



Thermal and Electrical Performance of PV Module and Solar PV/T for Water Collector

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Behmounesi S.A.¹ MSc,
Jafarkazemi F.*¹ PhD

How to cite this article

Behmounesi S.A, Jafarkazemi F. Thermal and Electrical Performance of PV Module and Solar PV/T for Water Collector. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(6):1661-1676.

¹Mechanic Faculty, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanic Faculty, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Aboozar Boulevard, Piroozi Street, Tehran, Iran. Postal Code: 1584715414
Phone: +98 (21) 33722831
Fax: +98 (21) 66572717
f_jafarkazemi@azad.ac.ir

Article History

Received: August 27, 2019
Accepted: December 30, 2019
ePublished: June 20, 2020

ABSTRACT

The aim of this paper is to compare the electric power output of the photovoltaic Module (PV) and photovoltaic-thermal water collector (PV/T). The electrical efficiency of photovoltaic Modules is greatly reduced by increasing their surface temperature. The hybrid photovoltaic-thermal collector consists of a PV Module with a thermal collector attached behind it. The circulating fluid in the collector removes heat from the module and increases its electrical efficiency. In the first part of this paper, a theoretical analysis of a liquid PV/T collector is made based on thermal modeling using the first law of thermodynamics. An unglazed hybrid photovoltaic-thermal collector with serpentine tubes has been designed and manufactured to validate the theoretical results. Then the collector has been tested for three days and results have been compared with a sample photovoltaic module. The theoretical calculations were performed using Matlab software and its results showed good agreement with experimental results. Our finding shows a maximum increase of 6% in the electrical efficiency of PV/T in comparison to the PV module. At the same time, the water temperature has increased by 5°C.

Keywords Solar Collector; Photovoltaic/Thermal Collector; PV/T; Solar Energy

CITATION LINKS

[1] The experimental performance of an unglazed PVT collector with two different absorber ... [2] Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline ... [3] Hybrid photovoltaic/thermal solar ... [4] Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar ... [5] Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal ... [6] Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal ... [7] The yield of different combined PV-thermal collector ... [8] Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar ... [9] Solar engineering of thermal ... [10] A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system ... [11] A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber ... [12] Evaluation of flat-plate solar collector... [13] The thermal and electrical yield of a PV-thermal ... [14] Computer modeling and experimental validation of a ... [15] Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector ... [16] Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental ... [17] Testing of two different types of photovoltaic-thermal (PVT) modules with heat flow ... [18] An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic ... [19] Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy ... [20] Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water ... [21] Theoretical and experimental studies of a new configuration ... [22] Effect of glass cover and working fluid on the performance of photovoltaic ... [23] Thermal modeling and performance evaluation of photovoltaic thermal ... [24] Evaluation and analysis of water-based photovoltaic/thermal ... [25] Building integrated photovoltaic thermal systems: For sustainable ... [26] Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: A parametric ... [27] Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air ... [28] Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic ... [29] Effect of flow channel dimensions on the performance of a box-frame ... [30] Fundamentals of photovoltaic modules and their ... [31] Thermal performance of a serpentine absorber ... [32] Convection heat ... [33] Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental ... [34] Solar energy engineering: Processes and ... [35] A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric ... [36] Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid ... [37] Using uncertainty analysis in the planning of an ...

عملکرد حرارتی و الکتریکی مدول فتوولتائیک و کلکتور خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی برای سیال آب

سیدامیر به‌مونی MSc

دانشکده مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

فرزاد جعفرکاظمی PhD*

دانشکده مکانیک، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

هدف از این مقاله، مقایسه توان الکتریکی خروجی مدول فتوولتائیک (PV) و کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی (PV/T) با سیال آب است. راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک با افزایش دمای سطح آن به شدت کاهش می‌یابد. کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی شامل یک مدول فتوولتائیک است که یک کلکتور حرارتی به پشت آن متصل شده است. با گردش یک سیال با دمای ورودی پایین، حرارت از مدول فتوولتائیک دفع شده و راندمان الکتریکی آن افزایش می‌یابد. در این تحقیق، ابتدا مدل‌سازی حرارتی مدول فتوولتائیک و کلکتور PV/T با سیال آب به صورت تئوری و به کمک قانون اول ترمودینامیک انجام شده است. در ادامه برای اعتبارسنجی به نتایج تئوری، یک نمونه کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی بدون پوشش نوع مارپیچی با سیال آب طراحی و ساخته شد و در مدت سه روز تحت آزمایش قرار گرفت و نتایج حاصل از آن با مدول فتوولتائیک شاهد مقایسه شد. محاسبات تئوری به کمک نرم‌افزار متلب انجام گرفت و نتایج به دست آمده از آن، مطابقت خوبی را با آزمون تجربی مدول PV و کلکتور PV/T نشان داد. نتایج این تحقیق بهبود عملکرد الکتریکی کلکتور PV/T نسبت به مدول فتوولتائیک شاهد را نشان می‌دهد؛ به طوری که راندمان الکتریکی آن نسبت به مدول PV شاهد، حداکثر ۶٪ افزایش یافته است. همچنین با در نظر گرفتن مساحت کوچک کلکتور PV/T، دمای آب در خروجی حدود ۵°C بیشتر شده است.

کلیدواژه‌ها: کلکتور خورشیدی، کلکتور فتوولتائیک-حرارتی، PV/T، انرژی خورشیدی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۵

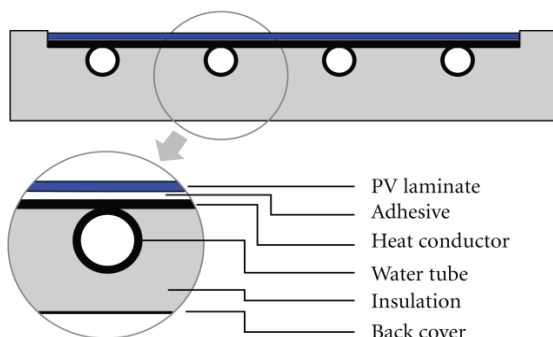
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۹

*نویسنده مسئول: f_jafarkazemi@azad.ac.ir

مقدمه

فناوری کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی (Hybrid Photovoltaic-Thermal Collector; PV/T) به خوبی در صنعت خورشیدی شناخته شده است. سلول‌های فتوولتائیک موادی نیمه‌هادی هستند که پرتوهایی با طول موج کوتاه منتشر شده از خورشید را به طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. دمای مدول‌های فتوولتائیک (Photovoltaic Modules) توسط تابش خورشیدی جذب شده که به الکتریسیته تبدیل نشده‌اند، افزایش یافته و موجب کاهش راندمان الکتریکی آن می‌شود. یکی از روش‌های کاهش دمای مدول فتوولتائیک استفاده از حرارت پشت مدول برای گرم کردن آب/هوا یا سیالات دیگر است. به وسایلی که بر این مبنا عمل می‌کنند کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی گفته می‌شود. در واقع کلکتورهای PV/T دستگاهی متشکل از یک مدول فتوولتائیک و یک کلکتور حرارتی صفحه تخت مجزا هستند

که به طور همزمان می‌توانند هر دو انرژی الکتریکی و حرارتی را از طریق تابش خورشید فراهم کنند از این رو، می‌توان به نرخ تبدیل انرژی بالاتری در تابش خورشیدی دست یافت. مدول‌های PV به خوبی کلکتورهای حرارتی عمل کرده و جاذب‌های انتخابی (Selective) مناسبی هستند. معمولاً کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی با سیال آب از سلول فتوولتائیک سیلیکون به همراه کلکتور حرارتی (ورق فلزی متصل شده به لوله‌های گردش آب) به منظور جلوگیری از تماس مستقیم سیال با سطح پشت مدول فتوولتائیک ساخته می‌شوند. که در آن سیال در دمایی پایین‌تر از مدول فتوولتائیک گرم شده و موجب کاهش دمای آن می‌شود. تولید همزمان الکتریسیته و حرارت در یک دستگاه منجر به بازدهی بیشتر الکتریکی، افزایش بازده کلی دستگاه، افزایش طول عمر سیستم و دوام بیشتر سلول‌ها به واسطه کاهش دما می‌شود. استفاده از کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی از لحاظ اقتصادی به صرفه بوده و بازگشت سرمایه در مدت زمان کوتاه‌تری انجام می‌پذیرد. همچنین مشکلاتی از قبیل مساحت محدود برای نصب سیستم‌های حرارتی و الکتریکی جداگانه در آنها وجود ندارد. جاذب (ورق-لوله) به دلیل خروج حرارت از مدول فتوولتائیک به سیال بسیار پراهمیت است بنابراین عملکرد حرارتی و الکتریکی یک کلکتور PV/T نوع مایع به طراحی مناسب جاذب وابسته است. در شکل ۱، روش عملکرد کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی برای گرمایش مایع نشان داده شده است.



شکل ۱) نمای مقطع عرضی کلکتور PV/T ورق و لوله بدون پوشش^[۱]

به‌کارگیری کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی PV/T خورشیدی دارای مزایایی همچون استفاده همزمان از واحد حرارتی و الکتریکی، افزایش راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک، افزایش بازده کلی دستگاه، بهره‌گیری بهینه از فضای در دسترس، افزایش فاکتور پرشدن (Fill Factor; FF) مدول PV، عدم نیاز به منبع الکتریکی خارجی برای گردش سیال، افزایش طول عمر مدول فتوولتائیک، ایجاد معماری متحدالشکل بر روی بام ساختمان، کوتاه‌تر شدن زمان بازگشت سرمایه هستند.

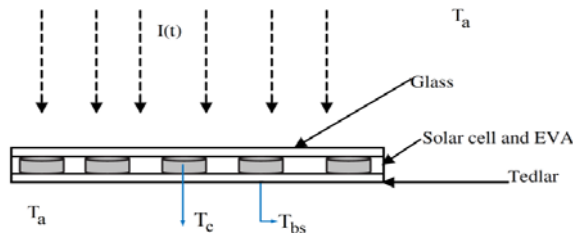
در سه دهه اخیر، کلکتورهای فتوولتائیک-حرارتی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است و مطالعات وسیعی در زمینه مدل‌سازی و بهینه‌سازی راندمان حرارتی و الکتریکی آن صورت گرفته

محافظ (تدلار)، توافق خوبی را میان بازدهی تئوری و عملی دستگاه در آب و هوای دهلی نو به دست آوردند. آنها همچنین افزایش ۱۸٪ را در بازدهی کلی سیستم ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی مشاهده کردند. *دابی* و *تای* [17] دو نمونه مختلف از کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی که در آن نوع اول شامل مدول سیلیکونی منوکریستالی یکپارچه شده با کلکتور حرارتی نوع دوم شامل مدول سیلیکونی پلی کریستالی یکپارچه شده با کلکتور حرارتی نوع صفحه موازی را تحت شرایط آب و هوای گرمسیری سنگاپور ارزیابی کردند. راندمان حرارتی و الکتریکی متوسط کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی نوع اول به ترتیب برابر ۴۰/۷٪ و ۱۱/۸٪ و برای نوع دوم برابر ۳۹/۴٪ و ۱۱٪ حاصل شد. همچنین بازده الکتریکی مدول فتوولتائیک نیز در شرایط وجود و عدم وجود کلکتور حرارتی مقایسه شد و مشخص شد که میانگین بازده الکتریکی کلکتور PV/T حدود ۴/۰٪ بالاتر از مدول فتوولتائیک عادی است. *سرحدی* و همکاران [18]، عملکرد حرارتی و الکتریکی کلکتورهای PV/T هوا را با استفاده از یک مدل حرارتی و الکتریکی بهبودیافته بررسی کردند و گزارش دادند که راندمان انرژی حرارتی، الکتریکی و کل کلکتورهای PV/T هوا به ترتیب برابر ۱۷/۸، ۱۰/۰۱ و ۴۵٪ است. *صبح‌نمایان* و همکاران [19]، براساس مفهوم آگرژی عملکرد حرارتی و الکتریکی کلکتورهای PV/T را بهینه کردند. آنها برای به دست آوردن نتایج از یک برنامه شبیه‌ساز کامپیوتری استفاده کردند که با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده بود. نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی به دست آمده، مطابقت خوبی داشت. *فوده‌ولی* و همکاران [20]، عملکرد انرژی کلکتور PV/T با سیال آب را تحت تابش ۵۰۰ وات بر مترمربع بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که در تابش خورشیدی ۸۰۰ وات بر مترمربع و نرخ جریان ۰/۴۱ کیلوگرم بر ثانیه کلکتور PV/T با جاذب حلزونی شکل دارای حداکثر بازده است. *بن چین / هوچین* و همکاران [21]، عملکرد تئوری و تجربی ساختار جدیدی از کلکتور PV/T را با هدف استفاده از مواد ارزان‌تر و بهره‌برداری بالاتر از انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار دادند و از یک برنامه شبیه‌ساز رایانه‌ای به منظور محاسبه پارامترهای حرارتی و برقی استفاده کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های تجربی مطابقت خوبی داشت. همچنین انرژی حرارتی و الکتریکی کلکتور PV/T به ترتیب برابر ۱۲۵/۳۶ و ۴۰ وات به دست آمد. *کاظمیان* و همکاران [22]، یک مطالعه تجربی بر روی تاثیر پوشش شیشه‌ای و اثرات مایعات در عملکرد کلکتور PV/T انجام دادند و دو کلکتور PV/T مشابه، یکی با پوشش شیشه‌ای و دیگری بدون پوشش را طراحی و ساختند. نتایج آنها نشان‌دهنده بیشتر بودن راندمان الکتریکی کلکتور PV/T بدون پوشش در مقایسه با کلکتور PV/T دارای پوشش بود در صورتی که راندمان کل کلکتور PV/T پوشش‌دار بالاتر بود. *سینگ* و همکاران [23]، از یک مدل شبیه‌ساز توسعه‌یافته ریاضی برای ارزیابی عملکرد کلکتور PV/T ساخته شده با مدول فیلم نازک و جاذب حلزونی شکل استفاده کردند. و تاثیر پارامترهای مختلف بر راندمان حرارتی و الکتریکی کلکتور PV/T را

است. *ویلسون* [2] در تحقیق خود برای خنک‌کاری مدول فتوولتائیک پیشنهاد کرد که از جریان سیال آب در پشت آن استفاده شود. *تریپانانوستوپولوس* و همکاران [3]، به صورت تجربی سیستم‌های ترکیبی خورشیدی فتوولتائیک-حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند و برای خروج حرارت از مدول فتوولتائیک، از دو سیال آب و هوا در پشت صفحه مدول استفاده نمودند. در سیستمی که آنها مورد آزمایش قرار دادند، آب در لوله‌هایی جریان داشت که توسط یک صفحه صاف مسی به پشت مدول متصل بود و بدین طریق، تماس حرارتی ایجاد می‌شد. *پارکاش* [4] به این نتیجه رسید که استفاده از سیال خنک‌کننده آب بهتر از هوا است. *هوانگ* و همکاران [5]، و همچنین *دابی* و *تیواری* [6] به مدل‌سازی و بررسی آزمایشگاهی عملکرد کلکتورهای PV/T نوع مایع پرداختند و نشان دادند که راندمان کلکتورهای PV/T نسبت به کلکتورهای حرارتی معمولی بیشتر است. *زندگ* و همکاران [7]، در مطالعات عددی خود بر روی کلکتورهای PV/T مختلف، تاکید کردند که کلکتورهای فتوولتائیک-حرارتی نوع ورق-لوله در حالت بدون پوشش در مقایسه با حالت پوشش‌دار، بهترین راندمان خروجی را دارند اما به علت اتلاف حرارت از بالای کلکتور به محیط، عملکرد حرارتی ضعیفی را نشان می‌دهد. *برگنی* و *لوویک* [8] مدلی حرارتی مشابه مدل ارائه شده توسط *دافی* و *بکمن* [9] برای کلکتورهای فتوولتائیک-حرارتی ارائه دادند. این مدل مجموع راندمان حرارتی و الکتریکی کلکتور فتوولتائیک-حرارتی را در حدود ۸۲/۶۲٪ پیش‌بینی می‌کرد. *جی* و همکاران [10]، تحقیقی بر روی کلکتورهای خورشیدی PV/T در دانشگاه علوم و تکنولوژی چین انجام دادند که در آن کلکتور PV/T به طور کامل با مدول‌های سیلیکونی منوکریستالی پوشیده شده بود. نتایج آنها راندمان الکتریکی ۱۰/۲٪، راندمان حرارتی ۴۵٪ و راندمان کل ۵۲٪ را نشان می‌داد. *سندنک* و *رکستاد* [11] با بررسی تاثیر سلول‌های خورشیدی بر روی مدل شناخته شده *هاتل* و *ویلر* [12]، مدل تحلیلی کلکتور فتوولتائیک حرارتی را بهبود دادند و توافق خوبی بین نتایج تحلیلی و تجربی به دست آوردند. *زندگ* و همکاران [13]، مدل‌های یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی را برای تحلیل عملکرد گردآورنده PV/T توسعه داده و نشان دادند که مدل یک‌بعدی دایمی به خوبی دو مدل دیگر می‌تواند عملکرد کلکتور PV/T را پیش‌بینی کند. *چو* و همکاران [14, 15]، با انجام آنالیز انرژی و آگرژی بر روی کلکتورهای PV/T در حالت پوشش‌دار و بدون پوشش، نشان دادند که راندمان حرارتی و الکتریکی کلکتورهای پوشش‌دار به ترتیب برابر ۵۰/۳٪ و ۹/۳٪ و برای کلکتورهای فاقد پوشش برابر ۴۰/۸٪ و ۱۲/۱٪ است. آنها همچنین محاسبه کردند که افزایش راندمان مدول فتوولتائیک و دمای محیط منجر به افزایش راندمان کلی سیستم، در مقابل تابش و سرعت باد بالاتر سبب کاهش راندمان کل می‌شود. همچنین افزایش فاکتور تراکم منجر به افزایش راندمان کل در حالت فاقد پوشش و کاهش راندمان کل در حالت پوشش‌دار می‌شود. *تیواری* و *سود* [16] براساس داده‌های تجربی و نظری برای یک کلکتور فتوولتائیک نوع شیشه‌ای-پوسته

مدل‌سازی حرارتی مدول فتولتائیک

نمای مقطع عرضی یک مدول فتولتائیک در شکل ۲ نمایش داده می‌شود که تابش خورشید به آن برخورد کرده است و سطح پایینی و بالایی آن در دمای محیط T_a است.



شکل ۲) نمای مقطع عرضی مدول فتولتائیک

اگر b عرض و dx المان طولی مدول فتولتائیک باشد، تعادل انرژی مدول PV برای المان طولی bdx برابر معادله ۱ است [16, 25]:

$$\tau_G \alpha_c \beta_c I(t) b dx + \tau_G (1 - \beta_c) \alpha_T I(t) b dx = [U_t (T_c - T_a) + U_T (T_c - T_{bs})] b dx + \tau_G \eta_c \beta_c I(t) b dx \quad (1)$$

که در آن T_c دمای سلول خورشیدی، T_a دمای محیط، T_{bs} دمای صفحه پشتی مدول PV (پوسته محافظ)، $I(t)$ تابش خورشیدی در زمان t ، τ_G ضریب عبور شیشه مدول PV، α_c ضریب جذب سلول خورشیدی، α_T ضریب جذب پوسته محافظ، β_c فاکتور تراکم سلول خورشیدی و η_c راندمان سلول خورشیدی (تابعی از دمای سلول) است. U_T ضریب انتقال حرارت هدایت از سلول خورشیدی به سیال از طریق پوسته محافظ است که برابر معادله ۲ است [16, 26, 27]:

$$U_T = \left[\frac{L_T}{K_T} \right]^{-1} \quad (2)$$

و در آن L_T و K_T به ترتیب ضخامت و هدایت حرارتی پوسته محافظ هستند.

U_t ضریب کلی انتقال حرارت از سلول خورشیدی به محیط از طریق پوشش شیشه‌ای است [25]:

$$U_t = \left[\frac{L_G}{K_G} + \frac{1}{h_i + h_r} \right]^{-1} \quad (3)$$

که در آن L_G و K_G به ترتیب ضخامت و هدایت حرارتی شیشه PV است. h_i و h_r به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی و تشعشع بین آسمان و سلول خورشیدی هستند که برابر با هستند [18, 28]:

$$h_i = 2.8 + 3.0 V_w \quad (4)$$

$$h_r = \varepsilon_G \sigma (T_{sky} + T_c) (T_{sky}^2 + T_c^2) \quad (5)$$

V_w سرعت جریان باد روی سطح بالایی کلکتور PV/T، ε_G ضریب نشر کلکتور PV/T و T_{sky} دمای آسمان است که رابطه آن با دمای محیط به صورت زیر است [28]:

$$T_{sky} = T_a - 6 \quad (6)$$

همچنین به جای عبارت $1/h_o = 1/(h_i + h_r)$ می‌توان از رابطه ۷ استفاده نمود [16, 29, 30]:

$$h_o = 5.7 + 3.8 V_w \quad (7)$$

بنابراین معادله ۳ برابر است با [25]:

به دست آوردند. کاظم [24] عملکرد الکتریکی کلکتور PV/T و مدول PV را تحت تاثیر شرایط محیطی و تابش خورشیدی در طی سه روز آزمایش مقایسه کرد و نشان داد که کلکتور PV/T عملکرد الکتریکی مناسب‌تری دارد. همچنین توان الکتریکی خروجی مدول PV/T، ۶٪ بالاتر از مدول PV مجزا است.

طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون تحقیقات اندکی در خصوص ارزیابی محاسباتی و آزمون تجربی مدول فتولتائیک با کلکتور ترکیبی فتولتائیک-حرارتی انجام شده است. تحقیقات قبلی دارای نواقصی در اعمال تمامی پارامترهای تاثیرگذار بر کلکتور PV/T و مدول PV هستند، به همین دلیل در این تحقیق سعی شده است تا تمامی جنبه‌های تاثیرگذار در کلکتور PV/T و مدول PV اعم از پارامترهای داخلی و خارجی لحاظ شوند. همچنین در تحقیقات اندکی روابط حاکم بر کلکتور PV/T نوع ماریپیچی تحلیل تئوری شده است. از طرفی آزمون تجربی کلکتور PV/T ماریپیچی نوع ورق و لوله با جنس لوله و صفحه جاذب مسی و مقایسه عملکرد الکتریکی آن با مدول PV معمولی دیده نمی‌شود. از این رو در این پژوهش، مدل‌سازی حرارتی مدول فتولتائیک و کلکتورهای ترکیبی فتولتائیک-حرارتی PV/T بدون پوشش نوع ورق-لوله با سیال عامل آب به کمک معادلات تعادل انرژی انجام شده است. به منظور بررسی تجربی نتایج حاصل از مدل‌سازی، دو مدول فتولتائیک یکسان خریداری شد که از یکی در ساخت کلکتور ترکیبی فتولتائیک-حرارتی بدون پوشش نوع ماریپیچی با سیال آب و دیگری به عنوان مدول فتولتائیک شاهد به کار رفت. آزمون تجربی کلکتور ترکیبی فتولتائیک-حرارتی و مدول فتولتائیک در مدت سه روز و تحت سه شرایط متفاوت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام گرفت. در آزمایش اول اثر افزایش تابش خورشیدی، آزمایش دوم تاثیر افزایش دمای آب ورودی و آزمایش سوم اثر افزایش دبی سیال عبوری بر روی کلکتور PV/T بررسی شده است.

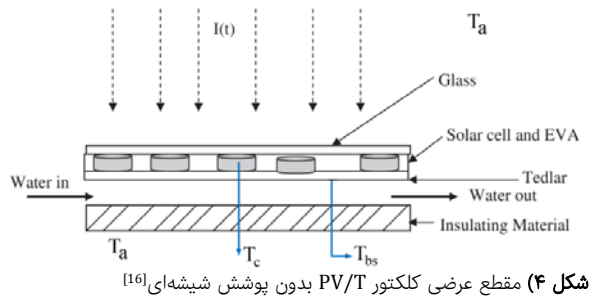
مدل‌سازی حرارتی

ترکیب استفاده از تعادل انرژی و تحلیل جریان سیال امکان پیش‌بینی رفتار دینامیکی سیستم فتولتائیک-حرارتی را فراهم می‌کند. به این منظور تحلیل جامعی شامل معادلات تعادل انرژی برای اجزای مختلف مورد استفاده در سیستم فتولتائیک-حرارتی ارائه شده است. به منظور نوشتن معادله تعادل انرژی برای هر جزء کلکتور ترکیبی فتولتائیک-حرارتی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود: ۱- ظرفیت گرمایی کلکتور PV/T در مقایسه با ظرفیت گرمایی آب موجود در مخزن ذخیره نادیده گرفته می‌شود. ۲- انتقال حرارت یک‌بعدی فرض می‌شود. ۳- سیستم در حالت شبه پایدار است. ۴- ظرفیت حرارتی مواد سلول خورشیدی، پوسته محافظ و عایق نادیده گرفته شده‌اند. ۵- ضریب عبوردهی اتیلن وینیل استات تقریباً ۱۰۰٪ است. ۶- تلفات اهمی در مدول خورشیدی قابل اغماض است. ۷- در هر لایه دمای میانگین فرض شده است.

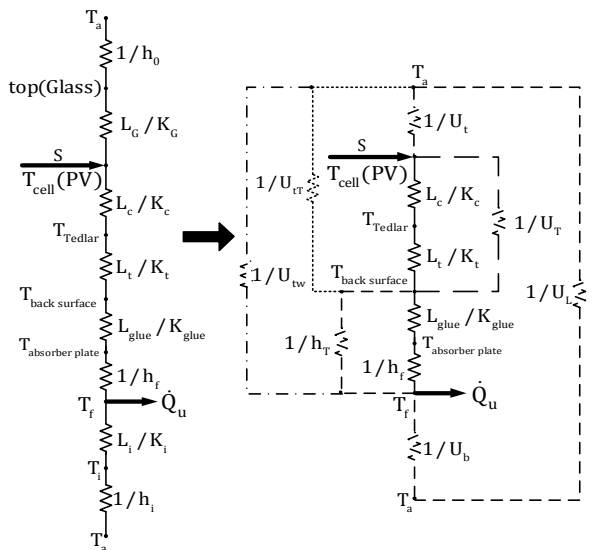
حاصل می‌شود [16]:

$$U_T(T_c - T_{bs}) = h_{p1}(\alpha\tau)_{eff}I(t) - U_{tT}(T_{bs} - T_a) \quad (14)$$

رابطه ۱۴ نرخ انرژی حرارتی انتقال یافته از سلول‌های خورشیدی به صفحه پشتی پوسته محافظ تعریف می‌شود. شبکه دمایی برای کلکتور PV/T بدون شیشه در شکل ۵ نشان داده می‌شود. در سمت چپ شکل ۵، مقاومت اجزای مختلف کلکتور PV/T نمایش داده شده است و در سمت راست، قسمت‌هایی که با خط چین مشخص شده، مقاومت‌های سری و موازی معادل هستند.



شکل ۴) مقطع عرضی کلکتور PV/T بدون پوشش شیشه‌ای [16]



شکل ۵) شبکه دمایی کلکتور PV/T بدون شیشه به صورت عبارت‌هایی از مقاومت‌های هدایت، جابجایی و تشعشع

در رابطه ۱۴، عبارت $h_{p1} = U_T / (U_T + U_t)$ [16, 19, 26, 30] فاکتور جریمه به علت پوسته محافظ از طریق شیشه، سلول خورشیدی و EVA است و همچنین U_{tT} ضریب کلی انتقال حرارت از شیشه به پوسته محافظ از طریق سلول خورشیدی است که برابر با رابطه زیر است [16, 30]:

$$U_{tT} = \left[\frac{1}{U_t} + \frac{1}{U_T} \right]^{-1} = \frac{U_t U_T}{U_T + U_t} \quad (15)$$

در کلکتورهای PV/T برای اتصال صفحه جاذب به پوسته محافظ از یک چسب سیلیکونی به ضخامت L_{glue} و هدایت حرارتی K_{glue} استفاده می‌شود. بنابراین عبارت L_{glue}/K_{glue} مقاومت انتقال حرارت هدایت از صفحه پشتی پوسته محافظ به صفحه جاذب است. h_f ضریب انتقال حرارت از صفحه جاذب به سیال است. تعادل انرژی

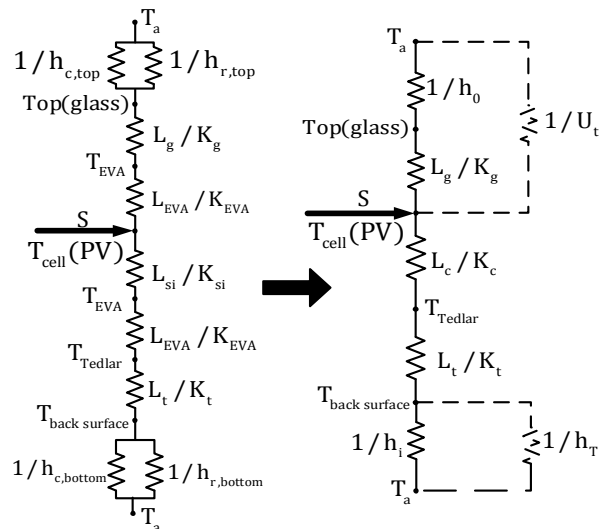
$$U_t = \left[\frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (8)$$

که h_o ضریب انتقال حرارت (جابجایی و تشعشع) شیشه به محیط است. با ساده‌سازی معادله ۱ دمای میانگین سلول خورشیدی به فرم رابطه ۹ به دست می‌آید [16, 19, 25]:

$$T_c = \frac{(\alpha\tau)_{eff}I(t) + U_t T_a + U_T T_{bs}}{U_T + U_t} \quad (9)$$

$$(\alpha\tau)_{eff} = \tau_G [\alpha_c \beta_c + \alpha_T (1 - \beta_c) - \eta_c \beta_c] \quad (10)$$

جمله $(\alpha\tau)_{eff}$ حاصل ضرب ضریب جذب و عبور موثر است. شبکه دمایی برای یک مدول فتوولتائیک در شکل ۳ نشان داده می‌شود.



شکل ۳) شبکه دمایی برای یک مدول خورشیدی به صورت عبارت‌هایی از مقاومت‌های هدایت، جابجایی و تشعشع

و K_{si} و L_{si} به ترتیب ضخامت و هدایت حرارتی سلول خورشیدی (سیلیکون) هستند. در سمت راست شکل ۳ به جهت ساده‌سازی روابط مقاومت تشعشع پایینی مدول $1/h_{r,bottom} \approx 0$ فرض می‌شود. $1/h_T$ مقاومت جابجایی از صفحه پشت مدول فتوولتائیک به سیال است. تعادل انرژی برای صفحه پشتی پوسته محافظ مدول فتوولتائیک برای المان طولی bdx برابر است با [27]:

$$U_T(T_c - T_{bs})bdx = h_i(T_{bs} - T_a)bdx \quad (11)$$

با جایگزینی T_c از معادله ۹ در معادله ۱۱، دمای صفحه پشتی بیان می‌شود با [16, 25]:

$$T_{bs} = \frac{h_{p1}(\alpha\tau)_{eff}I(t) + U_{tT}T_a + h_i T_a}{U_{tT} + h_i} \quad (12)$$

مدل‌سازی حرارتی کلکتور PV/T بدون شیشه

مقطع عرضی کلکتور PV/T بدون پوشش در شکل ۴ نشان داده شده است.

اگر b عرض و dx المان طولی کلکتور PV/T باشد، معادله تعادل انرژی مدول فتوولتائیک برای المان طولی bdx برابر است با [16, 19, 27, 30]:

$$\tau_G [\alpha_c \beta_c I(t) + (1 - \beta_c) \alpha_T I(t)] bdx = [U_t(T_c - T_a) + U_T(T_c - T_{bs})] bdx + \tau_G \eta_c \beta_c I(t) bdx \quad (13)$$

با تقسیم طرفین معادله ۱۳ به bdx و مرتب‌سازی آن رابطه ۱۴

پشتی پوسته محافظ) به سیال است که این جریان سیال می‌تواند هوای محیط (در صورتی که کلکتور PV/T فاقد جریان سیال باشد) یا لوله های آب تعبیه شده در زیر صفحه جاذب باشد. هر چه میزان h_T بیشتر شود راندمان حرارتی و الکتریکی افزایش می‌یابد. در صورتی که نرخ جریان آب صفر باشد، جمله $\dot{m}_f c_f (T_{f,out} - T_{f,in})$ در رابطه ۲۲، صفر شده و بنابراین مقدار h_T به شدت کاهش می‌یابد. در نتیجه دمای سلول PV در کلکتور PV/T به میزان زیادی بالا می‌رود. انرژی مفید دریافتی به‌ازای واحد طول جریان سیال آب برای کلکتور PV/T که از طریق آب انتقال می‌یابد به‌صورت زیر است [16]:

$$\dot{q}_u = WF' [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_{tw} (T_f - T_a) - U_b (T_f - T_a)] \quad (23)$$

است که در آن F' راندمان فین، W فاصله بین دو مجرای جریان و \dot{q}_u انرژی مفید دریافتی به‌ازای واحد طول جریان است که از طریق سیال انتقال می‌یابد. سیال در دمای $T_{f,in}$ وارد کلکتور می‌شود و دمای آن در خروجی تا $T_{f,out}$ افزایش می‌یابد. در شکل ۶ می‌توان یک موازنه انرژی بر روی سیال عبورکننده از یک لوله واحد با طول Δx را بیان نمود به‌طوری که [19]:

$$\left(\frac{\dot{m}}{n}\right) C_f T_f \Big|_{x+\Delta x} - \left(\frac{\dot{m}}{n}\right) C_f T_f \Big|_x - \dot{q}_u \Delta x = 0 \quad (24)$$

که n تعداد لوله های موازی است. با تقسیم معادله فوق به Δx و یافتن حد زمانی که $\Delta x \rightarrow 0$ و جایگزینی معادله ۲۴ برای \dot{q}_u ، انرژی خالص حرارتی در دسترس سیال بین پوسته محافظ و عایق زیرین با رابطه ۲۵ بیان می‌شود [16, 19]:

$$WF' [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_L (T_f - T_a)] = \frac{\dot{m}}{n} C_f \frac{dT_f}{dx} \quad (25)$$

که در آن U_L ضریب کلی انتقال حرارت از سلول خورشیدی به محیط از طریق سطح بالایی و عایق پشتی است که برابر با معادله زیر است [16, 26]:

$$U_L = U_{tw} + U_b \quad (26)$$

معادله ۲۵ مشابه عبارت کلکتور صفحه تخت معمولی به‌جز ترم‌های h_{p1} و h_{p2} است. وجود h_{p1} و h_{p2} راندمان کلکتور PV/T را در مقایسه با یک کلکتور صفحه تخت معمولی کاهش می‌دهد. از معادله ۱۳ عبارت دمای میانگین سلول خورشیدی برحسب دمای صفحه پشتی مدول فتوولتائیک و پارامترهای آب و هوایی می‌تواند به‌صورت معادله ۲۷ نوشته شود [19, 26]:

$$T_c = \frac{(\alpha\tau)_{eff} I(t) + U_t T_a + U_T T_{bs}}{U_T + U_t} \quad (27)$$

همچنین عبارت دمای صفحه پشتی T_{bs} مدول فتوولتائیک به‌صورت معادله ۲۸ به‌دست می‌آید [16, 19, 26]:

$$T_{bs} = \frac{h_{p1} (\alpha\tau)_{eff} I(t) + U_{tT} T_a + h_T T_w}{U_{tT} + h_T} \quad (28)$$

در صورتی که معادله ۲۴ به فرم معادله ۲۹ بازنویسی شود:

$$\dot{m}_f c_f \frac{dT_f}{dx} dx - d\dot{q}_u dx = 0 \quad (29)$$

که برابر است با [19]:

$$\frac{dT_f}{dx} + \left(\frac{WU_L F'}{\dot{m} C_f}\right) (T_f - T_a) = \frac{WF' h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t)}{\dot{m} C_f} \quad (30)$$

برای صفحه پشتی پوسته محافظ مدول فتوولتائیک برای المان طولی $b dx$ برابر معادله ۲۰ است [16]:

$$U_{tT} = \left[\frac{1}{U_t} + \frac{1}{U_T}\right]^{-1} = \frac{U_t U_T}{U_T + U_t} \quad (16)$$

در صورتی که رابطه ۱۶ به فرم رابطه ۱۷ بازنویسی شود [26]:

$$h_T (T_{bs} - T_f) = \frac{h_T}{h_T + U_{tT}} h_{p1} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - \frac{h_T U_{tT}}{h_T + U_{tT}} (T_f - T_a) \quad (17)$$

رابطه ۱۷ نرخ انرژی حرارتی انتقال‌یافته از سطح پشتی پوسته محافظ به سیال در شرایطی است که در آن دمای سیال عامل، h_T ضریب انتقال حرارت صفحه پشتی پوسته محافظ به سیال و $h_{p2} = h_T (h_T + U_{tT})$ فاکتور جریمه [16, 19, 26, 30] به‌علت سطح مشترک بین پوسته محافظ و سیال است. U_{tw} ضریب کلی انتقال حرارت از شیشه به آب از طریق سلول خورشیدی و پوسته محافظ بوده که برابر است با [16, 26]:

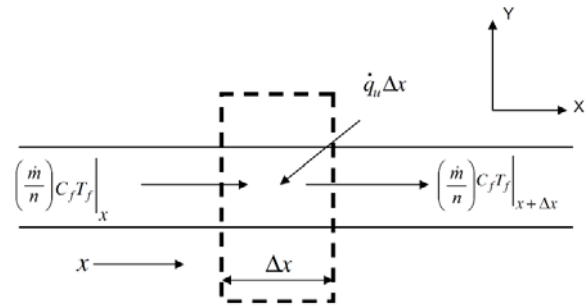
$$U_{tw} = \left[\frac{1}{h_T} + \frac{1}{U_{tT}}\right]^{-1} = \frac{h_T U_{tT}}{h_T + U_{tT}} \quad (18)$$

در نهایت معادله ۱۷، به‌صورت ۱۹ نوشته می‌شود [25]:

$$h_T (T_{bs} - T_f) = h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_{tw} (T_f - T_a) \quad (19)$$

با توجه به الگوی جریان در شکل ۶، معادله تعادل انرژی برای جریان آب زیر پوسته محافظ به‌صورت معادله ۲۰ حاصل می‌شود [27]:

$$h_T (T_{bs} - T_f) b dx = \dot{m}_f c_f \frac{dT_f}{dx} dx + U_b (T_f - T_a) b dx \quad (20)$$



شکل ۶ المان طولی Δx که نشان‌دهنده الگوی جریان آب زیر پوسته محافظ است [16, 26]

\dot{m}_f و C_f به‌ترتیب دبی جرمی و گرمای ویژه سیال و U_b ضریب کلی انتقال حرارت از زیر کلکتور به محیط است که برابر است با [16, 26]:

$$U_b = \left[\frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_i}\right]^{-1} \quad (21)$$

h_i ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سطح زیرین و محیط است. با توجه به رابطه ۲۷ با افزایش ضخامت عایق پشتی، ضریب اتلاف حرارت از زیر کلکتور PV/T به محیط کاهش یافته و در نتیجه راندمان حرارتی PV/T افزایش می‌یابد. با انتگرال‌گیری و مرتب‌سازی رابطه ۲۰ به‌دست می‌آید:

$$h_T = \frac{\dot{m}_f c_f (T_{f,out} - T_{f,in}) + U_b (T_f - T_a) b L}{(T_{bs} - T_f) b L} \quad (22)$$

h_T برابر ضریب انتقال حرارت از پشت مدول فتوولتائیک (صفحه

$$h_{fi} = Nu_{Di} \frac{k}{D_i} \quad (35)$$

است و در آن k هدایت حرارتی سیال داخل لوله در دمای میانگین ورودی و خروجی سیال است. همچنین عدد Nu_{Di} با توجه به عدد رینولدز جریان رینولدز برابر است با [32]:

$$Nu_{Di} = \begin{cases} 4.364 & Re < 2300 \\ 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4} & Re > 2300 \end{cases} \quad (36)$$

h_{ca} ضریب انتقال حرارت از مدول به صفحه جاذب است که برابر [7]:

$$h_{ca} = \left(\frac{LEVA}{KEVA} + \frac{L_{glue}}{K_{glue}} + \frac{L_{tedlar}}{K_{tedlar}} \right)^{-1} \quad (37)$$

است. ضریب هدایت اتصال C_b می‌تواند با آگاهی از ضریب هدایت گرمایی اتصال، k_b ، ضخامت متوسط اتصال γ و عرض اتصال b بر مبنای واحد طول به صورت معادله ۳۸ برآورد شود [9, 33]:

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (38)$$

از معادله ۲۵ انرژی مفید حرارتی کلکتور PV/T برای جریان سیال آب به صورت معادله ۳۹ به دست می‌آید [16, 19, 26, 27]:

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_L (T_{f,in} - T_a)] \quad (39)$$

راندان حرارتی لحظه‌ای کلکتور PV/T برای جریان سیال آب در حالت تئوری و تجربی با رابطه ۴۰ تعریف می‌شود [16, 19, 26, 27]:

$$\eta_{i,theo} = \frac{\dot{Q}_u(theo)}{A_c \times I(t)} = F_R [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} - U_L \frac{T_{f,in} - T_a}{I(t)}] \quad (40)$$

$$\eta_{i,exp} = \frac{\dot{Q}_u(exp)}{A_c \times I(t)} = \frac{m C_f (T_{f,out} - T_{f,in})}{A_c I(t)} \quad (41)$$

مدل سازی الکتریکی

توان الکتریکی خروجی مدول فتوولتائیک و کلکتور PV/T از رابطه ۴۲ به دست می‌آید [30]:

$$\dot{Q}_{u,el} = \tau_G \eta_{ec} \beta_c A_c I(t) \quad (42)$$

که در آن A_c مساحت کلکتور PV/T و η_{pv} بازده الکتریکی مدول فتوولتائیک به عنوان تابعی از دما است که توسط معادله ۴۳ حاصل می‌شود [16, 25, 26, 34]:

$$\eta_{el} = \eta_o [1 - \gamma (T_c - T_o)] \quad (43)$$

η_o و η_{el} به ترتیب راندان الکتریکی سلول خورشیدی و راندان مرجع مدول PV در دمای $298K^{-1}$ و تابش 1000 وات بر متر مربع است. γ ضریب دمای راندان سیلیکون، T_c دمای سلول و T_o دمای مرجع است. همچنین این مقادیر برای سیلیکون مونوکریستال از مراجع برابند با [13, 16, 30, 34]:

$$\eta_o = 0.12; T_o = 25^\circ C; \gamma = 0.0045 \text{ } ^\circ C^{-1} \quad (44)$$

با توجه به معادله ۴۴، راندان الکتریکی η_{el} با افزایش دمای مدول PV کاهش می‌یابد. یک کلکتور PV/T بدون پوشش، به علت دمای پایین سلول خورشیدی دارای راندان الکتریکی بالاتری نسبت به یک مدول فتوولتائیک ساده است. که علت آن، حذف انرژی حرارتی از مدول فتوولتائیک، توسط جریان سیال (هوآب) در زیر مدول فتوولتائیک است. راندان الکتریکی یک مدول فتوولتائیک به صورت دو معادله زیر تعریف می‌شود [30, 34]:

با انتگرال گیری از معادله ۳۰ در شرط اولیه $x = 0 \rightarrow T_f = T_{f,in}$ دمای خروجی سیال زیر پوسته محافظ را می‌توان به صورت رابطه ۳۱ نوشت [19, 25, 26, 30]:

$$T_{f,out} = T_f|_{x=L} = T_{f,in} \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{m C_f}\right) + \left(\frac{h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t)}{U_L} + T_a\right) \times \left(1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{m C_f}\right)\right) \quad (31)$$

که $A_c = bL = NWL$ مساحت کلکتور PV/T خورشیدی و N تعداد مجرا است. کمیتی که انرژی مفید دریافتی واقعی یک کلکتور را در حالی که کل سطح کلکتور در دمای ورودی سیال باشد به انرژی مفید دریافتی مرتبط کند ضریب تفکیک گرمایی کلکتور F_R نامیده می‌شود. که برابر است با [9, 31]:

$$F_R = \frac{m C_p (T_{fo} - T_{fi})}{A_c [h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_L (T_{fi} - T_a)]} = \frac{m C_f}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{m C_f}\right)\right] \quad (32)$$

زندگ و لاوان [31] نشان دادند که F_R برای لوله مارپیچی در کلکتور حرارتی به صورت عباراتی از سه پارامتر بی بعد، F_1 ، F_2 و F_3 تعیین می‌شود. با توجه به شکل ۷ ضریب تفکیک گرمایی F_R برای کلکتور PV/T از رابطه ۳۳ حاصل می‌شود [31]:

$$F_R = F_1 F_3 F_5 \left[\frac{2F_4}{F_6 \exp\left[-\sqrt{1 - F_2^2 / F_3}\right] + F_5} - 1 \right] \quad (33)$$

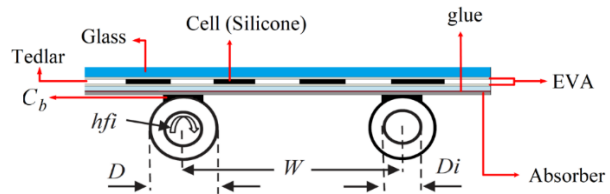
که در آن پارامترهای F_1 تا F_6 برابند با [31]:

$$F_1 = \frac{\kappa}{U_L W} \frac{\kappa R (1 + \gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}{[\kappa R (1 + \gamma) - 1]^2 - (\kappa R)^2}, F_2 = \frac{1}{\kappa R (1 + \gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}$$

$$F_3 = \frac{m C_f}{F_1 A_c U_L}, F_4 = \left(\frac{1 - F_2^2}{F_2^2}\right)^{1/2}, F_5 = \frac{1}{F_2} + F_4 - 1, F_6 = 1 - \frac{1}{F_2} + F_4$$

$$\kappa = \frac{[(K\delta + K_{si}\delta_{si})U_L]^{1/2}}{\sinh\left[(W - D)\left(\frac{U_L}{K\delta + K_{si}\delta_{si}}\right)^{1/2}\right]}, R = \frac{1}{h_{fi}\pi D_i} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{Wh_{ca}}$$

$$\gamma = -2 \cosh\left[(W - D)\left(\frac{U_L}{K\delta + K_{si}\delta_{si}}\right)^{1/2}\right] - \frac{DU_L}{\kappa}$$

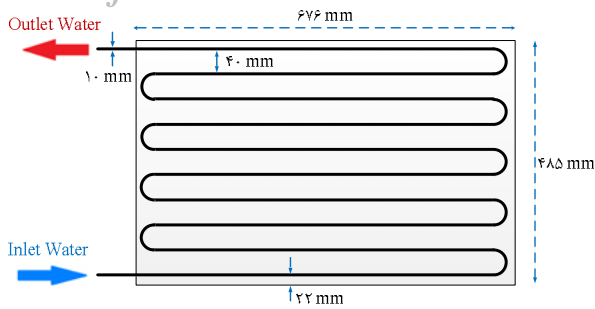


شکل ۷ نحوه اتصال لوله و صفحه جاذب

ضریب کارایی کلکتور F' برای لوله مارپیچی از رابطه ۳۲ به فرم معادله ۳۴ حاصل می‌شود [9]:

$$F' = -\frac{m C_f}{A_c U_L} \ln\left(1 - \frac{A_c U_L F_R}{m C_f}\right) \quad (34)$$

که D_i قطر داخلی لوله و h_{fi} ضریب انتقال حرارت بین سیال و دیواره لوله است که برابر [32]:



شکل ۱۰) طرح ساخت ورق و لوله نوع مارپیچی

آزمون تجربی کلکتور PV/T و مدول PV شاهد، توسط دستگاه آزمون کلکتورهای خورشیدی و در محل آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام شد. در این آزمایشگاه تجهیزات مختلفی برای اندازه‌گیری پارامترهایی مانند شدت تابش خورشید، دمای محیط و سرعت باد نیز وجود دارند. سیستم به‌کارگرفته‌شده در آزمایشگاه یک سیستم مدار باز- اجباری است. تجهیزات هواشناسی شامل پیرانومتر، دماسنج و بادسنج به‌منظور اندازه‌گیری میزان تشعشع، دمای محیط و سرعت باد به‌کار گرفته شد که همگی ساخت شرکت SolData؛ دانمارک هستند. دقت دماسنج برابر ± 0.5 درجه سانتی‌گراد است. پمپ مورد استفاده به‌منظور گردش سیال در سیستم از نوع Grundfos: UPS ۲۵-۶۰ است که به کمک یک روتامتر با دقت $1/6\%$ و توسط یک شیر میزان دبی سیال عبوری کنترل می‌شود. مقدار ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه تولیدی توسط PV/T و مدول PV به وسیله مولتی‌متر مدل VICTOR VC97 با دقت $\pm 1\%$ خوانده می‌شود. گرم‌کن‌های برقی که به‌منظور گرم کردن آب مخزن به‌کار گرفته می‌شوند، شامل دو عدد گرم‌کن ۲ کیلووات و یک عدد گرم‌کن ۱ کیلووات هستند و توسط یک کنترلر SSR تحت کنترل قرار دارند. مخزن مورد استفاده از نوع گالوانیزه و به ظرفیت ۵۰ لیتر است. به‌منظور کنترل دمای ورودی و خروجی کلکتور، از سنسورهای دما از نوع PT-۱۰۰ استفاده شده است که مشاهده دما به‌صورت دیجیتالی توسط کنترلر آتونیکس مدل PID TZN4S-14S صورت می‌گیرد. تجهیزات مورد استفاده برای آزمون در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. همچنین مشخصات مدول شاهد در جدول ۱ نشان داده شده است.

مشخصات ساخت کلکتور ترکیبی فتوولتائیک- حرارتی بدون پوشش با سیال عامل آب در جدول ۲ آمده است. پارامترهای طراحی کلکتور حرارتی واقع در زیر مدول فتوولتائیک در جدول ۳ آمده است.

اعتبارسنجی مدل‌سازی

به جهت اعتبارسنجی روابط به‌کاررفته برای کلکتور ترکیبی فتوولتائیک- حرارتی، نتایج حاصل از دمای آب خروجی و راندمان حرارتی پژوهش دبی و تایی [۱۷] با نتایج به‌دست‌آمده به کمک روابط این تحقیق، مقایسه می‌شود. مقایسه این نتایج در جدول ۴ و ۵ آمده است.

$$\eta_{em} = (\eta_{ec} \times \beta_c) \times 100 \quad (۴۵)$$

یا

$$\eta_{em} = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{sc} \times V_{oc}}{A_m \times I_p} = \frac{I_{max} \times V_{max}}{A_m \times I_p} \quad (۴۶)$$

که A_m مساحت مدول فتوولتائیک و I_p شدت تابش خورشیدی روی مدول فتوولتائیک است. فاکتور پرشدن با افزایش دمای مدول فتوولتائیک کاهش می‌یابد که خود یک اثر منفی محسوب می‌شود مقدار ماکزیمم فاکتور پرشدن سلول سیلیکونی برابر 0.88 است.

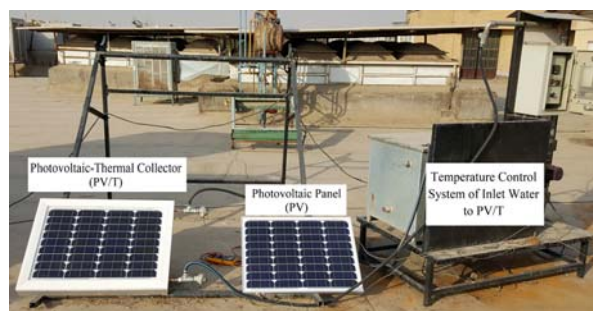
آزمون تجربی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی تئوری و همچنین مقایسه عملکرد مدول فتوولتائیک شاهد با کلکتور ترکیبی فتوولتائیک- حرارتی، دو عدد مدول فتوولتائیک ۳۶ سلولی خریداری شد که یکی از آنها به‌عنوان مدول فتوولتائیک شاهد و دیگری برای ساخت کلکتور ترکیبی فتوولتائیک- حرارتی بدون پوشش با سیال آب مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شد.

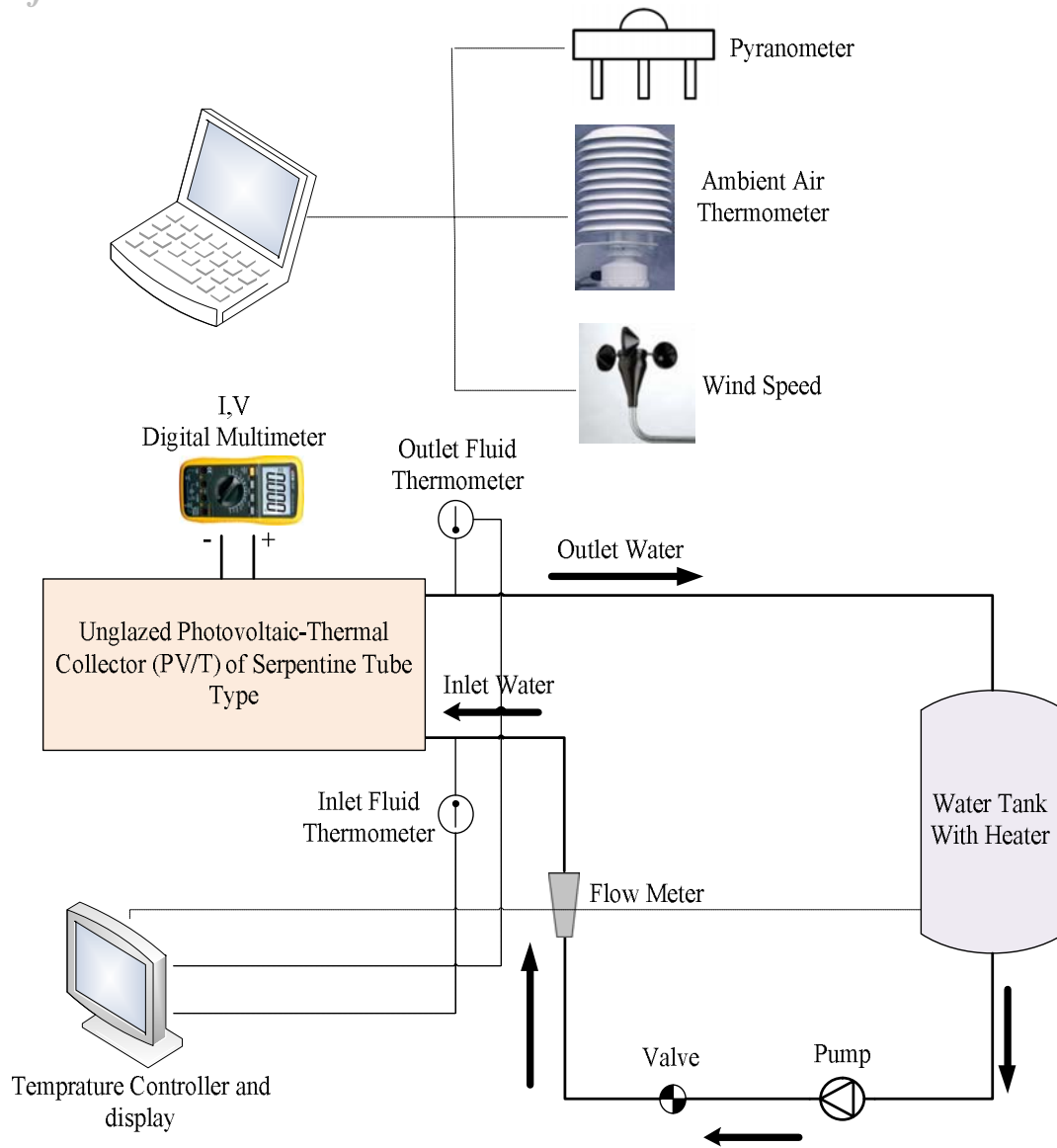


شکل ۸) جزئیات ساخت دستگاه کلکتور ترکیبی فتوولتائیک- حرارتی

همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است برای دفع حرارت به آب، یک لوله مسی که به‌صورت مارپیچی در آمده است به صفحه‌ای مسی جوش داده شد سپس این صفحه مسی با استفاده از چسب هل (H-L) به پشت مدول متصل شد. این مدول مطابق روشی که در شکل ۹ نشان داده شده است در مجاورت یک مدول فتوولتائیک ساده (بدون مسیر عبور آب در پشت آن) تحت آزمون قرار گرفت. شماتیک طراحی کلکتور حرارتی واقع در زیر مدول فتوولتائیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹) مدول فتوولتائیک و کلکتور فتوولتائیک- حرارتی تحت آزمون در آزمایشگاه خورشیدی دانشگاه تهران جنوب



شکل (۱) تجهیزات اندازه‌گیری مورد استفاده برای آزمون در آزمایشگاه خورشیدی

جدول (۱) مشخصات مدول فتوولتائیک شاهد ($AM = 1/5$, $T = 25^\circ C$, $STC = 1000 W/m^2$)

مقدار	واحد	نماد	شرح
۶۷۶	mm	L	طول مدول فتوولتائیک
۴۸۵	mm	b	عرض مدول فتوولتائیک
۴۰	W	P_{max}	توان بیشینه
۱۷/۹	V	V_{max}	ولتاژ توان بیشینه
۲/۲۳	A	I_{max}	جریان توان بیشینه
۲۲/۲	V	V_{oc}	ولتاژ مدار باز
۲/۳۹	A	I_{sc}	جریان اتصال کوتاه
۶۰۰	V	—	ولتاژ سیستمی حداکثری
۰/۷۵۶	—	β_c	فاکتور تراکم سلول خورشیدی
۰/۱۷	—	η_{ec}	راندمان سلول خورشیدی
۰/۱۲	—	η_o	راندمان مرجع مدول فتوولتائیک
۰/۷	—	FF	فاکتور پرشدن
۰/۰۰۴۵	$^\circ C^{-1}$	γ	ضریب دما

جدول ۲) پارامترهای طراحی کلکتور فتوولتائیک- حرارتی PV/T (زاویه PV نسبت به افق در شهر تهران برابر ۳۶ درجه (عرض جغرافیایی) بود)

مقدار	واحد	نماد	شرح
۰/۰۰۰۲۲۵	m	L_{Si}	ضخامت سلول (سیلیکون) ^[35]
۰/۰۰۲	m	L_G	ضخامت شیشه PV ^[13]
۰/۰۰۵	m	L_i	ضخامت عایق پشتی ^[27]
۰/۰۰۰۰۲	m	L_T	ضخامت پوسته محافظ ^[17]
۰/۰۰۱	m	L_{glue}	ضخامت چسب بین PV و صفحه جاذب
۰/۰۰۰۰۵	m	L_{EVA}	ضخامت EVA ^[35]
۱۴۸	W/mK	K_{Si}	هدایت حرارتی سلول (سیلیکون) ^[35]
۱/۱	W/mK	K_G	هدایت حرارتی شیشه PV ^[36]
۰/۰۴۲	W/mK	K_i	هدایت حرارتی عایق ^[17]
۰/۰۳۳	W/mK	K_T	هدایت حرارتی پوسته محافظ ^[26]
۰/۱	W/mK	K_{glue}	هدایت حرارتی چسب
۰/۳۵	W/mK	K_{EVA}	هدایت حرارتی EVA ^[35]
۰/۹	-	α_c	ضریب جذب سلول خورشیدی ^[26]
۰/۵	-	α_T	ضریب جذب پوسته محافظ ^[26]
۰/۰۹	-	η_c	راندمان سلول خورشیدی (تابعی از دمای سلول) ^[26]
۰/۹۵	-	τ_G	ضریب عبوردهی شیشه PV ^[26]
$5/7 + 3/8 V_w$	W/m ² K	h_o	ضریب انتقال حرارت (جابجایی و تشعشع) از شیشه به محیط ^[26]
$2/8 + 3/0 V_w$	W/m ² K	h_i	ضریب انتقال حرارت جابجایی از زیر کلکتور به محیط ^[18, 28]
۵۰۰	W/m ² K	h_T	ضریب انتقال حرارت صفحه پشتی پوسته محافظ به سیال ^[16]

جدول ۳) پارامترهای طراحی جاذب ورق- لوله نوع مارپیچی

مقدار	واحد	نماد	شرح
۰/۰۵	m	W	فاصله بین مراکز دو لوله
۹	-	N	تعداد قسمت‌ها
۰/۰۱	m	D	قطر خارجی لوله
۰/۰۰۷	m	D_i	قطر داخلی لوله
۰/۰۰۰۰۵	m	δ	ضخامت صفحه جاذب
۳۸۵	W/mK	K	هدایت حرارتی صفحه جاذب مسی
۴۱۹۵	J/Kg K	C_f	گرمای ویژه آب ^[26]
۱۰۰۰	W/m ² K	h_{fi}	ضریب انتقال حرارت داخل لوله برای لوله مارپیچی ^[26]
۰/۰۵	m	W	فاصله بین مراکز دو لوله
۹	-	N	تعداد قسمت‌ها
۰/۰۱	m	D	قطر خارجی لوله
۰/۰۰۷	m	D_i	قطر داخلی لوله
۰/۰۰۰۰۵	m	δ	ضخامت صفحه جاذب

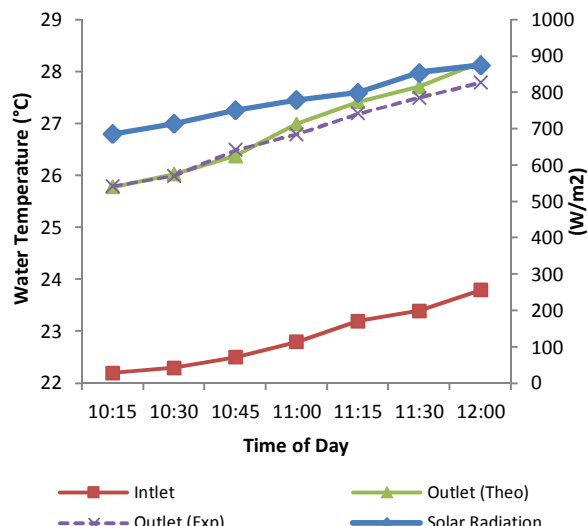
جدول ۴) مقایسه دمای آب خروجی مطالعه حاضر با پژوهش دابی و تای^[17]

خطا (%) $(X_{exp} - X_{[17]})/X_{exp} \times 100$	دمای آب خروجی (°C)		شرح
	مطالعه حاضر	دابی و تای ^[17]	
۰/۰۶	۳۱/۳۲	۳۱/۳۰	ساعت ۹:۰۰
۰/۰۶	۳۵/۲۸	۳۵/۲۶	ساعت ۱۰:۰۰
۰/۰۷	۴۰/۳۵	۴۰/۳۲	ساعت ۱۱:۰۰
۰/۰۹	۴۵/۲۰	۴۵/۱۶	ساعت ۱۲:۰۰

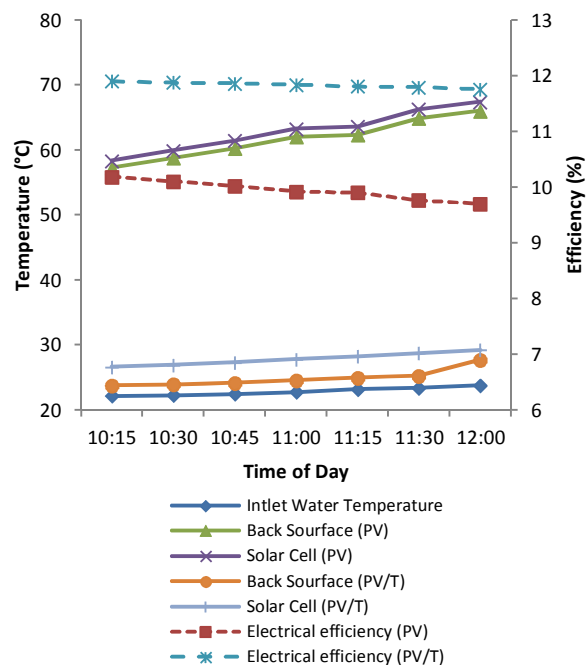
جدول ۵) مقایسه راندمان حرارتی مطالعه حاضر با پژوهش دابی و تای^[17]

خطا (%) $(X_{exp} - X_{[17]})/X_{exp} \times 100$	راندمان حرارتی (°C)		شرح
	مطالعه حاضر	دابی و تای ^[17]	
۰/۸۰	۴۹/۴۲	۴۹/۰۳	ساعت ۹:۰۰
۰/۶۸	۵۰/۰	۴۹/۶۶	ساعت ۱۰:۰۰
۰/۸۰	۵۰/۵۰	۵۰/۱۰	ساعت ۱۱:۰۰
۰/۰۲	۵۰/۱۲	۵۰/۱۱	ساعت ۱۲:۰۰

حداکثر در حدود ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. تغییر راندمان الکتریکی کلکتور PV/T و مدول PV شاهد براساس حل تئوری در نمودار ۲ نشان داده شده است. در سمت راست نمودار مقادیر راندمان حرارتی و الکتریکی و سمت چپ نمایانگر دمای آب ورودی، دمای سلول PV و دمای صفحه پشتی پوسته محافظ در کلکتور PV/T و مدول PV شاهد است.



نمودار ۱) مقایسه دمای آب خروجی در ساعات مختلف روز و در دبی ۳۰ لیتر بر ساعت



نمودار ۲) تغییر راندمان الکتریکی در ساعات مختلف روز و براساس حل تئوری

با توجه به نمودار ۲ در کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی با عبور جریان آب از زیر مدول فتوولتائیک، دمای صفحه پشتی پوسته محافظ و مدول فتوولتائیک خورشیدی نسبت به مدول فتوولتائیک شاهد به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. این کاهش دما

با توجه به جدول ۴ و ۵، خطای نتایج به‌دست‌آمده برای دمای آب خروجی و راندمان حرارتی کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی کمتر از ۱٪ است. بنابراین مدل حرارتی به‌کاررفته صحیح است. آنالیز عدم قطعیت می‌تواند به‌عنوان روشی مفید برای دستیابی به داده‌ها و نتایج منطقی برای یک آزمایش تجربی خاص در نظر گرفته شود. به‌طور کلی مطالعه عدم قطعیت به‌عنوان بهترین راه‌کار برای ارزیابی خطاهای آزمایشی پذیرفته شده است که باعث انحراف بین نتایج تجربی و مقادیر واقعی آن می‌شود. در این پژوهش، مطالعه عدم قطعیت برای تحلیل خطای راندمان حرارتی لحظه‌ای از تحقیق

مفاد [37] به کمک رابطه ۴۷ بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \eta_i}{\eta_i} = \left[\left(\frac{\partial \rho}{\rho} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_f}{C_f} \right)^2 + \left(\frac{\partial I(t)}{I(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{f,in}}{T_{f,in}} \right)^2 + \left(\frac{\partial T_{f,out}}{T_{f,out}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (47)$$

همچنین مقدار η_i در آزمایش دوم برای ساعت ۱۰:۳۰ به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\partial \rho}{\rho} = 0, \frac{\partial V}{V} = \pm 1.6\%, \frac{\partial C_f}{C_f} = 0, \frac{\partial I(t)}{I(t)} = \pm 2.5\%, \frac{\partial A}{A} = \pm 0.15\%, \frac{\partial T_{f,in}}{T_{f,in}} = \frac{0.5}{23.2}, \frac{\partial T_{f,out}}{T_{f,out}} = \frac{0.5}{26.2}$$

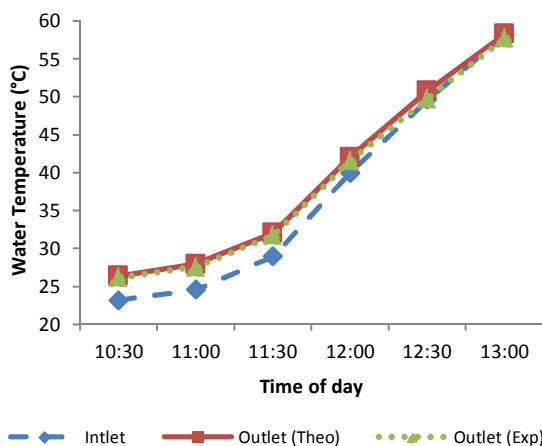
$$\frac{\partial \eta_i}{\eta_i} = \pm 4.1\%$$

این که تحقیق در محل دانشکده فنی دانشگاه تهران جنوب و در طی سه روز متوالی صورت پذیرفت؛ مدول فتوولتائیک شاهد و کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی بدون پوشش نوع مارپیچی با سیال آب تحت آزمون تجربی قرار گرفتند. سپس نتایج حاصل از آزمون تجربی مدول شاهد و کلکتور PV/T با حل تئوری آنها مقایسه شدند. نتایج حاصل از تحلیل تئوری مدول شاهد و کلکتور PV/T به کمک کدنویسی با نرم‌افزار متلب به‌دست آمده است. نرم‌افزار متلب مقادیر آب و هوایی و پارامترهای ورودی کاربر را پردازش و سپس نتایج آن را چاپ می‌کند.

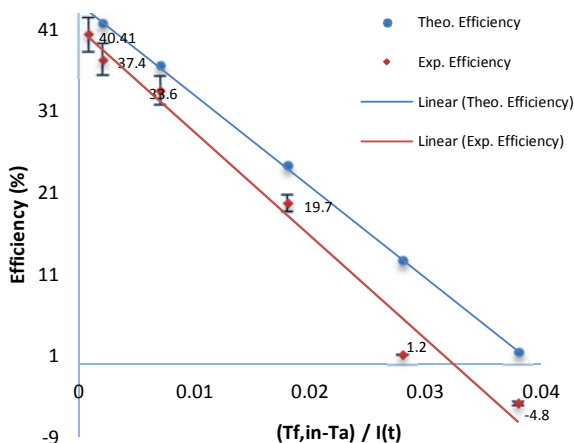
آزمایش اول در تاریخ ۳۰ اکتبر ۲۰۱۶ انجام گرفت که در آن آب با دبی ۳۰ لیتر بر ساعت از کلکتور PV/T عبور کرده و در زمان‌های مختلف مقادیر دمای آب خروجی، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز ثبت شد. نتایج حاصل از آزمایش اول در نمودار ۱ تا ۳ آمده است. در این آزمایش دمای محیط در حدود ۲۶/۴ درجه سانتی‌گراد است. همچنین با توجه به تغییر کم دمای آب ورودی، پارامتر تاثیرگذار تابش خورشیدی است. مقادیر تابش خورشیدی و همچنین دمای آب ورودی و مقدار آن در خروجی در حالت تئوری و آزمایشی بین ساعات ۱۰:۱۵ تا ۱۲:۰۰ در نمودار ۱ مقایسه شده است. سمت راست این نمودار مقادیر تابش و سمت چپ دما را نمایش می‌دهد. گراف پایینی نشان‌دهنده دمای آب ورودی در این فاصله زمانی است. برای اینکه کلکتور PV/T بتواند راندمان مثبتی داشته باشد لازم است تا دمای آب ورودی از دمای سطح سلول PV پایین‌تر باشد. با توجه به نتایج حاصل برای دمای آب خروجی در تحلیل تئوری و مقایسه آن با آزمون تجربی، دیده می‌شود که نتایج دارای انطباق خوبی با یکدیگر هستند. در این نمودار دمای آب خروجی

داده شده است. در این آزمایش دمای محیط از ۲۲/۶ تا ۲۳/۵ درجه سانتی‌گراد و تابش خورشیدی از مقدار ۸۰۶ تا ۹۰۰ وات بر مترمربع بین ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۳:۰۰ تغییر پذیرفته است. نتایج مقایسه دمای آب خروجی برای دبی حجمی ۳۰ لیتر بر ساعت و سرعت باد ۳ متر بر ثانیه را نمودار ۴ نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار مقادیر دمای آب در خروجی کاملاً بر هم منطبق بوده و مدل‌سازی به‌کاررفته دارای حداقل خطا است. همچنین از روابط مشخص است که با افزایش دمای آب ورودی راندمان حرارتی کلکتور PV/T در جایگاه پایین‌تری قرار می‌گیرد در نتیجه در دماهای بالاتر ورودی، اختلاف دمای آب در ورودی و خروجی از کلکتور PV/T کمتر است.

راندمان حرارتی برحسب پارامتر $T_{f,in} - T_a/I(t)$ را برای شرایط آزمون و حل تئوری، نمودار ۵ نشان می‌دهد. همچنین محدوده خطای اندازه‌گیری برای آزمون تجربی مشخص است. همان‌گونه که از نمودار ۵ مشخص است با افزایش پارامتر $T_{f,in} - T_a/I(t)$ در محور افقی، بازده حرارتی کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که برای دستیابی به حداکثر بازده ممکن برای کلکتور PV/T حتی الامکان باید دمای آب ورودی کلکتور PV/T نزدیک به دمای محیط باشد، چرا که با افزایش دمای آب ورودی، بازده کاهش می‌یابد.

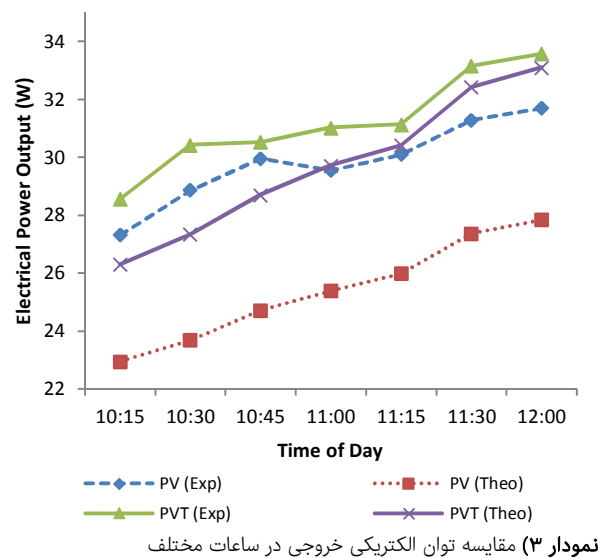


نمودار ۴) مقایسه دمای آب در ساعات مختلف روز در دبی ۳۰ لیتر بر ساعت و سرعت باد ۳ متر بر ثانیه



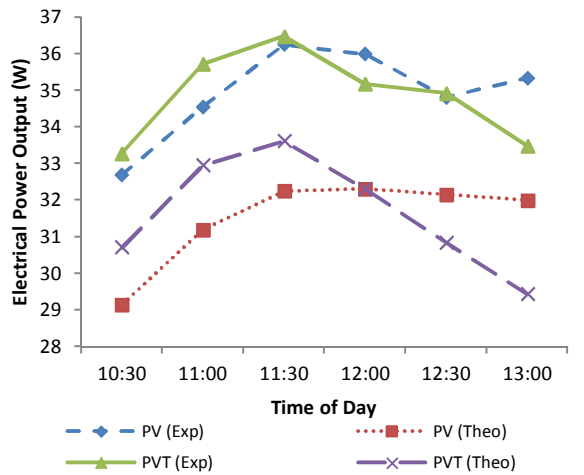
نمودار ۵) بازده حرارتی لحظه‌ای مدل تئوری و تجربی با دبی ۳۰ لیتر بر ساعت

همان‌طور که در نمودار ۳ نشان داده شده است، سبب افزایش راندمان الکتریکی خروجی کلکتور PV/T نسبت به مدول PV شاهد شده است. در این آزمایش دمای هوا در بین ساعت ۱۰:۱۵ تا ۱۲:۰۰ دارای اختلاف ناچیزی است اما میزان تابش خورشیدی حدود ۲۰۰ وات بر مترمربع افزایش داشته است همچنین با افزایش اندک دمای آب ورودی راندمان الکتریکی کلکتور PV/T مقداری کاهش یافته است. همین راندمان در مدول PV شاهد به دلیل افزایش دمای سطح مدول بیشتر شده است. با نگاهی به نمودار ۲ می‌توان دریافت که راندمان الکتریکی کلکتور PV/T در مقایسه با مدول PV شاهد حداکثر ۶٪ افزایش داشته است.



توان الکتریکی خروجی در کلکتور PV/T نسبت به مدول PV شاهد در دو حالت آزمایشی و تئوری در نمودار ۳ بررسی شده است. در این نمودار توان الکتریکی خروجی در آزمون تجربی مقادیر بالاتری را نسبت به حل تئوری به خود اختصاص داده‌اند. از آنجایی که هر دو مدول PV مورد استفاده در آزمون یکسان بوده و آزمون تجربی کلکتور PV/T و مدول PV شاهد در شرایط یکسان و همزمان صورت گرفته است مشاهده می‌شود که اختلاف مقادیر توان الکتریکی خروجی برای کلکتور PV/T در دو حالت تئوری و آزمایشی نسبت به مدول PV شاهد دارای خطای کمتری است. این اختلاف می‌تواند مربوط به دمای بالاتر صفحه مدول PV شاهد نسبت به کلکتور PV/T باشد.

آزمایش دوم در روز بعد و در تاریخ ۳۱ اکتبر ۲۰۱۶ بین ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۳:۰۰ انجام شد که در آن آب با دبی ۳۰ لیتر بر ساعت از کلکتور PV/T عبور کرده و سپس در خروجی وارد مخزن ذخیره می‌شود و دمای آن را بالا می‌برد اما به دلیل آنکه مخزن عایق نیست، اختلاف دمای آب مخزن در شروع تا پایان آزمون افزایش دمای اندکی دارد. بنابراین توسط هیترهای موجود در کف مخزن ذخیره، آب ورودی تا دمای مورد نظر گرم می‌شود. نتایج حاصل از آزمون و تحلیل تئوری دمای کلکتور PV/T و مدول فتوولتائیک در نمودار ۴ تا ۷ نشان

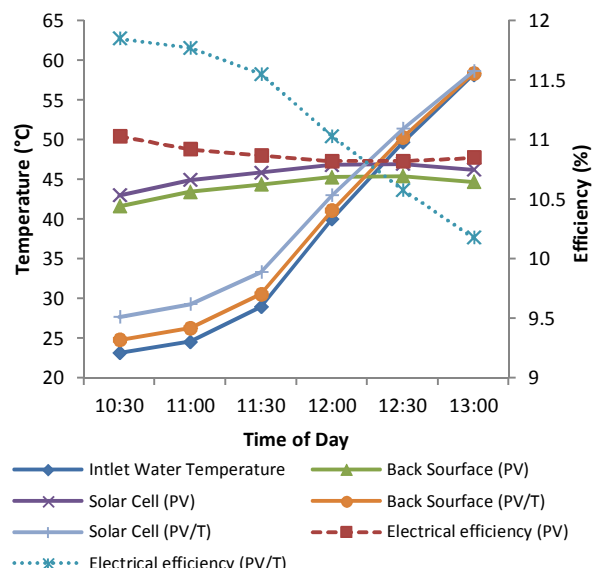


نمودار ۷) مقایسه توان الکتریکی خروجی در ساعات مختلف

آزمایش سوم در تاریخ ۱ نوامبر ۲۰۱۶ در بین ساعت ۱۱:۱۵ تا ۱۳:۳۰ انجام گرفت. در این آزمایش دبی سیال ورودی به PV/T در هر دوره افزایش یافته و مقادیر دمای آب خروجی، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز ثبت شده و با جواب حاصل از تحلیل تئوری مقایسه شده است. در این آزمایش دمای محیط از ۲۶/۲ تا ۲۷/۸ درجه سانتیگراد و تابش خورشیدی از مقدار ۸۲۸ تا ۷۲۳ وات بر مترمربع بین ساعت ۱۱:۱۵ تا ۱۳:۳۰ تغییر پذیرفته است. نتایج این آزمایش در نمودار ۸ تا ۱۰ آمده است. همان طور که از نمودار ۸ و ۹ مشخص است، افزایش دبی سیال موجب کاهش دمای آب در خروجی کلکتور PV/T می‌شود. در سمت راست نمودار ۸ مقادیر دبی عبوری از کلکتور PV/T و در سمت چپ دمای آب ورودی و همچنین دمای آب در خروجی کلکتور PV/T در حالت تئوری و تجربی نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است در صورتی که دمای آب ورودی، دمای محیط و تابش تغییر چشمگیری نداشته باشد با افزایش دبی، دمای آب در خروجی کاهش پیدا می‌کند. همچنین مقادیر این دما در حالت تئوری و تجربی دارای انطباق خوبی است. این روند کاهش دما برای کلکتور PV/T تحت آزمایش تا دبی ۵۰ لیتر بر ساعت شیب زیادی داشته و پس از آن با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد.

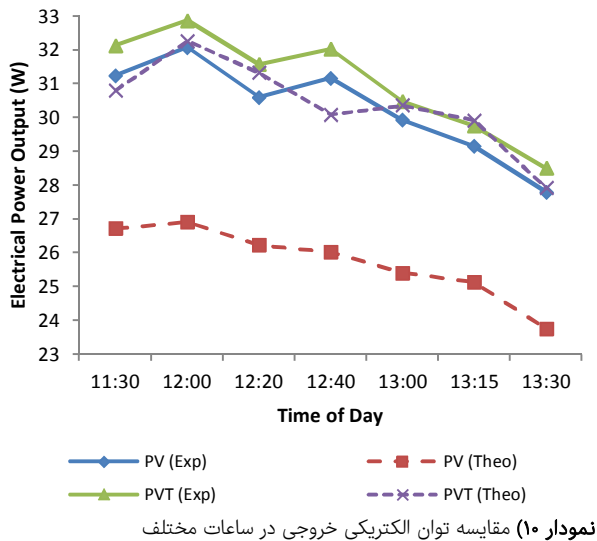
راندمان الکتریکی مدول PV شاهد و کلکتور PV/T را در حالت حل تئوری در نمودار ۹ نشان داده شده است. سمت راست این نمودار مقادیر راندمان الکتریکی خروجی و در سمت چپ مقادیر دمای آب در ورودی، دمای صفحه پشتی پوسته محافظ و دمای سلول PV را برای مدول PV شاهد و کلکتور PV/T نشان می‌دهد. مطابق با نمودار ۹ دمای محیط از ساعت ۱۱:۱۵ تا ۱۳:۳۰ حدود ۱/۶ درجه سانتیگراد افزایش و دمای آب ورودی به میزان ۳/۷ درجه سانتیگراد کاهش داشته است. تاثیر این عوامل و افزایش دبی ورودی سبب کاهش دمای سلول PV و صفحه پشتی پوسته محافظ در کلکتور PV/T شده است. منتها چون در این محدوده زمانی اختلاف دمای سلول PV در کلکتور PV/T حدود ۱۰ درجه سانتیگراد است؛ بنابراین افزایش راندمان الکتریکی مدول PV ناچیز و در حدود

تغییر راندمان الکتریکی کلکتور PV/T و مدول PV شاهد را براساس حل تئوری در نمودار ۶ نمایش داده شده است. سمت راست این نمودار مقادیر راندمان خروجی و در سمت چپ مقادیر دمای آب در ورودی، دمای صفحه پشتی پوسته محافظ و دمای سلول PV را نشان می‌دهد. در این نمودار به کمک هیترهای موجود در کف مخزن ذخیره دمای آب ورودی در بین ساعات ۱۰:۳۰ تا ۱۳:۰۰ از مقدار ۲۳ تا ۵۸ درجه سانتیگراد افزایش داده شده است. بنابراین همان طور که پیش بینی می‌شد دمای سطح سلول PV و دمای سطح صفحه پشتی پوسته محافظ بالا رفته و راندمان الکتریکی کلکتور PV/T روند کاهشی دارد. شیب این کاهش راندمان الکتریکی نسبت به نمودار ۲ بیشتر است. این نکته حایز اهمیت است که به علت مقاومت حرارتی پوسته محافظ و دفع حرارت به سیال ورودی، دمای سطح سلول PV از دمای صفحه پشتی پوسته محافظ بیشتر شده است. راندمان مدول PV در بین ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۳:۰۰ روند تقریباً یکنواختی داشته است و مقدار حداقل آن در هنگام ظهر و در ساعت حدود ۱۲:۱۵ است. به علت افزایش دمای آب ورودی راندمان کلکتور PV/T از ساعت ۱۰:۳۰ تا حدود ۱۲:۱۵ راندمان الکتریکی کلکتور PV/T از راندمان مدول PV شاهد بالاتر است که این مقدار با افزایش بیشتر دمای آب ورودی سبب کاهش راندمان کلکتور PV/T نسبت به مدول PV در ساعت ۱۲:۱۵ تا ۱۳:۰۰ شده است.



نمودار ۶) تغییر راندمان الکتریکی در ساعات مختلف روز براساس حل تئوری

توان الکتریکی خروجی کلکتور PV/T و مدول PV شاهد در دو حالت آزمون تجربی و تحلیل تئوری در نمودار ۷ با یکدیگر مقایسه شده است. در این نمودار توان الکتریکی خروجی کلکتور PV/T در حالت تئوری و تجربی در بین ساعت ۱۰:۳۰ تا ۱۱:۳۰ روند افزایشی دارد اما با افزایش بیشتر دمای آب ورودی این مقدار در بین ساعت ۱۱:۳۰ تا ۱۳:۰۰ روند کاهشی پیدا کرده است. مشابه این نتیجه برای مدول PV شاهد به دست آمده است.



با در نظر گرفتن نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق استفاده از کلکتور PV/T به جای PV مجزا مقرون به صرفه است. چرا که در عمل از چندین کلکتور PV/T با مساحت بزرگ‌تر که به شکل سری یا موازی به یکدیگر اتصال یافته‌اند در مصارف صنعتی یا خانگی استفاده می‌شود. در صورتی که برای حصول همین مقدار توان الکتریکی تعداد بیشتری مدول PV مجزا نیاز است. این در حالی است که حرارتی جهت مصرف تولید نشده است.

نتیجه‌گیری

کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی از یکپارچه‌سازی مدول فتوولتائیک و کلکتور حرارتی ساخته می‌شود. این عمل سبب خنک‌کاری بهتر مدول فتوولتائیک، استفاده از حرارت تولیدشده توسط مدول و افزایش انرژی خروجی دستگاه می‌شود. در این مطالعه، توسط مدل‌های تحلیلی و آزمایشگاهی ارایه‌شده به بررسی عوامل موثر بر بازده سیستم‌های فتوولتائیک-حرارتی از لحاظ قانون اول ترمودینامیک پرداخته شده است. به این منظور کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی برای سیال آب و مدول فتوولتائیک با جزئیات کامل شبیه‌سازی ریاضی شد. در ادامه داده‌های ورودی با نرم‌افزار متلب تحلیل و نتایج به‌دست‌آمده با آزمون تجربی کلکتور PV/T و مدول PV مقایسه شده است. همچنین برخی از روابط موجود در تحقیقات پیشین اصلاح شده است تا نتیجه مطلوب حاصل شود. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق این نتیجه‌گیری‌ها به‌دست آمد:

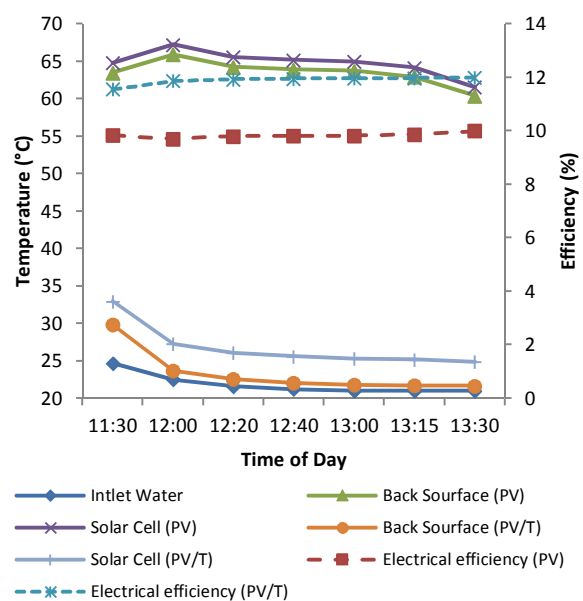
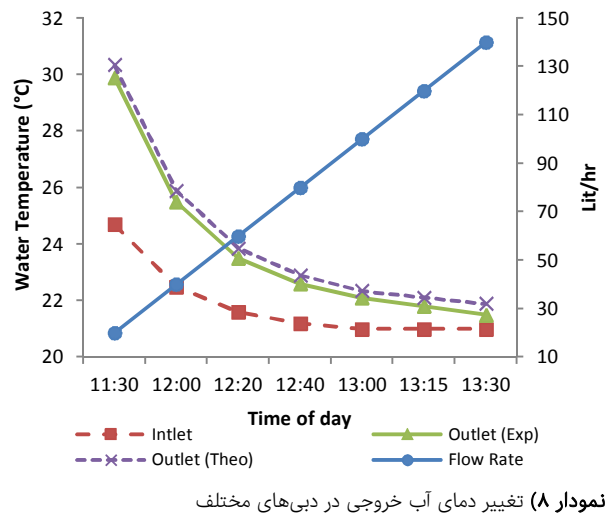
۱- مقادیر حاصل از آزمایش تجربی و تحلیل تئوری در ساعات مختلف روز انطباق خوبی داشته و در نتیجه مدل حرارتی به کار رفته صحیح است.

۲- با گردش سیال آب از زیر مدول فتوولتائیک دمای آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. کاهش دمای مذکور باعث افزایش راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک می‌شود.

۳- راندمان الکتریکی کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی در مقایسه

۵٪ است. مدول PV شاهد نیز از همین قانون پیروی کرده و میزان راندمان خروجی آن در این فاصله زمانی تقریباً ثابت است. بنابراین با توجه به مطالب گفته‌شده تغییر اندک در دمای محیط می‌تواند تاثیر به‌سزایی در راندمان الکتریکی خروجی مدول PV داشته باشد.

توان الکتریکی خروجی مدول PV شاهد و کلکتور PV/T در حل تئوری و تجربی با یکدیگر در نمودار ۱۰ مقایسه شده‌اند. با توجه به شکل اختلاف مقادیر توان الکتریکی خروجی در آزمون و حل تئوری برای کلکتور PV/T اندک اما برای مدول PV شاهد زیاد است. در این شکل توان الکتریکی خروجی در مدول PV شاهد و کلکتور PV/T روندی کاهشی دارد. علت آن به معادله ۴۲ مربوط است یعنی تغییر ناچیز راندمان الکتریکی و اُفت تابش خورشیدی در بین این فاصله زمانی سبب کاهش توان الکتریکی خروجی در مدول PV می‌شود. اما نکته مهم در این شکل راندمان الکتریکی بالاتر کلکتور PV/T در مقایسه با مدول PV شاهد است.



هدایت حرارتی (W/mK)	<i>K</i>
هدایت حرارتی سیال (W/mK)	<i>k</i>
ضخامت / طول کلکتور PV/T (m)	<i>L</i>
نرخ جریان سیال (kg/s)	<i>m</i>
تعداد قسمت‌ها	<i>N</i>
توان (W)	<i>P</i>
نرخ انتقال حرارت (W)	<i>q</i>
انرژی مفید (W)	<i>Q</i>
عدد رینولدز	<i>Re</i>
دما (K)	<i>T</i>
ضریب افت حرارت کلی (W/m ² K)	<i>U</i>
سرعت جریان هوا (m/s)	<i>V</i>
فاصله بین مراکز دو لوله (m)	<i>W</i>
خطا (%)	<i>X</i>
المان دیفرانسیلی در جهت طولی (m)	<i>x</i>
دبی حجمی (m ³ /s)	<i>ψ</i>
چگالی (kgm ⁻³)	<i>ρ</i>
ضریب جذب	<i>α</i>
فاکتور تراکم سلول خورشیدی	<i>β</i>
ضخامت صفحه (m)	<i>δ</i>
ضریب عبوردهی	<i>τ</i>
راندمان	<i>η</i>
ضریب دما (°C ⁻¹)	<i>γ</i>
مقدار متوسط	<i>ave</i>
اتصال	<i>b</i>
سلول / جابجایی	<i>c</i>
موثر	<i>eff</i>
الکتریکی	<i>el</i>
الکتریکی مدول فتوولتائیک	<i>em</i>
آزمون تجربی	<i>exp</i>
جریان سیال	<i>f</i>
سیال داخل لوله	<i>fi</i>
شیشه	<i>G</i>
چسب	<i>glue</i>
از پایین / داخل لوله	<i>i</i>
ورودی	<i>in</i>
کل PV/T	<i>L</i>
حداکثر	<i>max</i>
مرجع / از بالا / خارجی لوله	<i>O</i>
مدار باز	<i>Oc</i>
خروجی	<i>out</i>
حذف حرارت / مدول	<i>p</i>
مطالعه حاضر	<i>pre</i>
فتوولتائیک-حرارتی	<i>pv/t</i>
هوا	<i>air</i>
تشعشع	<i>r</i>
اتصال کوتاه	<i>sc</i>
سیلیکون	<i>si</i>
آسمان	<i>sky</i>
بالا	<i>t</i>
پوسته محافظ (دلار)	<i>T</i>
حرارتی	<i>th</i>
تئوری	<i>theo</i>
مفید	<i>u</i>
باد / سیال آب	<i>w</i>
محیط	<i>a</i>

علایم یونانی

زیرنویس‌ها

با مدول فتوولتائیک شاهد در حدود ۶٪ و دمای آب خروجی در کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی بدون پوشش با سیال آب حداکثر ۵درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که این نتایج با توجه به دست‌سازبودن PV/T و تاب‌برداشتن صفحه در هنگام جوش بین صفحه و لوله رضایت بخش است.

۴- هر چه میزان ضریب انتقال حرارت از صفحه پشتی پوسته محافظ به سیال بیشتر باشد نحوه ساخت کلکتور PV/T بهتر بوده و راندمان حرارتی و الکتریکی آن افزایش می‌یابد.

۵- در صورتی که نرخ جریان آب صفر باشد، دمای مدول فتوولتائیک در کلکتور PV/T به میزان زیادی افزایش می‌یابد که این خود نشان‌دهنده لزوم گردش سیال در کلکتور ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی است.

۶- برای دست‌یابی به حداکثر بازده ممکن برای یک کلکتور PV/T حتی‌الامکان باید دمای آب ورودی به دمای هوای محیط نزدیک باشد، چرا که با افزایش دمای آب ورودی، بازده حرارتی و الکتریکی کاهش می‌یابد.

۷- ضخامت و جنس عایق از دیگر عوامل تاثیرگذار بر بازده کلکتور PV/T هستند. بدیهی است با افزایش ضخامت عایق، اتلاف حرارتی از زیر کلکتور PV/T کاهش یافته و راندمان حرارتی افزایش می‌یابد. ۸- در این تحقیق از لوله و صفحه جاذب با جنس مس و ضخامت پایین در ساخت دستگاه استفاده شد که این خود موجب افزایش هزینه و تاب‌برداشتن صفحه در هنگام جوش کاری شد. بنابراین بهتر است که از صفحه و لوله با جنس آلومینیوم در ساخت دستگاه PV/T استفاده شود و به جهت جلوگیری از تاب صفحه، ضخامت صفحه جاذب بیشتر باشد.

۹- به‌کارگیری طرح ورق-لوله مارپیچی در زیر مدول خورشیدی به‌منظور دفع حرارت از کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک-حرارتی، از جمله کارآمدترین ایده‌ها بوده که دارای بازدهی بالا و سادگی در ساخت است. همچنین می‌توان از لوله‌های عبور سیال در جنس و شکل‌های مختلف مانند مدل‌های موازی، حلقوی، نوسانی و غیره، با فواصل و قطرهای متفاوت، لوله با سطح مقطع مربعی و مستطیلی بهره برد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

سهم نویسندگان: سیدامیر به‌مونس (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪)؛ فرزاد جعفر کاظمی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی (۵۰٪).

منابع مالی: موردی توسط نویسندگان ذکر نشد.

فهرست علایم

<i>A</i>	مساحت (m)
<i>b</i>	عرض کلکتور PV/T (m)
<i>C</i>	گرمای ویژه سیال (J/KgK)
<i>D</i>	قطر لوله (m)
<i>h</i>	ضریب انتقال حرارت (W/m ² K)
<i>I</i>	تابش خورشیدی (W/m ²)

- 19- Sobhnamayan F, Sarhaddi F, Alavi MA, Farahat S, Yazdanpanahi J. Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept. *Renewable Energy*. 2014;68:356-365.
- 20- Fudholi A, Sopian K, Yazdi MH, Ruslan MH, Ibrahim A, Kazem HA. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors. *Energy conversion and management*. 2014;78:641-651.
- 21- Ben Cheikh El Hocine H, Touafek K, Kerrou F. Theoretical and experimental studies of a new configuration of photovoltaic-thermal collector. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2017;139(2):021012.
- 22- Kazemian A, Hosseinzadeh M, Sardarabadi M, Passandideh-Fard M. Effect of glass cover and working fluid on the performance of photovoltaic thermal (PVT) system: An experimental study. *Solar Energy*. 2018;173:1002-1010.
- 23- Singh I, Singh D, Singh M. Thermal modeling and performance evaluation of photovoltaic thermal (PV/T) systems: A parametric study. *International Journal of Green Energy*. 2019;16(6):483-489.
- 24- Kazem HA. Evaluation and analysis of water-based photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019;13:100401.
- 25- Agrawal B, Tiwari GN. *Building integrated photovoltaic thermal systems: For sustainable developments (RSC Energy Series)*. London: Royal Society of Chemistry; 2010.
- 26- Tiwari A, Sodha MS. Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: A parametric study. *Renewable Energy*. 2006;31(15):2460-2474.
- 27- Tiwari A, Sodha MS. Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2007;91(1):17-28.
- 28- Sarhaddi F, Farahat S, Ajam H, Behzadmehr A. Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Energy and Buildings*. 2010;42(11):2184-2199.
- 29- Ji J, Han J, Chow TT, Han C, Lu J, He W. Effect of flow channel dimensions on the performance of a box-frame photovoltaic/thermal collector. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*. 2006;220(7):681-688.
- 30- Tiwari GN, Dubey S. *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications*. London: Royal Society of Chemistry; 2010.
- 31- Zhang HF, Lavan Z. Thermal performance of a serpentine absorber plate. *Solar Energy*. 1985;34(2):175-177.
- 32- Bejan A. *Convection heat transfer*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2013.
- 33- Othman MY, Hamid SA, Tabook MAS, Sopian K, Roslan MH, Ibarahim Z. Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study. *Renewable Energy*. 2016;86:716-722.
- 34- Kalogirou SA. *Solar energy engineering: Processes and systems*. Cambridge: Academic Press; 2009.
- 35- Armstrong S, Hurley WG. A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2010;30(11-12):1488-1495.
- 36- Dubey S, Sandhu GS, Tiwari GN. Analytical expression for electrical efficiency of PV/T hybrid air collector. *Applied Energy*. 2009;86(5):697-705.
- 37- Moffat RJ. Using uncertainty analysis in the planning of an experiment. *Journal of Fluids Engineering*. 1985;107(2):173-178.
- 1- Kim JH, Kim JT. The experimental performance of an unglazed PVT collector with two different absorber types. *International Journal of Photoenergy*. 2012;2012:312168.
- 2- Wilson E. Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions. *Renewable Energy*. 2009;34(6):1655-1660.
- 3- Tripanagnostopoulos Y, Nousia Th, Souliotis M, Yianoulis P. Hybrid photovoltaic/thermal solar systems. *Solar Energy*. 2002;72(3):217-234.
- 4- Prakash J. Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water. *Energy Conversion and Management*. 1994;35(11):967-972.
- 5- Huang BJ, Lin TH, Hung WC, Sun FS. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems. *Solar Energy*. 2001;70(5):443-448.
- 6- Dubey S, Tiwari GN. Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater. *Solar Energy*. 2008;82(7):602-612.
- 7- Zondag HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC, van Steenhoven AA. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*. 2003;74(3):253-269.
- 8- Bergene T, Løvvik OM. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*. 1995;55(6):453-462.
- 9- Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2006.
- 10- Ji J, Lu JP, Chow TT, He W, Pei G. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy*. 2007;84(2):222-237.
- 11- Sandnes B, Rekstad J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate, Experimental study and analytical model. *Solar Energy*. 2002;72(1):63-73.
- 12- Hottel H, Whillier A. Evaluation of flat-plate solar collector performance. *SERI Photovoltaics and Insolation Measurements Workshop*, 30 June 1985, Bellingham, United States. Bellingham: WA; International Society for Optical Engineering; 1955.
- 13- Zondag HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC, van Steenhoven AA. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector. *Solar Energy*. 2002;72(2):113-128.
- 14- Chow TT, He W, Chan ALS, Fong KF, Lin Z, Ji J. Computer modeling and experimental validation of a building-integrated photovoltaic and water heating system. *Applied Thermal Engineering*. 2008;28(11-12):1356-1364.
- 15- Chow TT, Pei G, Fong KF, Lin Z, Chan ALS, Ji J. Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover. *Applied Energy*. 2009;86(3):310-316.
- 16- Tiwari A, Sodha MS. Performance evaluation of solar PV/T system: An experimental validation. *Solar Energy*. 2006;80(7):751-759.
- 17- Dubey S, Tay AAO. Testing of two different types of photovoltaic-thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions. *Energy for Sustainable Development*. 2013;17(1):1-12.
- 18- Sarhaddi F, Farahat S, Ajam H, Behzadmehr A, Adeli MM. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Applied Energy*. 2010;87(7):2328-2339.