از پنل‌ها به‌عنوان پنل آزمایشی انتخاب شده و پنل دیگر در نقش پنل شاخص مرجع قرار گرفته است. داده‌های ولتاژ و جریان هر دو پنل توسط ثبت می‌شود و امکان مقایسه عملکرد حرارتی و الکتریکی پنل آزمایشی با پنل مرجع فراهم می‌گردد.

در ادامه نیز برای مطابقت بار الکتریکی با مشخصات پنل خورشیدی ۲۰۰ وات، از دو مقاومت ۳/۳ اهم، هر کدام با توان ۱۰۰ وات به‌صورت موازی بهره گرفته شده است (شکل ۵). پنل مورد استفاده دارای ولتاژ کاری ۱۸/۳ ولت مستقیم و جریان نامی ۱۰/۹۳ آمپر می‌باشد. اتصال موازی مقاومت‌ها موجب کاهش مقاومت معادل مدار به ۱/۶۵ اهم گردیده که در این حالت، جریان کشیده‌شده از پنل برابر با ۱۱/۰۹ آمپر و توان مصرفی کل بار حدود ۲۰۲ وات محاسبه می‌شود. این توان در بین دو مقاومت به‌صورت مساوی تقسیم می‌شود، بنابراین هر مقاومت حدود ۱۰۱ وات انرژی مصرف می‌کند که با توان اسمی آن‌ها تطابق مناسبی دارد.



شکل ۵- بار الکتریکی

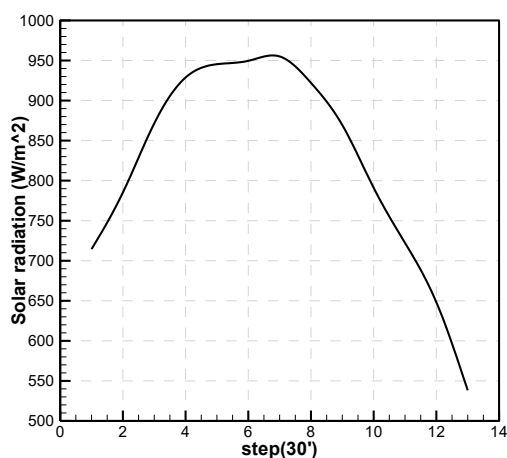
این نوع بارگذاری ضمن تضمین جذب کامل توان تولیدی پنل، شرایط پایداری الکتریکی مدار را فراهم می‌سازد و برای تحلیل حرارتی، بررسی افت ولتاژ تحت بار، و ارزیابی پایداری توان در شرایط تابش واقعی خورشید بسیار مناسب است. ترکیب این ساختار با تجهیزات ثبت جریان و ولتاژ مانند

گذر آب شهری در سیستم طراحی گردید تا فرآیند جذب و دفع حرارت به‌صورت پیوسته و مؤثر صورت پذیرد. جدول شرایط کنترلی آزمایش‌ها به‌طور جداگانه تنظیم و در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- پارامترهای کنترلی

آزمایش‌ها	سرعت جریان هوا (m/s)	دبی آب (L/h)
آزمایش ۱	۲	۸۰
آزمایش ۲	۴	۸۰
آزمایش ۳	۶	۸۰
آزمایش ۴	۲	۱۲۰
آزمایش ۵	۴	۱۲۰
آزمایش ۶	۶	۱۲۰

در شکل ۷ شدت تابش در روز نخست آزمایش نشان می‌دهد که بیشترین شدت تابش در این روز برابر با ۹۵۵٫۱ وات بر متر مربع می‌باشد.



شکل ۷- شدت تابش خورشید در آزمایش اول

در شکل ۸ اختلاف دماهای سطح بالا و پایین دو پنل آزمایش و مرجع را نمایش می‌دهد. برای هر سطح بالا، دو سنسور دما در نظر گرفته شده است که نمودار نمایش داده شده بر اساس میانگین از داده‌های دو سنسور می‌باشد و برای سطح پایین یک سنسور قرار گرفته است. برای ارزیابی عملکرد پنل خورشیدی، از دو پارامتر ولتاژ و جریان استفاده شده است.

در انتها نیز جهت تحلیل عدم قطعیت در اندازه‌گیری‌های تجربی از رابطه کلاین و مک کلینتاک [۱۷] استفاده شده است که توسط معادله زیر بیان شده است.

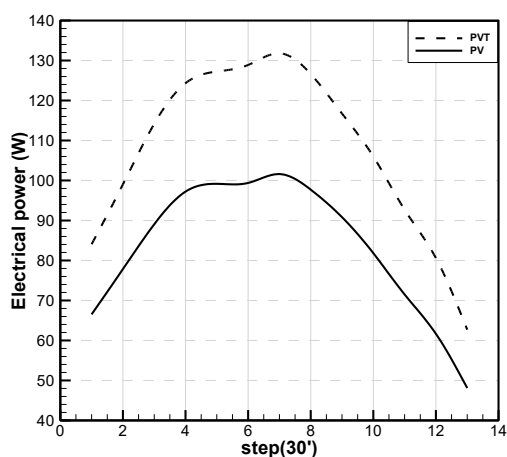
$$W_r = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

در این رابطه R یک تابع داده شده از متغیرهای مستقل x_1 تا x_n و w_1 تا w_n عدم قطعیت در متغیرهای مستقل و W_r عدم قطعیت در نتیجه می‌باشد. پارامترهای مستقل اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های گزارش شده در اینجا عبارتند از: دمای ورودی و خروجی کلکتور، سرعت هوا در مجرا و میزان تابش خورشیدی. برای انجام این آزمایش‌ها، از سنسور دمای DS18B20 با دقت ± 0.5 درجه سانتی‌گراد، بادنسنج نوع GM-8901 با دقت ۳٪، سولارمتر مدل TES-1333 با دقت ۱٪ استفاده شد. محاسبات نشان می‌دهد که مجموع عدم قطعیت در محاسبه اختلاف دما، سرعت هوا و میزان تابش به ترتیب ۱، ۲/۷۱ و ۵/۱۲ درصد است.

۳- نتایج

آزمایش‌ها بر روی سامانه فتوولتائیک-حرارتی (PVT) در شهر بندر گناوه (با مختصات جغرافیایی $34^{\circ}29'$ شمالی و $31^{\circ}50'$ شرقی) انجام گرفت. هدف این آزمایش‌ها بررسی اثر ادغام پنل خورشیدی با کلکتور حرارتی در کاهش دمای کاری و بهبود عملکرد الکتریکی سیستم فتوولتائیک از طریق خنک‌سازی فعال با جریان آب و هوا بود. مراحل آزمایش طی دوره ۱۸ روزه انجام شد، به‌گونه‌ای که در سه آزمایش اول، سرعت جریان هوای اجباری به ترتیب برابر با ۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه و دبی آب برابر با ۸۰ لیتر بر ساعت اعمال گردید. در سه آزمایش پایانی، سرعت جریان هوا به ترتیب ۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه مقدار دبی آب برابر با ۱۲۰ لیتر بر ساعت در نظر گرفته شده است. داده‌برداری در هر روز از ساعت ۹:۰۰ صبح تا ۱۵:۰۰ عصر در بازه‌های زمانی ۳۰ دقیقه‌ای انجام شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل دمای سطح بالای پنل‌ها، دمای سطح زیر پنل‌ها، دمای ورودی و خروجی آب، دمای هوای ورودی و خروجی، شدت تابش و همچنین ولتاژ، جریان هر پنل بودند. جریان هوای اجباری توسط یک فن حلزونی تأمین شد و سامانه خنک‌سازی آبی شامل مبدل حرارتی نصب‌شده در زیر پنل و

دمای پنل خورشیدی، به‌عنوان مبنایی برای طراحی و بهینه‌سازی کلکتور حرارتی نیز کاربرد دارد.

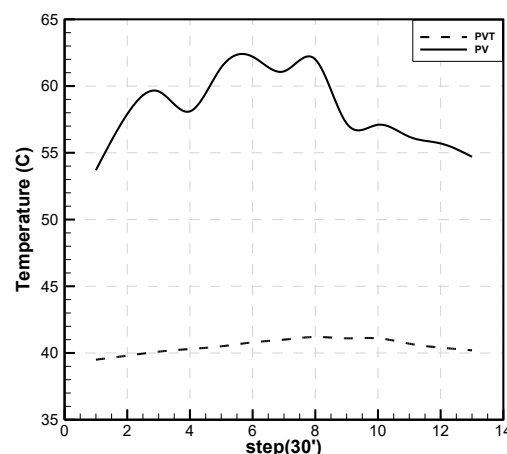
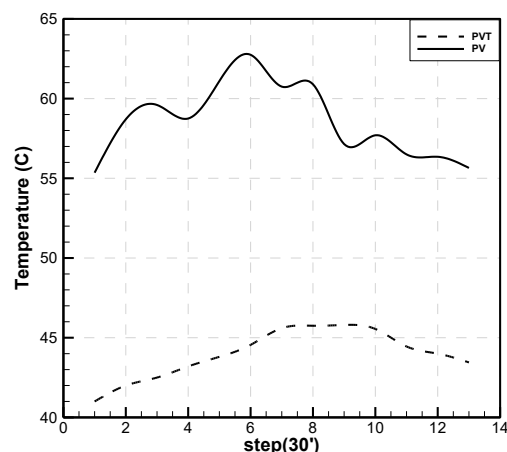


شکل ۹- توان الکتریکی پنل‌ها در آزمایش اول

در این سیستم هوای محیط بدون هیچ گونه خنک کاری ابتدایی توسط یک فن حلزونی به دمپر هوا و سپس دمپر با زاویه هدایت ثابت، هوا را به سطح بالای پنل منتقل می‌کند و در خروجی سیستم، هوای عبوری توسط یک روزنه مستطیلی از سیستم خارج می‌شود.

دمای آب و هوای ورودی و خروجی کلکتور که توسط سنسورها اندازه‌گیری شده‌اند در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ثبت این دو پارامتر، علاوه بر امکان ارزیابی میزان کاهش دمای پنل خورشیدی، به‌عنوان مبنایی برای طراحی و بهینه‌سازی کلکتور حرارتی نیز کاربرد دارد. در این سیستم هوای محیط بدون هیچ گونه خنک کاری ابتدایی توسط یک فن حلزونی به دمپر هوا و سپس دمپر با زاویه هدایت ثابت، هوا را به سطح بالای پنل منتقل می‌کند و در خروجی سیستم، هوای عبوری توسط یک روزنه مستطیلی از سیستم خارج می‌شود. تغییرات دمایی آب نیز علاوه بر ارزیابی میزان کاهش حرارت پنل، در طراحی سیستم‌های وابسته نظیر آب‌گرم مصرفی، گرمایش خانگی، سرمایش جذبی و سایر کاربردهای حرارتی نیز نقش تعیین‌کننده‌ای دارند. در این سیستم جریان آب ورودی نیز از جریان آب شهری تغذیه می‌شود و جریان آب به صورت گذری و بدون هیچ گونه جریان چرخشی در نظر گرفته شده است.

این ولتاژ و جریان مربوط به شرایطی هستند که در آن، بار الکتریکی به پنل متصل بوده و سیستم در حالت کاری قرار دارد.



شکل ۸- دما سطح بالا (شکل بالا) و پایین (شکل پایین) پنل‌ها در آزمایش اول

جهت مقایسه دقیق‌تر عملکرد بین دو پنل، از پارامتر توان لحظه‌ای (شکل ۹) استفاده شده است با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P = A \times V \quad (1)$$

که در آن P توان لحظه‌ای، A جریان الکتریکی و V ولتاژ می‌باشد.

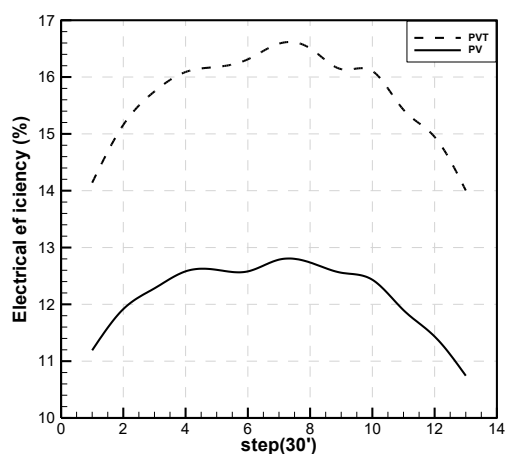
دمای آب و هوای ورودی و خروجی کلکتور که توسط سنسورها اندازه‌گیری شده‌اند در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ثبت این دو پارامتر، علاوه بر امکان ارزیابی میزان کاهش

که در آن η_e بازده الکتریکی پنل خورشیدی، P_{out} توان الکتریکی خروجی از پنل و P_{in} توان دریافتی از خورشید می باشد. شکل ۱۱ مقایسه بازدهی الکتریکی این دو پنل در آزمایش اول را نشان میدهد.

در انتها نیز برای محاسبه توان حرارتی جذب شده توسط آب در کلکتور خورشیدی، اختلاف دمای میان ورودی و خروجی آب اندازه گیری شده به همراه دبی جریان مورد استفاده قرار می گیرد (شکل ۱۲). این توان حرارتی نقش مهمی در تحلیل عملکرد سیستم داشته و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

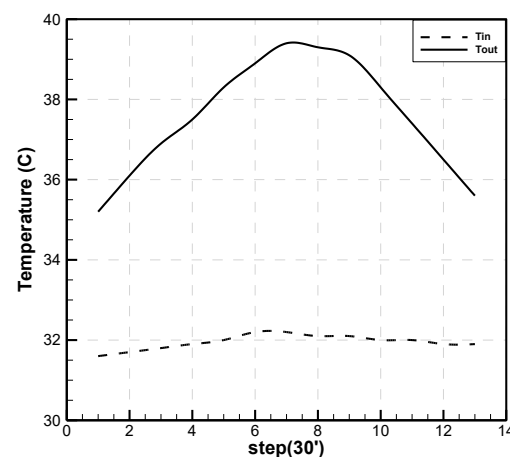
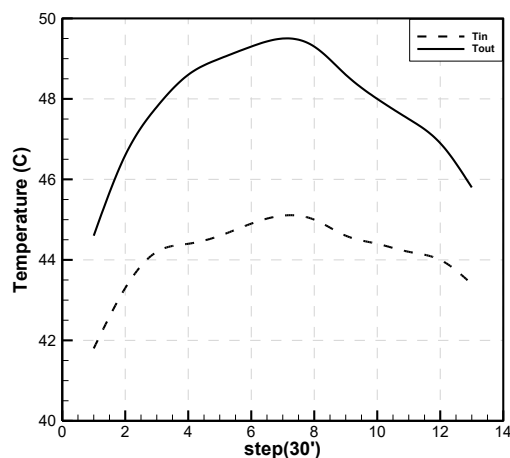
$$Q = \dot{m} \times C_p \times (T_{out} - T_{in}) \quad (5)$$

که در این رابطه Q توان حرارتی انتقال یافته، $\dot{m}$ دبی جرمی آب، C_p ظرفیت گرمایی ویژه آب، T_{out} دمای خروجی آب و T_{in} دمای ورودی آب می باشد. برای اندازه گیری توان حرارتی جذب شده توسط هوا هم می توان از رابطه قبل استفاده نمود.



شکل ۱۱- بازدهی الکتریکی دو پنل در آزمایش اول

با توجه به اینکه اولویت در تغییر پارامترهای کنترلی، افزایش توان الکتریکی خروجی سیستم می باشد و طبق بررسی های انجام شده در مطالعات پیشین، افزایش نرخ جریان سیال های عبوری از سطح پنل موجب افزایش توان الکتریکی تولیدی می گردد. در این راستا و با در نظر گرفتن مجموعه پارامترهای کنترلی تعریف شده، ابتدا افزایش جریان هوای عبوری مدنظر قرار گرفته است (آزمایش های شماره ۲ و ۳).



شکل ۱۲- دمای هوا (شکل بالا) و آب (شکل پایین) در ورودی و خروجی پنل آزمایش در آزمایش اول

برای بررسی اثر سیستم خنک کننده بر عملکرد پنل های خورشیدی و تحلیل بازده لحظه ای آنها، محاسبه انرژی دریافتی از خورشید ضروری است. این انرژی از طریق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$E = G \times A \quad (2)$$

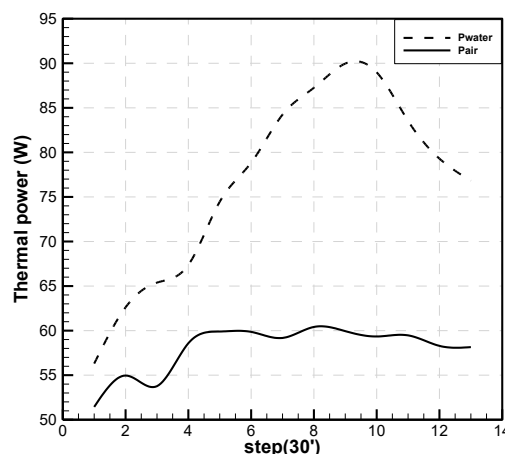
که در آن E توان دریافتی لحظه ای خورشید، G شدت تابش خورشیدی و A سطح مؤثر پنل خورشیدی می باشد. همچنین برای محاسبه بازده الکتریکی پنل خورشیدی، باید نسبت توان الکتریکی خروجی به توان دریافتی از خورشید در آن لحظه محاسبه گردد. این بازده با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\eta_e = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (3)$$

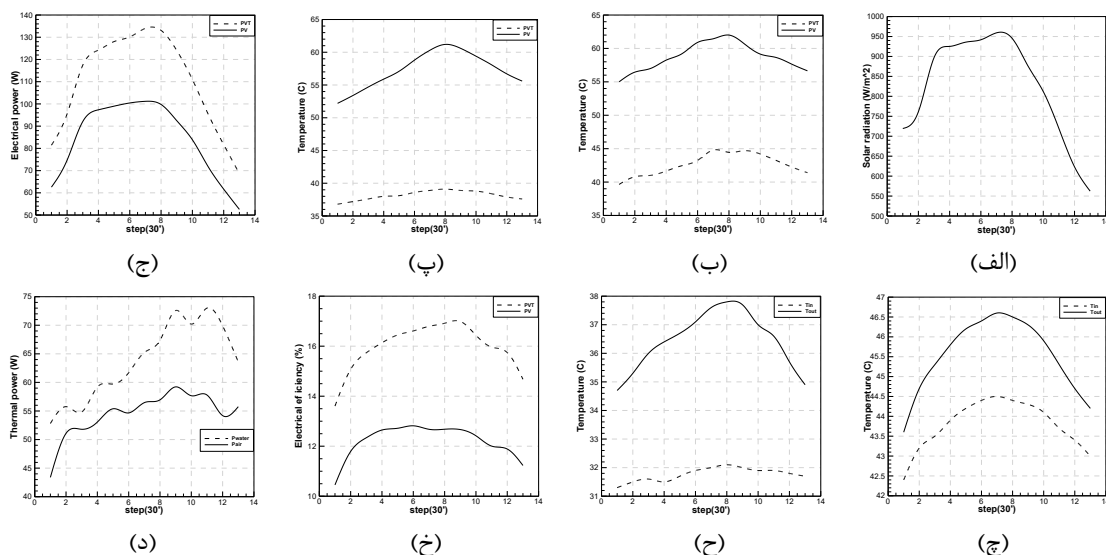
به همین منظور، در آزمایش‌های ۲ و ۳، سرعت جریان هوای عبوری از سطح پنل به ترتیب برابر با ۴ و ۶ متر بر ثانیه تنظیم گردید. همچنین، برای افزایش اثربخشی فرآیند خنک‌سازی و حفظ شرایط پایدار حرارتی، دبی سیال خنک‌کننده مایع (آب) معادل ۸۰ لیتر بر ساعت در نظر گرفته شد. این تنظیمات با هدف ایجاد شرایط بهینه برای تحلیل هم‌زمان عملکرد الکتریکی و حرارتی سیستم اعمال گردید تا تأثیرات متقابل پارامترهای کنترلی بر خروجی‌های سیستم به‌صورت دقیق ارزیابی شود. در آزمایش‌های بعدی نیز (آزمایش‌های شماره ۴ تا ۶) سرعت جریان هوای عبوری از سطح پنل به ترتیب برابر با ۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه برای دبی سیال خنک‌کننده مایع (آب) معادل ۱۲۰ لیتر بر ساعت در نظر گرفته شد. نتایج این آزمایش‌ها در شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ آورده شده است.

بر اساس مجموعه آزمایش‌های انجام‌شده در شرایط مختلف عملیاتی، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تغییرات هم‌زمان در دو پارامتر کلیدی سیستم شامل سرعت جریان هوای عبوری از سطح پنل و دبی سیال خنک‌کننده مایع (آب)، تأثیر مستقیمی بر عملکرد حرارتی و الکتریکی سیستم PVT دارد.

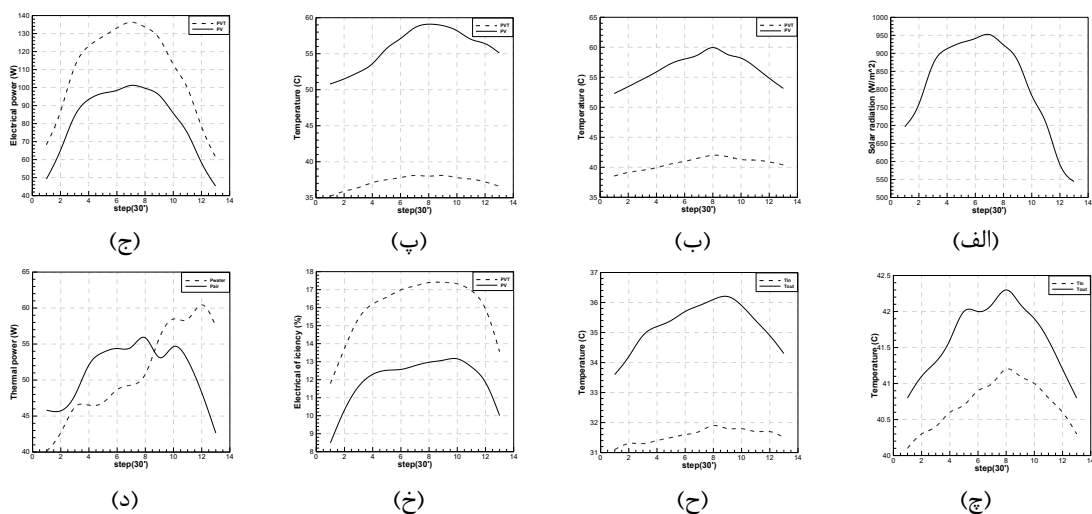
انتظار می‌رود که با تغییر در نرخ جریان هوای عبوری، علاوه بر افزایش توان الکتریکی خروجی، تغییراتی نیز در دماهای اندازه‌گیری‌شده در نقاط مختلف سیستم مشاهده شود؛ چرا که جریان هوا نقش مؤثری در انتقال حرارت و کاهش دمای سطحی پنل ایفا می‌کند.



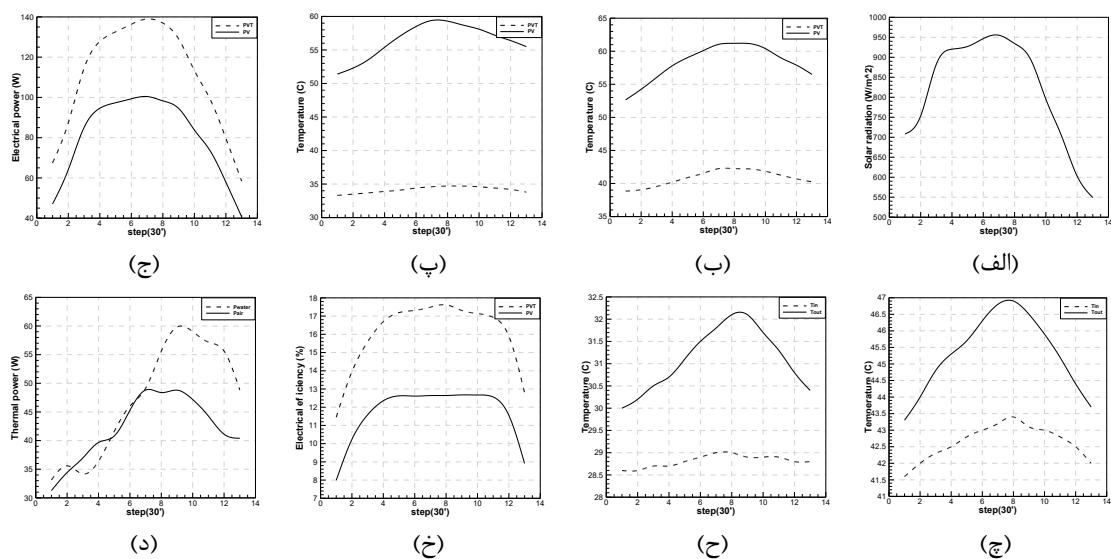
شکل ۱۲- توان حرارتی سیال و هوا در آزمایش اول



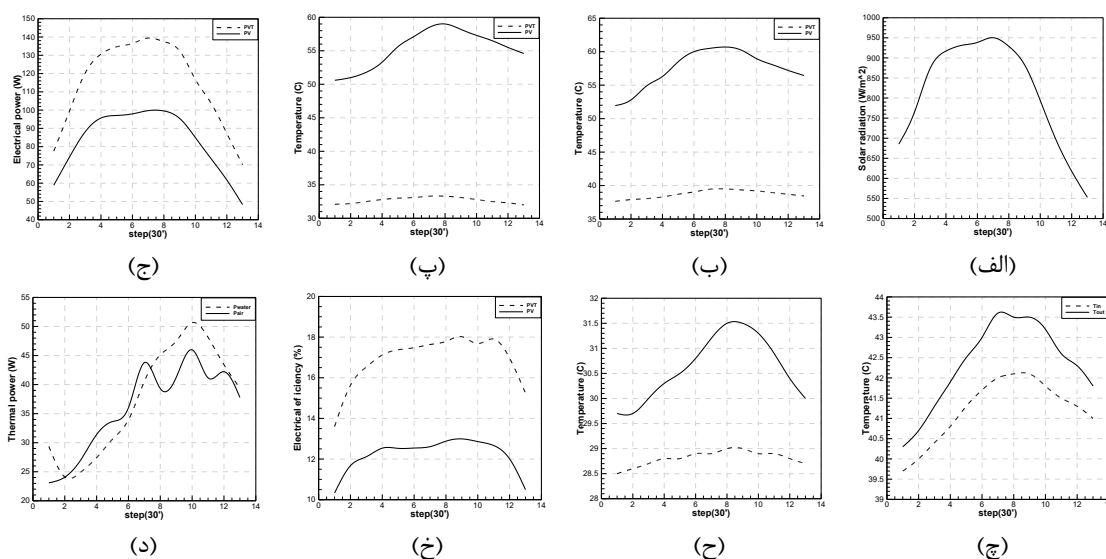
شکل ۱۳- شدت تابش (الف)، دمای بالا (ب) و پایین (پ) و توان الکتریکی (ج) پنل، دمای ورودی و خروجی هوا (چ) و آب (ح)، بازده الکتریکی پنل (خ) و مقایسه توان حرارتی آب و هوا (د) در آزمایش شماره ۲



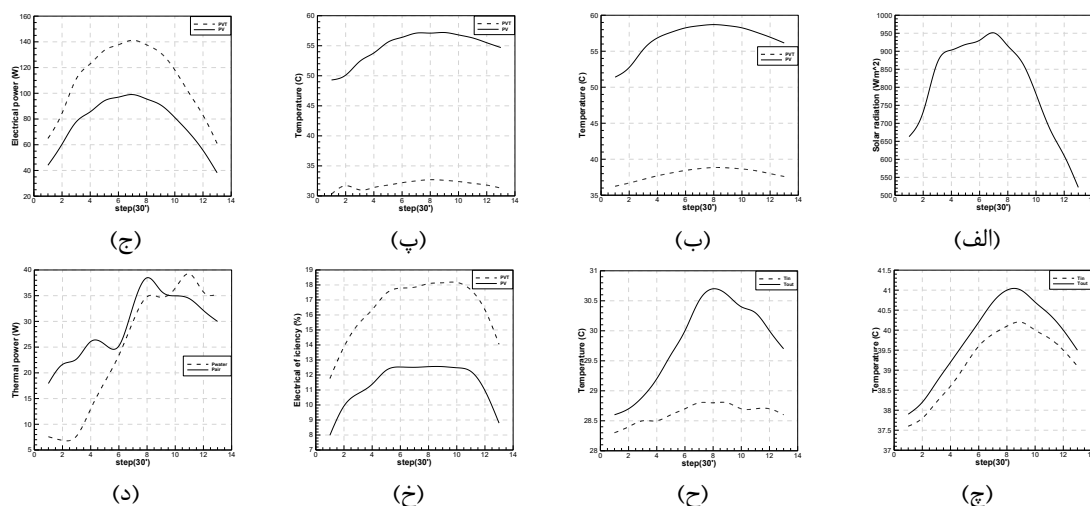
شکل ۱۴- شدت تابش (الف)، دمای بالا (ب) و پایین (پ) و توان الکتریکی (ج) پنل، دمای ورودی و خروجی هوا (ج) و آب (ح)، بازده الکتریکی پنل (خ) و مقایسه توان حرارتی آب و هوا (د) در آزمایش شماره ۳



شکل ۱۵- شدت تابش (الف)، دمای بالا (ب) و پایین (پ) و توان الکتریکی (ج) پنل، دمای ورودی و خروجی هوا (ج) و آب (ح)، بازده الکتریکی پنل (خ) و مقایسه توان حرارتی آب و هوا (د) در آزمایش شماره ۴



شکل ۱۶- شدت تابش (الف)، دمای بالا (ب) و پایین (پ) و توان الکتریکی (ج) پنل، دمای ورودی و خروجی هوا (چ) و آب (ح)، بازده الکتریکی پنل (خ) و مقایسه توان حرارتی آب و هوا (د) در آزمایش شماره ۵



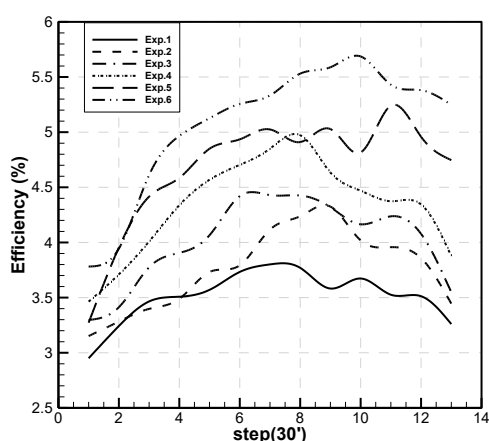
شکل ۱۷- شدت تابش (الف)، دمای بالا (ب) و پایین (پ) و توان الکتریکی (ج) پنل، دمای ورودی و خروجی هوا (چ) و آب (ح)، بازده الکتریکی پنل (خ) و مقایسه توان حرارتی آب و هوا (د) در آزمایش شماره ۶

پیشنهادی برای هر دو پارامتر، یعنی سرعت جریان هوا برابر با ۶ متر بر ثانیه و دبی آب معادل ۱۲۰ لیتر بر ساعت، بیشترین توان الکتریکی خروجی ثبت شد. این نتایج نشان‌دهنده اثربخشی ترکیب بهینه پارامترهای کنترلی در شرایط تابش بالا و خنک‌سازی فعال است. همچنین، کاهش توان حرارتی سیستم، به‌ویژه در بخش جریان هوای خروجی، تأییدی بر عملکرد مؤثر خنک‌سازی بوده و نقش

در مراحل ابتدایی، افزایش تدریجی سرعت جریان هوا منجر به کاهش دمای سطح پنل و بهبود نسبی توان الکتریکی خروجی شد، هرچند میزان این افزایش در شرایط تابش ضعیف خورشید محسوس‌تر بود. در ادامه، با افزایش دبی جریان آب، کاهش دمای سطح زیرین پنل به‌طور قابل توجهی رخ داد و این امر موجب بهبود انتقال حرارت و افزایش بازده الکتریکی گردید. در مراحل پایانی، با اعمال بیشینه مقادیر

می‌دهد که با کاهش شدت تابش در ساعات پایانی روز، تأثیر نوسانات محیطی افزایش یافته و در نتیجه پراکندگی داده‌ها بیشتر می‌شود.

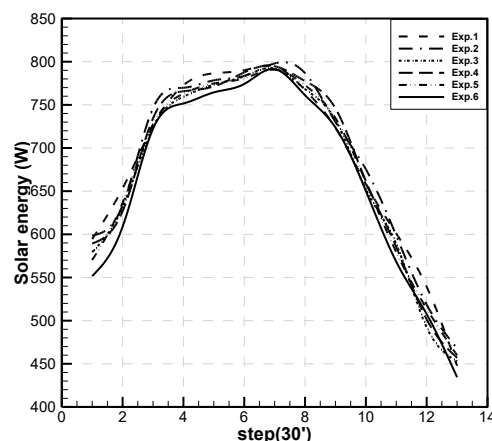
برای ارزیابی دقیق‌تر بازدهی الکتریکی، اختلاف بازده لحظه‌ای میان پنل آزمایشی و پنل مرجع در طول زمان آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۹). این رویکرد نه تنها امکان تحلیل عملکرد لحظه‌ای سیستم را فراهم می‌سازد، بلکه مقایسه‌ی بازدهی در روزهای مختلف را نیز ممکن می‌سازد و به درک بهتر از پایداری و اثربخشی آزمایش‌ها کمک می‌کند. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که کاهش دمای پنل منجر به افزایش بازدهی سیستم فتوولتائیک می‌شود. همچنین، جریان سیال مایع باتوجه به تماس غیرمستقیم با سطح پنل، توانایی بیشتری در کاهش دمای آن نسبت به جریان سیال گازی دارد، که این امر نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد سیستم ایفا می‌کند.



شکل ۱۹- اختلاف بازده الکتریکی لحظه‌ای میان پنل آزمایشی و پنل مرجع در دوره آزمایش

همچنین در این نمودار نیز به‌منظور بررسی میزان پراکندگی داده‌ها در ناحیه نزدیک به اوج تابش، بازه گام‌های ۶ تا ۸ زمانی مورد تحلیل قرار گرفت. در این محدوده، مقادیر بازدهی استخراج‌شده از آزمایش‌های مختلف نشان داد که میانگین بازدهی حدود ۴/۶ درصد بوده است. همچنین، محاسبه انحراف معیار برای این بازه عددی در حدود ۰/۶ درصد را نشان می‌دهد که بیانگر پراکندگی نسبتاً محدود داده‌ها و همگرایی مناسب نتایج آزمایش‌ها در این ناحیه است. این

تعیین‌کننده‌ای در افزایش بازده سیستم‌های ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی ایفا نماید.



شکل ۱۸- انرژی دریافتی از خورشید در دوره آزمایش

در قسمت بعد، مقدار انرژی دریافتی از خورشید را در طول دوره انجام آزمایش مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱۸). توان ورودی تابشی خورشید، یکی از عوامل کلیدی در ارزیابی عملکرد سامانه‌های وابسته به انرژی خورشیدی محسوب می‌شود. این توان که مستقیماً از شدت تابش خورشیدی ناشی می‌گردد، در روزهای مختلف آزمایش دچار نوسان بوده و همین امر موجب تغییراتی در میزان انرژی دریافتی توسط سیستم شده است. بنابراین، تغییرات مشاهده‌شده در شدت تابش نه تنها شرایط محیطی را تحت تأثیر قرار داده، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در توان ورودی و در نتیجه بازده عملکرد سامانه داشته است.

به منظور ارزیابی پراکندگی داده‌ها، مقادیر انرژی دریافتی در آزمایش‌های مختلف در دو ناحیه زمانی مورد بررسی قرار گرفت. در ناحیه اوج تابش، مقادیر در بازه‌ای محدود (حدود ۷۸۵ تا ۸۰۰ وات) متمرکز شده و از پراکندگی اندکی برخوردارند که نشان‌دهنده تکرارپذیری مناسب نتایج و پایداری شرایط آزمایش در زمان وقوع بیشینه تابش است. همچنین، همگرایی منحنی‌ها در این ناحیه بیانگر آن است که تغییرات محیطی و خطاهای اندازه‌گیری تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم در نقطه اوج نداشته‌اند. در مقابل، بیشترین میزان پراکندگی در انتهای دوره آزمایش مشاهده می‌شود، به‌طوری که انحراف معیار به حدود ± 15 وات می‌رسد. این روند نشان

برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی عملکرد و ارتقاء بهره‌وری انرژی در سامانه‌های خورشیدی ترکیبی فراهم می‌آورد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک سیستم ترکیبی شامل پنل خورشیدی و دو سامانه حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است که هدف آن افزایش بازدهی کلی از طریق بهره‌برداری هم‌زمان از انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدشده توسط پنل می‌باشد. این سامانه با استفاده از دو نوع سیال آب و هوا در مسیرهای مجزا برای خنک‌سازی طراحی شده است. دبی جریان آب در دو سطح ۸۰ و ۱۲۰ لیتر بر ساعت و سرعت جریان هوا در سه سطح ۲، ۴ و ۶ متر بر ثانیه تعریف شده است. در هر مرحله آزمایش، یکی از دبی‌های آب با سه سرعت مختلف جریان هوا ترکیب شده و به‌صورت ترتیبی مورد بررسی قرار گرفته است.

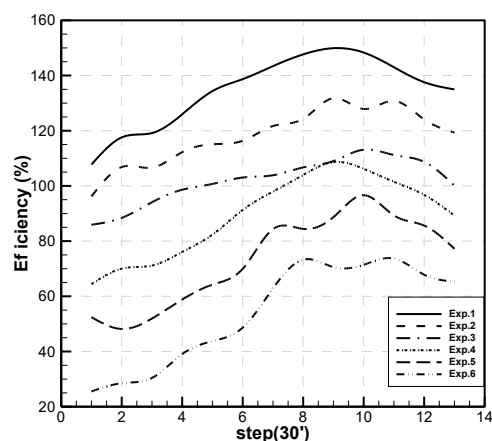
نتایج حاصل از تحلیل داده‌های تجربی در طول دوره آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بازدهی حرارتی سیستم روندی نزولی را طی کرده است. این کاهش بازدهی عمدتاً تحت تأثیر افزایش دبی جریان آب و سرعت جریان هوای عبوری از سطح پنل‌ها رخ داده است. با افزایش سرعت جریان هوا، زمان تماس مؤثر بین هوا و سطح پنل کاهش یافته و در نتیجه فرصت کافی برای جذب گرمای سطح توسط هوا فراهم نشده است. این کاهش زمان اقامت هوا در مجاورت سطح پنل، منجر به افت محسوس نرخ انتقال حرارت از سطح پنل به جریان هوا شده است.

از سوی دیگر، افزایش دبی جریان آب در برخی مراحل باعث کاهش اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال شده که این امر نیز در افت نسبی بازدهی حرارتی نقش داشته است. با تفکیک بازدهی حرارتی به دو مؤلفه مربوط به سیال مایع و سیال گازی، مشخص گردید که سیال مایع به‌دلیل ویژگی‌های ترمودینامیکی برتر از جمله ظرفیت گرمایی ویژه بالا، چگالی بیشتر و تماس مؤثرتر با سطح مبدل حرارتی، نقش غالب‌تری در فرآیند انتقال حرارت ایفا می‌کند. این ویژگی‌ها موجب شده‌اند که سهم سیال مایع در بازدهی حرارتی کل سیستم به‌مراتب بیشتر از سهم سیال گازی باشد.

علاوه بر این، تحلیل نمودارهای دمایی نشان می‌دهد که در مراحل با سرعت جریان هوای بالا، کاهش دمای سطح پنل به‌صورت محدودتر رخ داده و این موضوع تأییدی بر کاهش

موضوع حاکی از پایداری عملکرد سیستم در بازه مذکور و تکرارپذیری قابل قبول نتایج می‌باشد.

در بخش پایانی این تحقیق نیز نمودار بازده حرارتی کل، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های خورشیدی هیبریدی (که نمایانگر میزان انرژی - حرارتی مفیدی است که از کل فرآیند جذب و انتقال حرارت در سیستم بازیابی شده است) در شکل ۲۰ آورده شده است. این نمودار، ترکیبی از دو مؤلفه اصلی بازده حرارتی شامل بازده ناشی از مدار خنک‌کننده آبی و بازده حاصل از جریان هوای عبوری از سطح پنل خورشیدی را در بر می‌گیرد.



شکل ۲۰- بازده حرارتی کل

به‌منظور ارزیابی میزان پراکندگی داده‌ها در ناحیه اوج تابش، بازه گام‌های ۶ تا ۸ زمانی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از استخراج مقادیر بازدهی در این محدوده نشان داد که میانگین بازدهی حدود ۱۰۳/۵ درصد بوده است. همچنین، مقدار انحراف معیار برابر با حدود ۲۶/۵ درصد به‌دست آمد که بیانگر پراکندگی نسبتاً زیاد داده‌ها در این بازه می‌باشد. این میزان پراکندگی نشان‌دهنده اختلاف قابل توجه عملکرد بین آزمایش‌های مختلف در این ناحیه بوده و می‌تواند ناشی از تأثیر پارامترهای عملیاتی یا شرایط متفاوت آزمایش‌ها باشد. بنابراین، برخلاف ناحیه نزدیک به اوج که همگرایی مناسبی مشاهده می‌شود، در این بازه رفتار سیستم از یکنواختی کمتری برخوردار است. در نهایت، این نمودار نه تنها بازتابی از رفتار حرارتی سیستم در شرایط مختلف است، بلکه بستری علمی

- [6] Heydari A, Forati M, Khatam S (2021) Thermal performance investigation of a hybrid solar air heater applied in a solar dryer using thermodynamic modeling. *J. Therm. Eng.* 7(4): 715–730.
- [7] Gülçimen F., Karakaya H, & Durmuş A (2023) Efficiency Analysis in Solar Air Heaters with Attached Internal Fins. *Eur. J. Tech.* 13(1): 12–17.
- [8] Bayrak F, Abu-Hamdeh N, Alnefaie K, Öztöp H (2017) A review on exergy analysis of solar electricity production. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 74: 755–770.
- [9] Aridi R, Faraj J, Ali S, Lemenand T (2022) A comprehensive review on hybrid heat recovery systems: Classifications, applications, pros and cons, and new systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 167: 112669.
- [10] Kiselev A, Magaril E, Karaeva A (2024) Environmental and economic efficiency assessment of biogas energy projects in terms of greenhouse gas emissions. *Energy Ecol. Environ.* 9(1): 68–83.
- [11] Kurtbas I, Durmuş A (2004) Efficiency and exergy analysis of a new solar air heater. *Renew. Energy* 29(9): 1489–1501.
- [12] Ozgen F, Esen M, Esen H (2009) Experimental investigation of thermal performance of a double-flow solar air heater having aluminium cans. *Renew. Energy* 34(11): 2391–2398.
- [13] Shareef A, Abbod M, Kadhim S (2015) Experimental investigation on a flat plate solar collector using Al₂O₃ nanofluid as a heat transfer agent. *Int. J. Energy Environ.* 6(4): 317–330.
- [14] Zhang H, Cheng Y, Lek, D, Liu T, Lin F, Luo W, Wang Q (2022) Membrane-free redox flow cell based on thermally regenerative electrochemical cycle for concurrent electricity storage, cooling and waste heat harnessing of perovskite solar cells. *J. Power Sources.* 548: 232081.
- [15] Aste N, Beccali M, Chiesa G (2002) Experimental evaluation of the performance of a prototype hybrid solar photovoltaic-thermal (PVT) air collector for the integration in sloped roof. *Proceedings of EPIC.*
- [16] Hosseini R, Hosseini N, Khorasanizadeh H (2011) An experimental study of combining a photovoltaic system with a heating system. In *World renew. energy Congr.* 8: 2993–3000.
- [17] Holman JP. (1994) *Experimental methods for engineers.* 6th ed. Singapore: McGrawHill Book Co.

[۱۸] بالانی م.م، حسینی س.ا، نگهداری م.ر (۱۴۰۴) تحلیل و بررسی عددی اثر نسبت ارتفاع و زاویه کلکتور و وجود مانع در یک دودکش خورشیدی با ورودی دو طبقه. *مجله مکانیک سازه ها و شاره ها* ۱۵(۵): ۴۵۷–۴۷۴.

اثر بخشی خنک‌سازی هوا در سرعت‌های بالا است. در مقابل، در مراحل با دبی بالای آب، کاهش دمای سطح پنل به‌صورت محسوس‌تر ثبت شده که نشان‌دهنده عملکرد مؤثرتر سامانه خنک‌کننده مایع در جذب و انتقال حرارت است.

در بخش الکتریکی این پژوهش، تحلیل روند تغییرات بازدهی نشان می‌دهد که کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک تأثیر مستقیمی بر افزایش نسبی بازده الکتریکی دارد. این پدیده به دلیل ماهیت دمایی عملکرد نیمه‌هادی‌ها قابل توجیه است، چرا که با کاهش دمای کاری سلول‌ها، مقاومت داخلی کاهش یافته و در نتیجه ولتاژ مدار باز و توان خروجی به‌طور نسبی افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد بازدهی الکتریکی بین ۳ تا ۵/۷ درصد نسبت به پنل مورد آزمایش می‌تواند بهبود داشته باشد که بیشترین بهبود برای سرعت جریان هوای ۶ m/s با دبی آب ۱۲۰ L/h بدست آمده است.

همچنین بررسی نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش دبی جریان آب در مدار خنک‌کننده و همچنین افزایش سرعت جریان هوای عبوری از سطح پنل، منجر به کاهش محسوس دمای سلول‌ها و کاهش حرارت تجمع‌یافته در سیستم شده است. در جمع‌بندی نتایج حاصل از آزمایش‌ها، می‌توان دریافت که مدیریت حرارتی سیستم، به‌ویژه از طریق تنظیم دقیق دبی سیال مایع، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقاء عملکرد حرارتی سامانه‌های خورشیدی ایفا می‌کند.

مراجع

- [1] Choudhury P, Baruah D (2017) Solar air heater for residential space heating. *Energy Ecol. Environ.* 2(6): 387–403.
- [2] Wazed M, Nukman Y, Islam M (2010) Design and fabrication of a cost effective solar air heater for Bangladesh. *Appl. Energy* 87(10): 3030–3036.
- [3] Basore P, Cole, W (2018) Comparing supply and demand models for future photovoltaic power generation in the USA. *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 26(6): 414–418.
- [4] Vishnu N, John M, Rohinikumar B, Muraleedharan C (2021) Modelling, dynamic simulation and parametric studies of double pass solar air heater for solar drying application. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2054 012004.
- [5] Liu Y, Zhou Y, Chen Y, Wang D, Wang Y, & Zhu Y (2020) Comparison of support vector machine and copula-based nonlinear quantile regression for estimating the daily diffuse solar radiation: A case study in China. *Renew. Energy* 146: 1101–1112.