

Experimental Investigation of the Use of Thermoelectric on a Photovoltaic/Thermal System to Increase Efficiency and Heat Transfer

Payam Golmohammadpour, Arezoo karimabadi, Amir mohammad Jadidi*

Department of Energy, Faculty of New Sciences and Technologies, Semnan University, Semnan, Iran.
Department of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran.

ABSTRACT: Rising global energy costs and environmental concerns highlight the importance of renewable energies, especially solar energy. Photovoltaic/thermal systems that simultaneously generate electricity and heat offer an efficient solution. This study investigates the performance of a stand-alone system and its combination with a thermoelectric generator unit, heat well, and fan under the climatic conditions of Semnan, Iran, at mass flow rates of 100, 200, and 300 cm³/min. The results showed that the maximum power output for the stand-alone system was approximately 78.2 W, 78.7 W, and 78.9 W at the respective flow rates. With the thermoelectric generator unit, the maximum power was 79.1 W, 81.7 W, and 84.4 W, respectively. The highest thermal efficiency for the stand-alone system was 31.9% at 100 cm³/min, while the maximum electrical efficiency was 14.1% at 300 cm³/min. The integrated system achieved efficiencies of 27.3% (thermal) and 14. % (electrical). Furthermore, the Nusselt number shows an average improvement of 28. % in flow rates compared to the stand-alone system. This increase in efficiency and heat transfer highlights a promising future for these systems in providing simultaneous power and heating for buildings and commercial applications.

Review History:

Received: Aug. 11, 2025
Revised: Sep. 29, 2025
Accepted: Oct. 12, 2025
Available Online: Oct. 14, 2025

Keywords:

Photovoltaic/Thermal (PV/T) System
Thermoelectric (TEG) Module
Electrical and Thermal Efficiency
Heat transfer
Solar Energy

1- Introduction

Burning fossil fuels contributes significantly to global warming and climate change, which necessitates a shift towards cleaner energy sources to reduce greenhouse gas emissions. As a result, renewable energy sources have grown significantly, and solar energy has emerged as a widespread and accessible option. Solar energy is considered one of the most powerful energy sources in the world due to its vast potential and easy availability [1]. Solar energy is one of the most widely used renewable energy sources because it is abundant and easy to use. One of the most popular ways to use this energy is to convert it into two different forms: heat and electricity [2]. Solar photovoltaic systems can be used, which use photovoltaics to directly convert solar energy into electricity. As it can achieve silent operation, cheap maintenance, and pollution-free energy, this effect is considered as one of the most acceptable responses to the demand for electrical energy and clean energy [3].

New methods for combining solar systems and thermoelectric technologies are being developed. These techniques include heating photovoltaic/thermoelectric systems with concentrated or decentralized solar radiation, which allows the thermoelectric units to produce more electrical energy and increase the efficiency of the solar

photovoltaic panel due to the temperature drop [4].

2- Methodology

2- 1- Governing equations

Governing equations are essential for evaluating the system efficiency and measuring various parameters. Equation (1) is used to calculate the thermal efficiency [5].

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_p(T_{f,o} - T_{f,i})}{G \times A_c} \quad (1)$$

The following equation is used to calculate electrical efficiency [6].

$$\eta_{el} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{G \times A_c} \quad (2)$$

2- 2- Research method and geometry

This research integrated a monocrystalline photovoltaic (PV) panel with an innovative system for both heat recovery and power generation. The core of the system is a copper

*Corresponding author's email: am.jadidi@semnan.ac.ir



Fig. 1. Photovoltaic/thermal laboratory system with thermoelectric generators, heat sink, and fan.

plate welded to a thin spiral channel network on the back of the panel, designed to absorb heat, cool the panel, and facilitate fluid flow. To boost heat transfer, a coating of graphene nanoparticles mixed with black dye was applied. Additionally, six Thermoelectric Generator (TEG) units were installed to convert the panel's waste heat into extra electricity, thus improving overall efficiency. To optimize the TEG performance and enhance cooling, each TEG unit was backed by a heat sink and a fan, which provided forced airflow to maximize the heat transfer rate and maintain the necessary temperature difference. Figure 1 shows the fabricated photovoltaic/thermal system and the thermoelectric unit together with the heat sink and fan.

3- Results and Discussion

Figure 2 shows the changes in the power generation of the photovoltaic/thermal system over time. The method of direct measurement of voltage and current at the maximum point was used to calculate the electric power. Usually, higher ambient temperature and increased solar radiation led to an increase in the values of these parameters in the system. The maximum electric power generated at different flow rates was approximately 78.2 W, 78.7 W, and 9.7 W. The total power generated at flow rates of 300 cm³/min increased by 0.2% compared to 200 cm³/min and by 1.02% compared to 100 cm³/min.

Figure 3 also shows the changes in the power generation of the system with the combination of thermoelectric, heat sink and fan over time. In this system, the higher ambient temperature and increased solar radiation also led to an increase in the values of these parameters in the system. As a result, the maximum electric power generated at different flow rates was approximately 79.1 W, 81.7 W and 84.4 W. The total power generated at flow rates of 300 cm³/min increased by 3.2% compared to 200 cm³/min and by 6.5% compared to 100 cm³/min.

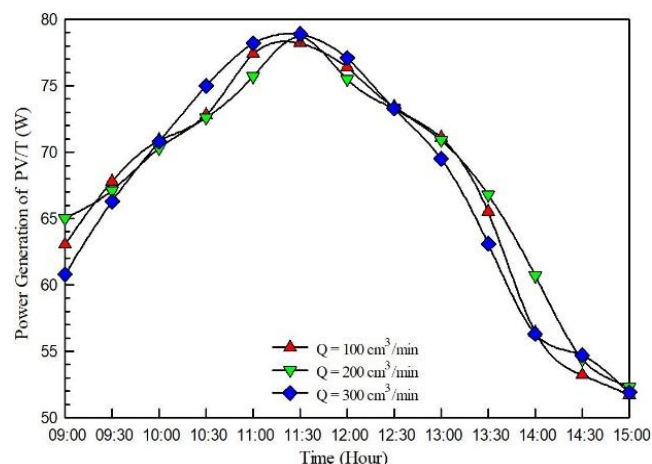


Fig. 2. Electricity generation by photovoltaic/thermal system.

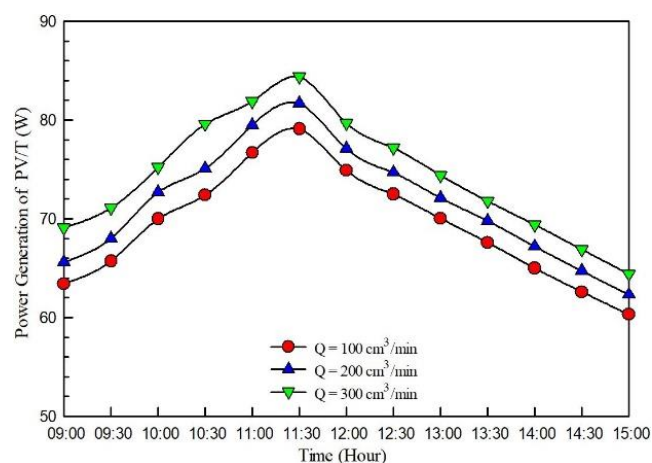


Fig. 3. Electricity generation by thermoelectric + heat sink + fan combination

4- Conclusion

This experimental study successfully developed and evaluated a novel hybrid photovoltaic/thermal system integrated with thermoelectric generators, a heat sink, and forced air cooling (fan) for simultaneous enhancement of electrical efficiency and heat transfer. The system incorporated an innovative heat exchanger design featuring a graphene nanoparticle-coated copper plate and spiral copper tubing. The key findings are:

- **Superior Electrical Performance:** The combined system achieved a maximum total power output of 84.4 W (at 300 cm³/min), showing a clear advantage over the standalone PV/T system.
- **Significant Efficiency Gain:** The highest electrical efficiency recorded for the hybrid system was 14.9% (at 300 cm³/min), representing an 11.2% improvement over the standalone PV/T system at the same flow rate.

References

- [1] M.S. Guney, Solar power and application methods, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57 (2016) 776–785.
- [2] A.K. Tiwari, K. Chatterjee, S. Agrawal, G.K. Singh, A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance evaluation and contemporary development, *Energy Reports*, 10 (2023) 2655–2679.
- [3] C. Babu, P. Ponnambalam, The role of thermoelectric generators in the hybrid PV/T systems: A review, *Energy conversion and management*, 151 (2017) 368–385.
- [4] S. Diwania, S. Agrawal, A.S. Siddiqui, S. Singh, Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1) (2020) 33–54.
- [5] J. Li, X. Ren, W. Yuan, Z. Li, G. Pei, Y. Su, Ç. Kutlu, J. Ji, S. Riffat, Experimental study on a novel photovoltaic thermal system using amorphous silicon cells deposited on stainless steel, *Energy*, 159 (2018) 786–798.
- [6] S. Preet, Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2018) 791–807.



بررسی تجربی استفاده از ترموالکتریک بر روی یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی به منظور افزایش راندمان و انتقال حرارت

پیام گل محمدپور، آرزو کریم آبادی، امیرمحمد جدیدی*

پردیس علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۲۲

کلمات کلیدی:

سیستم فتوولتائیک/حرارتی

واحد مولد ترموالکتریک

راندمان الکتریکی و حرارتی

انتقال حرارت

انرژی خورشیدی

خلاصه: افزایش هزینه‌های جهانی انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی، اهمیت انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌ویژه انرژی خورشیدی را برجسته می‌کند. سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی که به‌طور هم‌زمان برق و گرما تولید می‌کنند، یک راه‌حل کارآمد ارائه می‌دهند. این مطالعه عملکرد یک سیستم مستقل و ترکیب آن با یک واحد مولد ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن را در شرایط آب و هوایی سمنان، ایران، با نرخ جریان جرمی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه بررسی می‌کند. نتایج نشان داد که حداکثر توان خروجی برای سیستم مستقل تقریباً ۷۸/۲ وات، ۷۸/۷ وات و ۷۸/۹ وات در نرخ جریان‌های مربوطه بود. با واحد مولد ترموالکتریک، حداکثر توان به ترتیب ۷۹/۱ وات، ۸۱/۷ وات و ۸۴/۴ وات بود. بالاترین راندمان حرارتی برای سیستم مستقل ۳۱/۹ درصد در ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه بود، در حالی که حداکثر راندمان الکتریکی ۱۴/۱ درصد در ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه بود. سیستم یکپارچه به راندمان ۲۷/۳ درصد (حرارتی) و ۱۴/۹ درصد (الکتریکی) دست یافت. علاوه بر این، عدد ناسلت در مقایسه با سیستم مستقل، به‌طور متوسط ۲۸/۶ درصد بهبود در نرخ جریان‌ها را نشان می‌دهد. این افزایش راندمان و انتقال حرارت، آینده‌ای امیدوارکننده را برای این سیستم‌ها در تأمین هم‌زمان برق و گرمایش برای ساختمان‌ها و کاربردهای تجاری برجسته می‌کند.

۱- مقدمه

سوزاندن سوخت‌های فسیلی به‌طور قابل توجهی در گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی نقش دارد و این امر مستلزم تغییر به سمت منابع انرژی پاک‌تر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در نتیجه، منابع انرژی تجدیدپذیر به‌طور قابل توجهی رشد کرده‌اند و انرژی خورشیدی^۱ به عنوان یک گزینه فراگیر و در دسترس ظهور کرده است. انرژی خورشیدی به دلیل پتانسیل وسیع و دسترسی آسان، به عنوان یکی از منابع انرژی قدرتمند در جهان در نظر گرفته می‌شود [۱]. انرژی خورشیدی یکی از پرکاربردترین منابع انرژی تجدیدپذیر است زیرا فراوان و استفاده از آن آسان است. یکی از محبوب‌ترین راه‌های استفاده از این انرژی، تبدیل آن به دو شکل مختلف است: گرما و برق [۲]. می‌توان از سیستم‌های فتوولتائیک^۲ خورشیدی استفاده کرد که از فتوولتائیک برای تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به برق استفاده می‌کنند. تا جایی که می‌تواند به عملکرد بی‌صدا، نگهداری ارزان و انرژی

1. Solar Energy
2. Photovoltaic (PV)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: am.jadidi@semnan.ac.ir

بدون آلودگی دست یابد، این اثر به عنوان یکی از قابل قبول‌ترین پاسخ‌ها به تقاضا برای انرژی الکتریکی و انرژی پاک در نظر گرفته می‌شود [۳]. روش‌های جدیدی برای ترکیب سیستم‌های خورشیدی و فناوری‌های ترموالکتریک در حال توسعه هستند. این تکنیک‌ها شامل گرم کردن سیستم‌های فتوولتائیک/ترموالکتریک با تابش خورشیدی متمرکز یا غیرمتمرکز است که به واحدهای ترموالکتریک اجازه می‌دهد انرژی الکتریکی بیش‌تری تولید کنند و به دلیل افت دما، راندمان صفحه فتوولتائیک خورشیدی را افزایش دهند [۴]. همچنین، با ترکیب فناوری‌های فتوولتائیک با گردآورنده‌های حرارتی خورشیدی، سیستم‌های ترکیبی فتوولتائیک/حرارتی امکان استفاده هم‌زمان از انرژی خورشیدی را برای اهداف الکتریکی و حرارتی فراهم می‌کنند. نکته قابل توجه این است که تا ۸۰ درصد از انرژی تجدیدپذیر ورودی به شکل انرژی حرارتی است. بنابراین، سیستم‌های فتوولتائیک طوری ساخته شده‌اند که از این پتانسیل حرارتی نهایت استفاده را ببرند و این امر آن‌ها را به گام اول مفیدی در افزایش راندمان کل سیستم‌های انرژی خورشیدی تبدیل می‌کند [۵].



شورافا و همکارانش [۶] با استفاده از نرم افزار متلب یک مدل سیستم فتولتائیک-مولد ترموالکتریک توسعه دادند تا مزایای ادغام این سیستم را بررسی کنند. تحقیقات آن‌ها نشان داد که با جذب گرمای تلف شده از صفحه، مولد ترموالکتریک به طور قابل توجهی دمای صفحه فتولتائیک را $20/74^{\circ}\text{C}$ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. این کاهش دما، به نوبه خود، منجر به افزایش $0/667$ وات برق شد. همچنین اجرای خنک‌کننده آب اجباری، راندمان کلی سیستم را $1/82$ درصد افزایش داد. گوپینات و ماریموتو [۷] با نصب مولدهای ترموالکتریک در پشت صفحه و سپس اعمال فویل‌های گرافیتی بر روی سطوح مولد ترموالکتریک، اتلاف حرارت آن‌ها را افزایش دادند. این چیدمان به مولدهای ترموالکتریک اجازه داد تا به حداکثر ولتاژ $13/52$ ولت و حداکثر اختلاف دمای $6/68$ درجه سانتی‌گراد بین فویل‌های گرافیتی و صفحه دست یابند. وانگ و همکارانش [۸] رویکرد جدیدی را برای افزایش قابل توجه سیستم‌های فتولتائیک-ترموالکتریک معرفی کردند. روش آن‌ها شامل بازسازی سیستم با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی تعاملی پویا بود. این نوآوری تولید برق را افزایش داده و دستگاه‌های سوئیچینگ را گسترش داد. شبیه‌سازی‌ها افزایش قابل توجه $32/02$ درصدی در تولید کلی برق برای یک آرایه 6×10 بازسازی شده در مقایسه با یک سیستم بازسازی نشده را نشان دادند.

وانگ و همکارانش [۹] یک سیستم تولید برق بهبود یافته با ادغام مولدهای ترموالکتریک نیمه‌هادی پیشنهاد دادند. این ادغام شامل نصب چندین لوله حرارتی و لوله‌های مسی ماریچ در پشت صفحه‌های فتولتائیک بود که نانوسیال‌ها از طریق لوله‌های مسی به عنوان سیال عامل جریان می‌یافتند و به طور مؤثر صفحه‌های فتولتائیک را خنک می‌کردند. لوله مسی به مبدل حرارتی در سمت دمای بالای ترموالکتریک‌ها متصل شده و یک سیستم گردش حلقه بسته تشکیل می‌داد. در نتیجه، سیال خنک‌کننده، گرما را به سطح داغ ترموالکتریک‌ها منتقل می‌کرد و از گرمای تلف شده تولید شده توسط صفحه‌های فتولتائیک برای تولید برق استفاده می‌کرد. ترموالکتریک‌ها از 10 واحد ترموالکتریک تشکیل شده بود که انتهای دمای پایین آن‌ها در تماس با صفحه آلومینیومی پره‌دار بود و به طور فعال توسط خنک‌کننده هوای طبیعی خنک می‌شد. علاوه بر این، برای اعتبارسنجی منطق طراحی، چندین مجموعه آزمایش مقایسه‌ای ترتیب داده شد. در این آزمایش‌ها از نانوسیال‌هایی با کسر حجمی $0/5$ درصد، 1 درصد، 2 درصد و 3 درصد و آب به عنوان سیال خنک‌کننده استفاده شد. نتایج تجربی

نشان داد که حداکثر دمای عملیاتی صفحه فتولتائیک مرجع به $81/9$ درجه سانتی‌گراد رسید و میانگین و حداکثر راندمان انرژی در طول یک روز به ترتیب $16/91$ درصد و $31/84$ درصد ثبت شد. قابل توجه است که مهمترین اثر خنک‌کنندگی زمانی رخ داد که کسر حجمی نانوسیال 2 درصد بود و حداکثر دمای صفحه فتولتائیک/حرارتی را به $61/5$ درجه سانتی‌گراد کاهش داد. هم‌زمان، میانگین راندمان انرژی روزانه و راندمان انرژی سیستم تولید برق فتولتائیک/حرارتی-ترموالکتریک به ترتیب به مقادیر اوج $21/06$ درصد و $39/87$ درصد رسید. در مقایسه با صفحه‌های فتولتائیک مرجع، توان خروجی سیستم فتولتائیک/حرارتی-ترموالکتریک تا $30/51$ درصد افزایش یافت. خانعلی‌زاده و همکارانش [۱۰] یک چیدمان جدید از سیستم یکپارچه فتولتائیک/حرارتی-مولد ترموالکتریک را ارائه دادند که از خنک‌کننده آب و هوا برای افزایش عملکرد صفحه‌های فتولتائیک در مناطق گرم استفاده می‌کرد. این سیستم، مولدهای ترموالکتریک را بین مبدل حرارتی آب و چاه حرارتی هوا اعمال می‌کرد، به جای بین صفحه فتولتائیک و سیال خنک‌کننده. این امر از خنک‌کننده غیریک‌نواخت مرتبط با اتصال مستقیم مولد ترموالکتریک به پشت فتولتائیک جلوگیری می‌کرد. سیستم پیشنهادی در چهار اقلیم مختلف در ایران آزمایش و با سیستم‌های فتولتائیک-ترموالکتریک و فتولتائیک تکی مقایسه شد. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی دمای سطح فتولتائیک را 23 درصد کاهش، توان خروجی الکتریکی را بیش از 15 درصد افزایش و راندمان الکتریکی فتولتائیک را حدود 3 درصد بهبود بخشید. میانگین راندمان کل انرژی $55/6$ درصد و حداکثر راندمان حرارتی حدود 20 درصد بود. این مقادیر برای سیستم فتولتائیک/حرارتی مبتنی بر ترموالکتریک غیرمتمرکز در تمام اقلیم‌های مورد تجزیه و تحلیل رضایت‌بخش بودند.

صفحه فتولتائیک، ترموالکتریک، مواد تغییر فاز دهنده^۱ و گردآورنده حرارتی توسط لی و همکارانش [۱۱] پیشنهاد شد. توان خروجی و راندمان تولید توان صفحه فتولتائیک به ترتیب $10/4$ درصد و $1/9$ درصد افزایش یافت. مالکی و همکارانش [۱۲] یک سیستم فتولتائیک/حرارتی-مولدهای ترموالکتریک با مواد تغییر فاز دوگانه ترکیبی را ساختند و مورد بررسی قرار دادند. این سیستم به ترتیب $8/1$ درصد و $9/9$ درصد راندمان انرژی الکتریکی و انرژی کل بیشتری داشت. فینی و همکارانش [۱۳] یک سیستم ترکیبی متشکل از صفحه‌های فتولتائیک پلی کریستال با مبدل‌های حرارتی خنک‌شونده^۲ با آب و واحدهای مولد ترموالکتریک ارائه دادند. این سیستم

1 Phase Change Material (PCM)

2 Cooling Heat Exchangers

ترکیبی ۹/۴۹ وات توان الکتریکی تولید کرد که بسیار بالاتر بود. این بدان معنا بود که راندمان الکتریکی و راندمان انرژی به ترتیب ۱/۶۷ درصد و ۱/۷۲ درصد افزایش یافت.

ون و همکارانش [۱۴] یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی متمرکز با استفاده از مولد ترموالکتریک و لوله‌های حرارتی میکروکانال ساختند. یافته‌ها نشان داد که خروجی الکتریکی سیستم در طول عملیات واقعی ۴ ساعته افزایش یافته و متعاقباً کاهش یافته و به طور متوسط ۸/۳۳ وات رسیده است. این تغییرات به طور مؤثر میانگین راندمان الکتریکی سیستم را از ۷/۶۲ درصد به ۸/۹۵ درصد افزایش داد. ارزیابی عملکرد دو نوع سیستم فتوولتائیک/حرارتی-مولد ترموالکتریک توسط گائو و همکارانش [۱۵] بررسی شد. بهبود در توان خروجی فتوولتائیک از ۴/۷ درصد تا ۱۲/۷ درصد متغیر بود، در حالی که حداکثر نسبت افزایش توان مولد ترموالکتریک ۲۷/۸ درصد بود. مقایسه دو سیستم هم‌چنین افزایش قابل توجه ۱۷ درصد در راندمان حرارتی را نشان داد. با تغییر نرخ جریان آب، راندمان حرارتی سیستم پشت سر هم ۱۰/۷۳ درصد و سیستم دو طرفه ۸/۳۷ درصد افزایش یافت. رجایی و همکارانش [۱۶] از یک سیستم ترکیبی نانوسیال اکسید کبالت/آب و یک ماده تغییر فاز دهنده بهبود یافته به عنوان یک روش خنک‌کننده برای تجزیه و تحلیل عملکرد فتوولتائیک/حرارتی-مولد ترموالکتریک استفاده کردند. نتایج نشان داد که در مقایسه با استراتژی خنک‌کننده آب، استفاده از ۱ درصد نانوسیال با افزایش ماده تغییر فاز دهنده به عنوان یک روش خنک‌کننده، راندمان الکتریکی کلی را ۱۲/۲۸ درصد افزایش داد. یک گردآورنده فتوولتائیک/حرارتی تمرکز پایین و مولد ترموالکتریک که به صورت سری کوپل شده‌اند توسط ژانگ و همکارانش [۱۷] معرفی شد. یافته‌ها نشان داد که گردآورنده فتوولتائیک/حرارتی حداکثر دمای آب گرم خانگی تقریباً ۵۲/۹۶ درجه سانتی‌گراد و میانگین توان الکتریکی روزانه ۴۳۶/۱۳ وات را با میانگین راندمان الکتریکی روزانه ۱۴/۳۴ درصد در طول ماه‌های تابستان تولید کرد. مطالعات موجود در مورد مدیریت حرارتی صفحه فتوولتائیک به طور گسترده روش‌های مختلف خنک‌سازی، از جمله رویکردهای فعال، غیرفعال یا ترکیبی را بررسی کرده‌اند. با این حال، هیچ بررسی در مورد استفاده سیستم فتوولتائیک/حرارتی با واحد مولد ترموالکتریک، چاه حرارتی^۱ و فن^۲ و نیز تأثیر آن‌ها بر عملکرد سیستم فتوولتائیک/حرارتی انجام نشده است. نوآوری این تحقیق، طراحی و ساخت یک صفحه جاذب حرارتی همراه با پوشش‌دهی نانوذرات گرافن برای به حداکثر رساندن جذب تابش خورشیدی و افزایش

- 1 Heat Sink
- 2 Fan

ضریب انتقال حرارت است. این صفحه جاذب به لوله‌های مسی به شکل «مارپیچ»^۳ با قطر ۱۰ میلی‌متر و طول ۲ متر جوشکاری شده است تا سطح تبادل حرارتی و انتقال حرارت به سیال در گردش به طور چشم‌گیری بهبود یابد. هم‌چنین افزودن فن به ترموالکتریک و بررسی اثر آن یکی دیگر از جنبه‌های نوآوری این تحقیق می‌باشد. این سیستم، با نوآوری‌های ذکر شده، یک راهکار جامع و کارآمد برای بهبود هم‌زمان تولید برق و مدیریت حرارت در صفحه‌های فتوولتائیک ارائه می‌دهد.

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، یک صفحه فتوولتائیک تک‌بلوری (مشخصات فنی در جدول ۱) را با یک سیستم نوآورانه بازیابی حرارت و تولید برق ادغام شد. یک صفحه مسی که به یک شبکه کانال نازک مارپیچی در پشت صفحه فتوولتائیک جوش داده شد، گرما را جذب کند، صفحه را خنک کند، جریان سیال را تسهیل کند و گرمای تولید شده توسط تابش خورشیدی را حفظ کند. ویژگی‌های این نوآوری در جدول ۲ خلاصه شده است. برای افزایش انتقال حرارت از صفحه فتوولتائیک به سیال عامل، از نانوذرات گرافن با مخلوط رنگ سیاه به عنوان پوشش استفاده شد. روش اعمال این پوشش به صورت رنگ پودری کوره‌ای بود که تأثیر مستقیم بر جذب تابش خورشیدی و بهبود ضریب انتقال حرارت داشت. یک الاستومر از طریق عایق حرارتی، اتلاف حرارت را به حداقل رساند. علاوه بر این، شش واحد ترموالکتریک، که جزئیات آن در جدول ۳ آمده است، از گرمای تلف شده صفحه، برق اضافی تولید کرده و راندمان کلی را بهبود بخشید. برای اطمینان از انتقال حرارت حداکثری، از چسب و خمیر سیلیکون حرارتی با رسانایی بالا در محل تماس هر ترموالکتریک با سطح پشتی صفحه جاذب استفاده شد. این خمیر حرارتی هرگونه فضای خالی یا شکاف هوا را پر کرده و مقاومت حرارتی را به حداقل رساند. از نظر اتصال فیزیکی شش چاه حرارتی و شش فن به صورت یکپارچه و به ترتیب در پشت هر یک از ترموالکتریک‌ها و روی صفحه جاذب حرارتی مسی و از نظر الکتریکی به صورت سری به یکدیگر متصل شد. هم‌چنین محاسبه توان هر دو سیستم به صورت جداگانه و با جمع زدن توان تولیدی هر بخش انجام شد. با توجه به این که هدف اندازه‌گیری حداکثر توان خروجی بود، برای اندازه‌گیری مقاومت بار، با استفاده از مولتی‌متر، ولتاژ و جریان در نقطه حداکثر توان اندازه‌گیری شد. چاه حرارتی سطح تماس با هوا را افزایش داده و گرما را از سطح داغ‌تر به محیط منتقل کرد، در حالی که فن

جدول ۱. مشخصات صفحه فتوولتائیک.

Table 1. Photovoltaic panel specifications.

نوع سلول	مونوکریستال
تعداد سلول‌های واحد	۳۶
تولیدکننده	استار سولار
ابعاد صفحه	۱/۲ متر * ۵۴/۰ متر
ولتاژ مدار باز (V_{oc})	۲۱/۹۰ ولت
جریان اتصال کوتاه (I_{sc})	۶/۰۳ آمپر
نقطه توان ماکزیمم	۱۰۰ وات
ولتاژ در نقطه بالاترین توان	۱۷/۹۰ ولت
جریان در نقطه بالاترین توان	۵/۵۹ آمپر
وزن	۷ کیلوگرم

جدول ۲. مشخصات فنی برای ساخت صفحه حرارتی.

Table 2. Technical specifications for the manufacture of thermal plate.

مشخصات لوله‌ها و چاه حرارتی	مساحت	ضخامت	مواد جاذب حرارتی	مساحت	ضخامت
	۲۰ مترمربع	۰/۰۱ متر	مسی	۰/۴۵۹ مترمربع	۰/۰۰۱ متر
مشخصات عایق و پوشش حرارتی	نوع عایق	نوع	پوشش آلومینیوم تقویت شده ۱۷۰ میکرومتر	مساحت	جرم
	الاستومری	نوع نانومواد	اکساید کاهنده	۲ متر	۳ گرم
	گرافن				

سانتی‌متر مکعب بر دقیقه) به عنوان متغیرهای مستقل، به منظور افزایش راندمان و انتقال حرارت.

جریان هوای اجباری را بر روی چاه حرارتی ایجاد کرده تا نرخ انتقال حرارت را افزایش دهد و اختلاف دمای بهینه را برای واحد ترموالکتریک حفظ کند. شکل‌های ۱ و ۲ سیستم فتوولتائیک/حرارتی ساخته‌شده و واحد ترموالکتریک را به همراه چاه حرارتی و فن نشان می‌دهند.

۲-۱- آزمایش تجربی

برای ارزیابی نمونه اولیه سیستم فتوولتائیک/حرارتی که در دانشگاه سمنان توسعه داده شد، از آزمون استاندارد اشری ۲۰۱۰:۹۳^۱ استفاده شد [۱۸]. در این سیستم آزمایشگاهی عوامل مختلفی از جمله راندمان الکتریکی و حرارتی، تابش خورشیدی جذب شده و دمای محیط در طول آزمایش ارزیابی شد. همچنین درصد بهبود این عوامل را در مقایسه با ترکیب واحد

اهداف اصلی این مطالعه شامل موارد زیر است:

- افزایش راندمان الکتریکی صفحه فتوولتائیک با استفاده از واحد ترموالکتریک و دفع گرما با چاه حرارتی و فن.
- بازیابی گرمای اتلافی صفحه و تبدیل آن به برق اضافی.
- بررسی عملکرد سیستم در سه دبی جرمی مختلف (۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰

1. ASHREA 2010:93 Standard Test

جدول ۳. مشخصات واحد مولد ترموالکتریک.

Table 3. Thermoelectric generator unit specifications.

نوع واحد	سرامیک/بیسموت تلورید
دما	۱۵۰ درجه سلسیوس
ولتاژ مدار باز	۴/۸ ولت
وزن واحد	۲۵ گرم/۰/۸۹ اونس
اندازه واحد	۴*۴*۰/۴ سانتی متر
مشخصات سیم	طول استاندارد سرب 300 ± 5 میلی متر RV
مقاومت داخلی	۰/۲~۲
اختلاف دما ($\Delta T_{max} (Q_c=0)$)	بالای ۶۲ درجه سلسیوس
جریان کاری	۶
ولتاژ نامی (حداکثر ولتاژ: ۱۵/۵ ولت)	جریان مستقیم ۱۲ ولت
قدرت خنک کننده Q_{cmax}	۶۰ وات
فشار مونتاز	۲۸۵ نیوتن/سانتی متر
دمای محیط کاری	محدوده دما -۵۵ تا ۸۵ درجه سلسیوس
شرایط ذخیره	۶۰~۴۰- درجه سلسیوس

ترموالکتریک تحت شرایط یکسان اندازه گیری شد. آزمایش های متعددی بر روی هر دو سیستم از روزهای ۱۴۰۳/۵/۲۱ تا ۱۴۰۳/۵/۲۶ در مرداد ماه، از ساعت ۹:۰۰ صبح تا ۱۵:۰۰ بعد از ظهر در سمنان، ایران، که در عرض جغرافیایی ($33^{\circ}/35^{\circ}$ شمالی، $53^{\circ}/32^{\circ}$ شرقی) و ارتفاع متوسط ۱۱۳۰ متر از سطح دریا واقع شده است، انجام شد. این مطالعه دو سیستم را بررسی کرد: سیستم فتوولتائیک/حرارتی با و بدون واحد ترموالکتریک، همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این آزمایش، برای ثابت نگه داشتن دمای آب ورودی به سیستم مطابق شکل ۳ از یک دستگاه سیکل تبرید-تراکمی استفاده شد. دستگاه به صورت پیوسته دمای آب موجود در تانک را مانیتور کرد و با فعال و غیرفعال کردن سیستم خنک کننده، دمای آب در محدوده ۳۱ درجه سانتی گراد حفظ شد. این رویکرد، اثر تغییرات دمای محیط یا تابش خورشید بر دمای آب ورودی را خنثی کرد و شرایط آزمایش کاملاً کنترل گردید.

۳- روابط محاسباتی

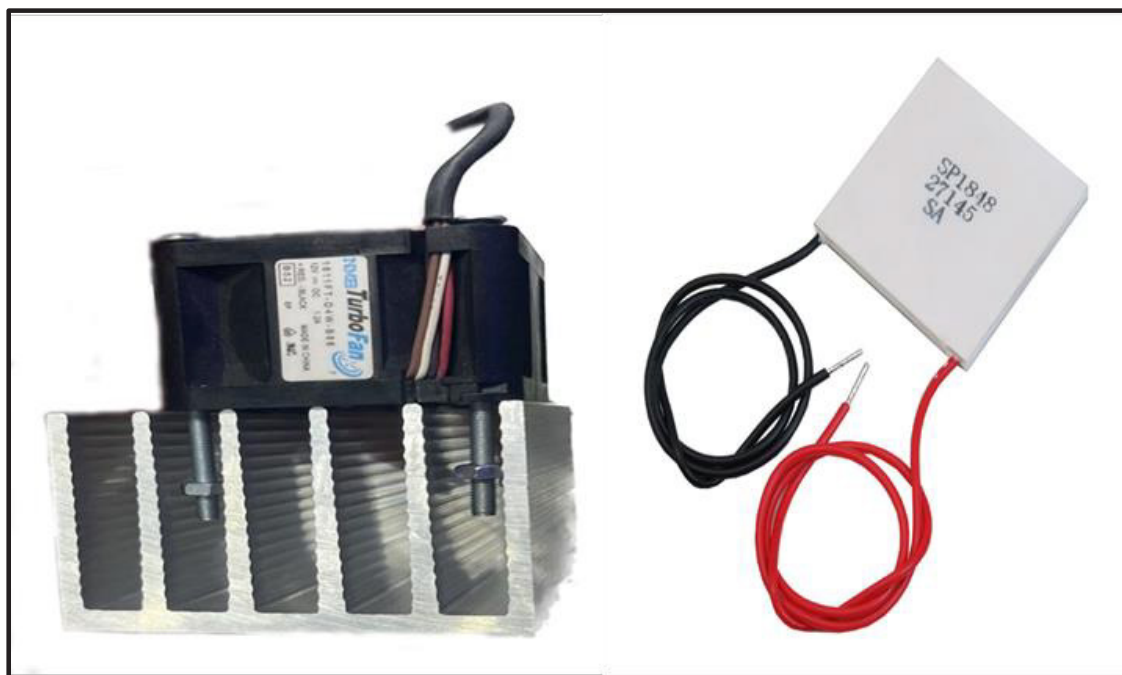
۳-۱- راندمان حرارتی سیستم فتوولتائیک/حرارتی خورشیدی

برای ارزیابی راندمان سیستم و اندازه گیری پارامترهای مختلف، معادلات



شکل ۱. سیستم آزمایشگاهی فتوولتائیک/حرارتی با مولدهای ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن.

Fig. 1. Photovoltaic/thermal laboratory system with thermoelectric generators, heat sink, and fan.



شکل ۲. واحد مولد ترموالکتریک با چاه حرارتی و فن.

Fig. 2. Thermoelectric generator unit with heat sink and fan.



شکل ۳. دستگاه سیکل تبرید-تراکمی.

Fig. 3. Refrigeration-condensation cycle device.

۳-۳- تجزیه و تحلیل عدم قطعیت

این مطالعه از تجزیه و تحلیل عدم قطعیت^۴ برای تعیین میزان قابل اعتماد بودن و دقت داده‌های تجربی خود استفاده می‌کند. با کمی‌سازی منابع مختلف عدم قطعیت، محققان می‌توانند دقت نتایج خود را بهتر درک کنند. ابزارهای پیرانومتر TES-1333 برای اندازه‌گیری شدت تابش نور خورشید، حسگر دمای دیجیتال برای اندازه‌گیری دمای محیط و آب خروجی، دماسنج مادون قرمز Testo 830-T1 برای اندازه‌گیری دمای اجزای صفحه فتوولتائیک، REED LM-8000 برای اندازه‌گیری سرعت باد و رطوبت نسبی هوا و مولتی‌متر دیجیتال DT9205A برای اندازه‌گیری خروجی صفحه فتوولتائیک و ترموالکتریک استفاده شدند. عدم قطعیت‌های استاندارد با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (۴)$$

متغیر "a" نشان‌دهنده عدم قطعیت استاندارد و "u" نشان‌دهنده دقت ابزار است. جدول ۴ جزئیات عدم قطعیت‌های وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده در آزمایش را شرح می‌دهد. شکل ۴ هم‌چنین ابزارهای اندازه‌گیری مورد استفاده را نشان می‌دهد. هنگامی که نتایج اندازه‌گیری به چندین متغیر مستقل بستگی دارد، باید انتشار عدم قطعیت در نظر گرفته شود. اگر نتیجه اندازه‌گیری (y) تابعی از چندین متغیر باشد (مثلاً $y=f(x_1, x_2, \dots)$)، آنگاه عدم قطعیت ترکیبی y به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$u(y) = \sqrt{\left[\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot u(x_1) \right]^2 + \left[\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot u(x_2) \right]^2 + \dots} \quad (۵)$$

بر اساس معادله (۵)، حداکثر عدم قطعیت در سیستم مورد بررسی برابر با ۰,۰۲ درصد محاسبه گردید.

۴- نتایج و بحث

در این مطالعه، تمام آزمایش‌ها برای سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی مستقل و با واحدهای مولد ترموالکتریک در شهر سمنان، در اواخر مرداد

حاکم ضروری هستند. معادله (۱) برای محاسبه راندمان حرارتی^۱ استفاده می‌شود، که در آن $\dot{m}$ نشان‌دهنده دبی جرمی سیال، $T_{f,o}$ و $T_{f,i}$ به ترتیب دمای ورودی و خروجی سیال و C_p ظرفیت حرارتی سیال است. علاوه بر این، G نشان‌دهنده تابش خورشیدی جذب شده و A_c نشان‌دهنده مساحت سطح صفحه فتوولتائیک است [۱۹].

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{G \times A_c} \quad (۱)$$

۳-۲- راندمان الکتریکی سیستم فتوولتائیک/حرارتی خورشیدی

معادله زیر برای محاسبه راندمان الکتریکی^۲ استفاده می‌شود [۲۰].

$$\eta_{el} = \frac{I_{mpp} \times V_{mpp}}{G \times A_c} \quad (۲)$$

جایی که I_{mpp} و V_{mpp} به ترتیب جریان و ولتاژ در نقطه ماکزیمم توان است.

عدد ناسلت^۳ یک پارامتر بدون بعد در مطالعات انتقال حرارت است. این پارامتر نشان‌دهنده نسبت گرمای منتقل شده از طریق همرفت به گرمای منتقل شده از طریق هدایت است. این پارامتر برای درک عملکرد سیستم‌های انتقال حرارت و شناسایی زمینه‌های بهبود ضروری است [۲۱]. در این مطالعه، عدد ناسلت با استفاده از فرمول ارائه شده توسط آلکترانی [۲۲] محاسبه شد.

$$Nu = \frac{h D_h}{K_f} = \frac{\dot{m} C_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{A (T - T_w)} \times \frac{D_h}{K_f} \quad (۳)$$

در رابطه فوق، h و D_h به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی و قطر هیدرولیکی هستند. هم‌چنین، T_w و T به ترتیب میانگین دمای ورودی و خروجی و میانگین دمای دیواره شبکه لوله مارپیچی هستند.

1. Thermal Efficiency
2. Electrical Efficiency
3. Nusselt Number

جدول ۴. ابزارهای اندازه‌گیری و عدم قطعیت‌های استاندارد.

Table 4. Measurement instruments and standard uncertainties.

شماره	دستگاه	دقت	محدوده	عدم قطعیت استاندارد
۱	پیرانومتر TES-۱۳۳۳	۱ وات بر مترمربع	۲۰۰۰-۰	۰/۶ وات بر مترمربع
۲	حسگر دمای دیجیتال	۰/۰۶ درجه سانتی‌گراد	۱۲۵-(-۵۵)	۰/۰۳ درجه سانتی‌گراد
۳	دماسنج مادون قرمز testo ۸۳۰-T1	۰/۱ درجه سانتی‌گراد	۴۰۰-(-۳۰)	۰/۰۶ درجه سانتی‌گراد
۴	REED LM-۸۰۰۰	۰/۱ متر بر ثانیه-۰/۱ درصد	(۳۰۰-۰,۲) - (۹۵-۱۰)	۰/۰۶ متر بر ثانیه-۰/۰۶ درصد
۵	مولتی‌متر دیجیتال DT۹۲۰۵A	۰/۱ آمپر-۰/۰۱ ولت	(۲۴-۰) - (۱۵-۰)	۰/۰۶ آمپر-۰/۰۰۶ ولت



شکل ۴. وسایل اندازه‌گیری در طول آزمایش.

Fig. 4. Measuring devices during the experiment.

۴-۱- شرایط محیطی آزمایش

اندازه‌گیری‌ها برای ارزیابی چندین متغیر انجام شد: دمای محیط، شدت تابش خورشیدی، دمای اجزای مختلف سیستم، راندمان انرژی و راندمان انرژی، تحت دو سناریو: فتوولتائیک/حرارتی مستقل و سیستم ترکیبی. شکل ۶ اندازه‌گیری‌های شدت تابش خورشیدی و دمای محیط را در طول شش روز آزمایش متوالی را نشان می‌دهد. این رویکرد تضمین کرد که هرگونه تغییر در شرایط آب و هوایی (مانند عبور ابر یا تغییر ناگهانی در دمای محیط) به طور هم‌زمان بر هر دو سیستم تأثیر می‌گذارد. طبق این شکل، روند افزایشی تا ظهور وجود دارد و پس از آن با کاهش تابش خورشیدی، شیب نزولی شروع می‌شود. هر دو حالت مقادیر میانگین ۳۹/۹ درجه سانتی‌گراد را

ماه انجام شد. داده‌های جمع‌آوری‌شده در طول زمان و در روزهای مختلف اندازه‌گیری شدند. پس از تکمیل آزمایش‌ها، نتایج به صورت تحلیل گرافیکی سازماندهی شدند. هدف ما بهبود دقت و قابلیت اطمینان نتایج با اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی و دمای سطح صفحه فتوولتائیک در پنج نقطه مختلف مطابق شکل ۵ بود. میانگین این اندازه‌گیری‌ها به عنوان دمای نهایی گزارش شد. اختلاف دما بین بخش‌های پایینی، مرکزی و بالایی صفحه به دلیل حرکت سیال از ورودی در پایین به خروجی در بالا مشاهده شد. این امر یک کانتور دمای غیر یکنواخت ایجاد می‌کند که عامل مهمی در اندازه‌گیری‌ها و گزارش نتایج است. علاوه بر این، از این روش برای اندازه‌گیری تابش خورشیدی نیز استفاده شد.

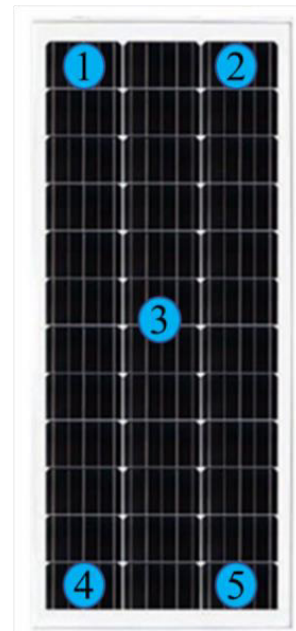
افزایش و برعکس، نرخ جریان بالاتر معمولاً منجر به کاهش دمای آب شد. نکته قابل توجه این است که سیستم ترکیبی کاهش قابل توجهی در دمای آب نشان داد. دمای آب خروجی سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم فتوولتائیک/حرارتی در سه نرخ جریان مختلف، ۵/۴ درصد کاهش یافت. نمودار در ابتدا یک روند صعودی را نشان داد و سپس به شیب نزولی تغییر کرد. این الگو نشان داد که دمای آب گردآورنده تحت تأثیر دمای محیط و تابش خورشیدی قرار دارد.

۴-۳- ولتاژ، جریان و تولید برق سیستم فتوولتائیک/حرارتی

شکل ۹ تغییرات ولتاژ، جریان و تولید برق سیستم فتوولتائیک/حرارتی را در طول زمان نشان می‌دهد. برای محاسبه توان الکتریکی از روش اندازه‌گیری مستقیم ولتاژ و جریان در نقطه حداکثر استفاده شد. معمولاً دمای محیط بالاتر و افزایش تابش خورشیدی منجر به افزایش مقادیر این پارامترها در سیستم شد. این شکل نشان می‌دهد که هم جریان و هم ولتاژ با شدت تابش افزایش می‌یابند. در نتیجه، سیستم می‌تواند با استفاده از شدت تابش بالاتر در نرخ‌های جریان افزایش یافته، تولید جریان و برق را افزایش دهد. حداکثر توان الکتریکی تولید شده در نرخ‌های جریان مختلف تقریباً ۷۸/۲ وات، ۷۸/۷ وات و ۷۸/۹ وات بود. کل توان تولیدی در دبی‌های ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه، ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه و ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱/۰۲ درصد افزایش یافت.

۴-۴- ولتاژ، جریان و تولید برق سیستم ترکیب با ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن

شکل ۱۰ تغییرات ولتاژ، جریان و تولید برق سیستم با ترکیب ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن را در طول زمان نشان می‌دهد. در این سیستم نیز معمولاً دمای محیط بالاتر و افزایش تابش خورشیدی منجر به افزایش مقادیر این پارامترها در سیستم شد. این شکل نشان می‌دهد که هم جریان و هم ولتاژ با شدت تابش افزایش می‌یابند. در نتیجه، سیستم می‌تواند با استفاده از شدت تابش بالاتر در نرخ‌های جریان افزایش یافته، تولید جریان و برق را افزایش دهد. در نتیجه، حداکثر توان الکتریکی تولید شده در نرخ‌های جریان مختلف تقریباً ۷۹/۱ وات، ۸۱/۷ وات و ۸۴/۴ وات بود. کل توان تولیدی در دبی‌های ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در مقایسه با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۳/۲ درصد و در مقایسه با ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۶/۵ درصد افزایش یافت.



شکل ۵. نقاط مختلف انتخاب شده برای اندازه‌گیری شدت تابش خورشیدی و دمای صفحه فتوولتائیک

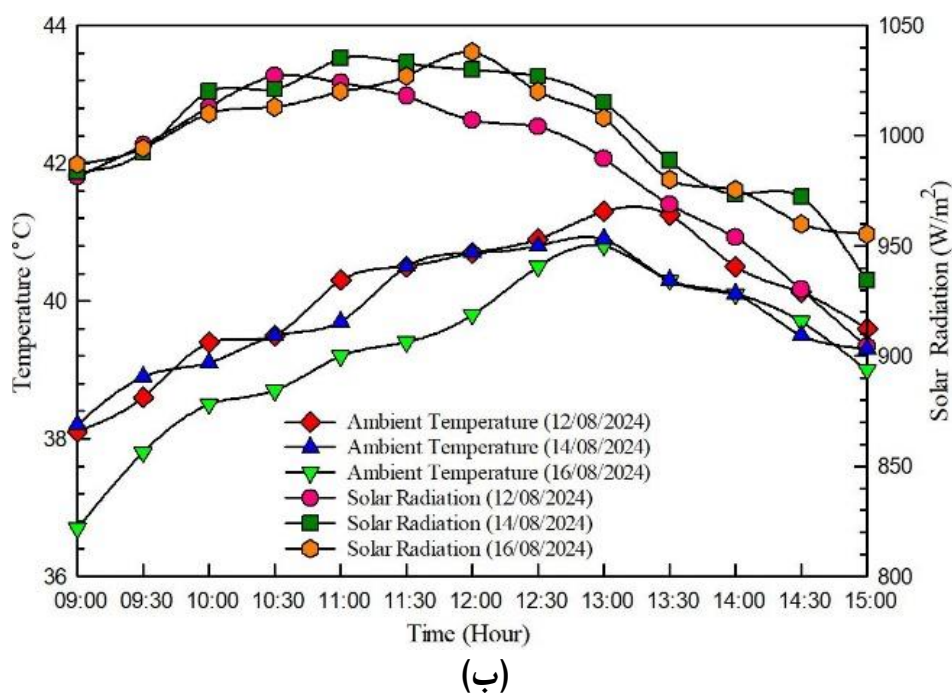
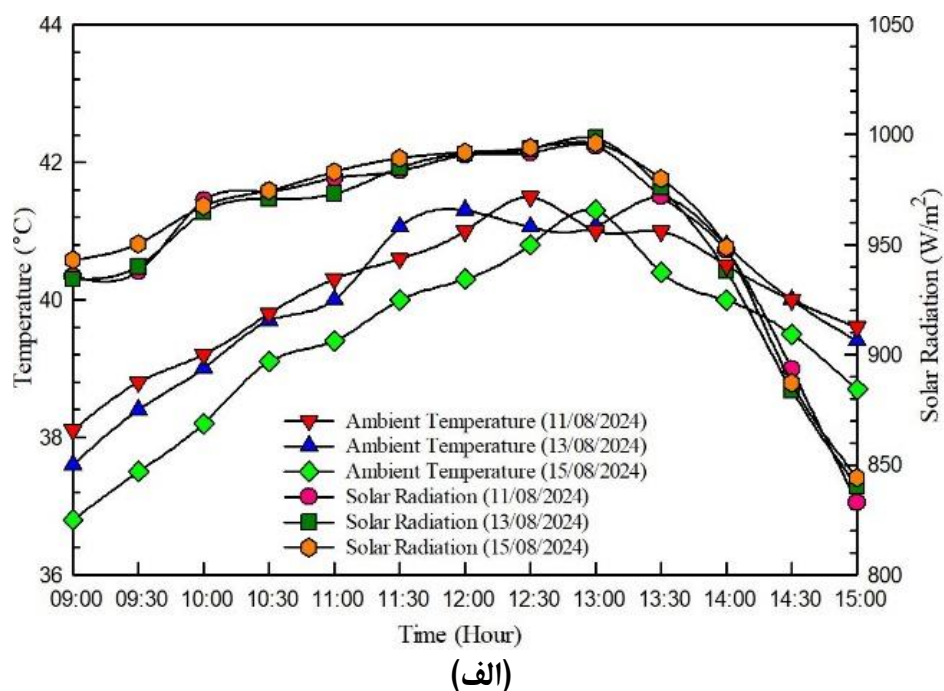
Fig. 5. Different points selected to measure solar radiation intensity and photovoltaic panel temperature

برای دمای محیط و ۹۵۵/۱ وات بر متر مربع را برای شدت تابش خورشیدی نشان دادند، در حالی که حالت دیگر به ترتیب میانگین‌های ۳۹/۷ درجه سانتی‌گراد و ۹۹۵/۷ وات بر متر مربع را نشان داد.

۴-۲- دما و شدت تابش خورشیدی

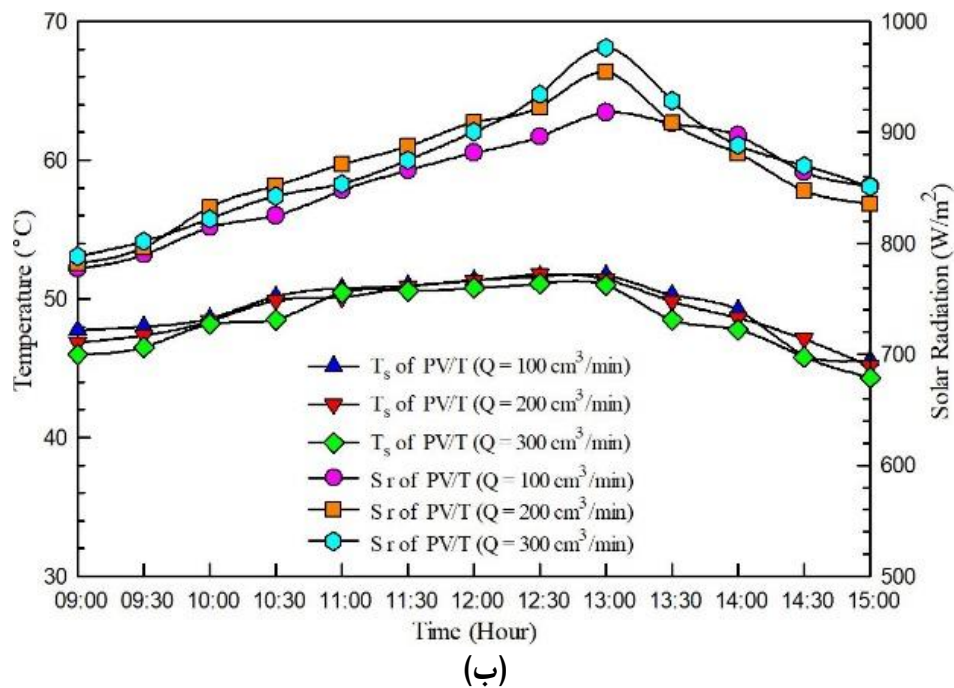
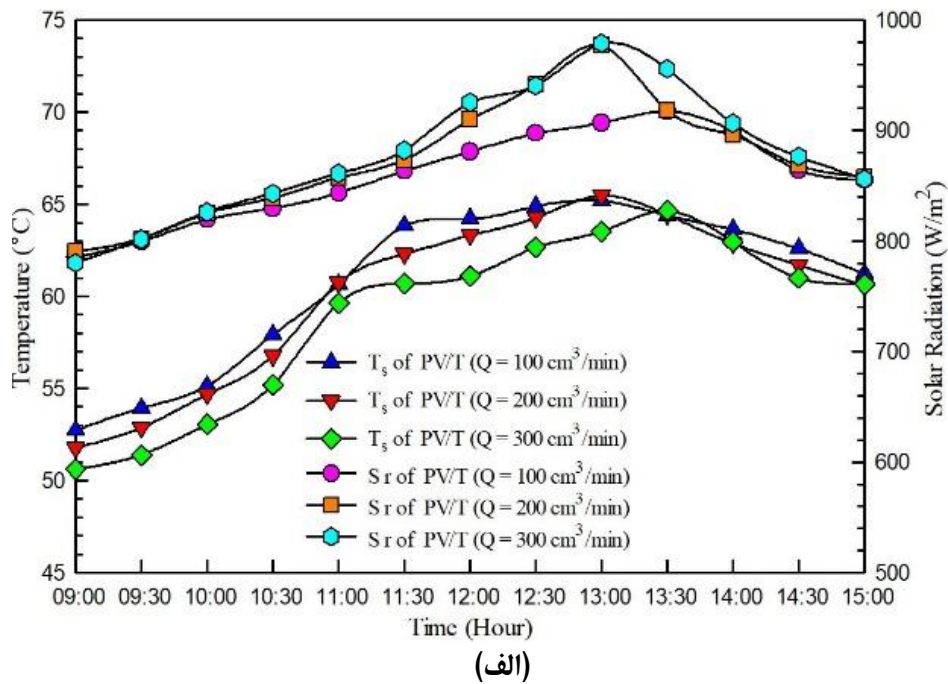
شکل ۷ دما و تابش خورشیدی بر روی سطح گردآورنده را در طول زمان نشان می‌دهد. در سیستم فتوولتائیک/حرارتی، افزایش تابش خورشیدی معمولاً منجر به دمای بالاتر صفحه شد. در مقابل، سیستم ترکیبی کاهش قابل توجهی را هم در دمای آب خروجی و هم در دمای سیستم فتوولتائیک/حرارتی در سه نرخ جریان، ۲۰/۲ درصد کاهش یافت. با توجه به شکل، نتایج ابتدا یک روند صعودی و به دنبال آن یک شیب نزولی را نشان داد. این نشان داد که دمای سطح گردآورنده تحت تأثیر دمای محیط و تابش خورشیدی قرار دارد.

شکل ۸ دمای آب خروجی سیستم فتوولتائیک/حرارتی و ترکیب با ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن را با گذشت زمان نشان می‌دهد. در این سیستم، دمای محیط بالاتر و افزایش تابش خورشیدی معمولاً منجر به



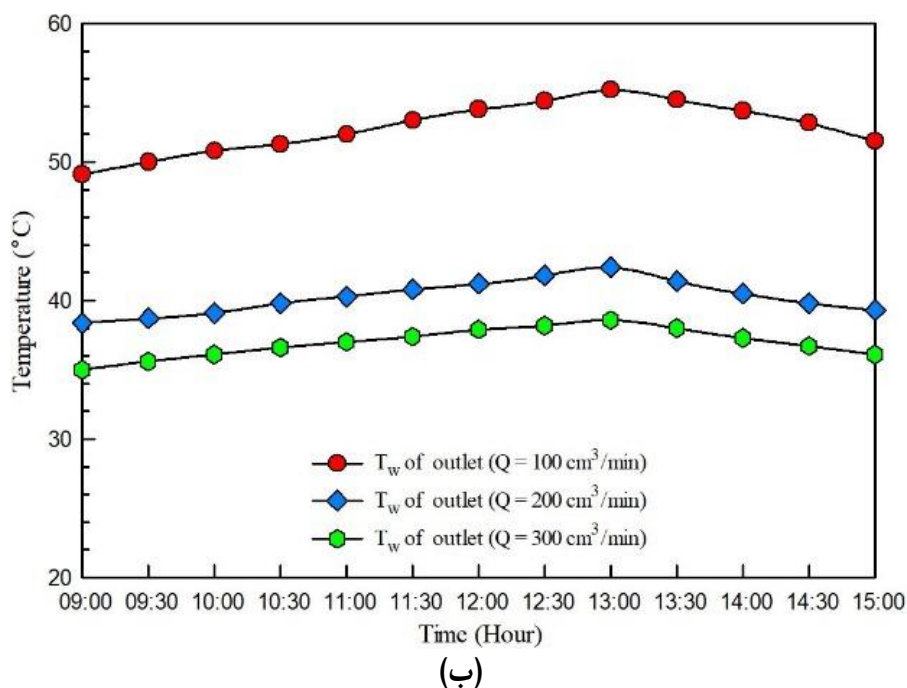
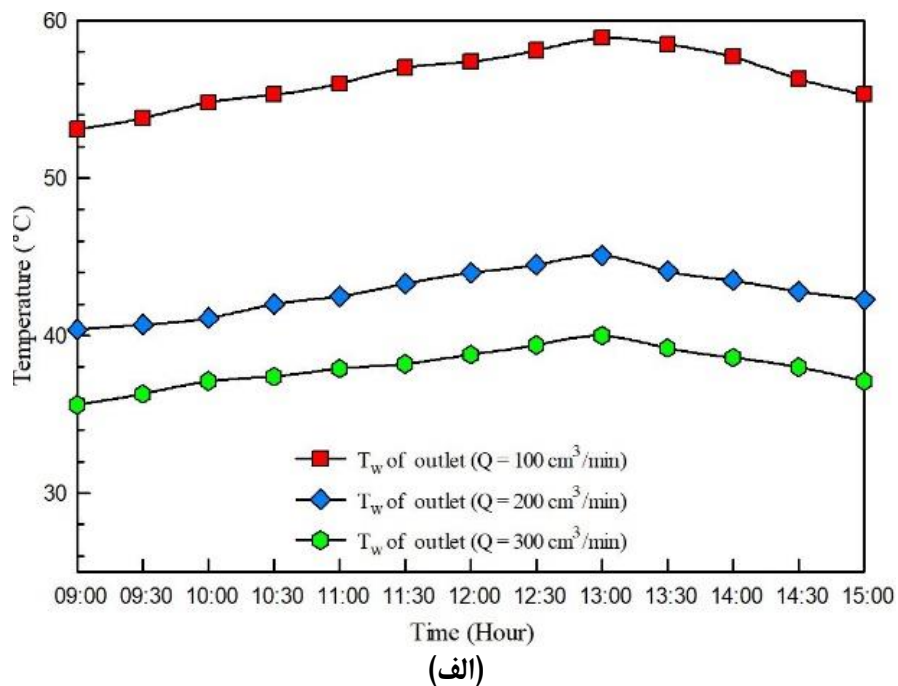
شکل ۶. دمای محیط و شدت تابش خورشیدی (الف) سیستم فتوولتائیک/حرارتی (ب) ترکیب با ترموالکتریک+چاه حرارتی+فن.

Fig. 6. Ambient temperature and solar radiation intensity a) Photovoltaic/thermal system b) Combination with thermoelectric + heat sink + fan.



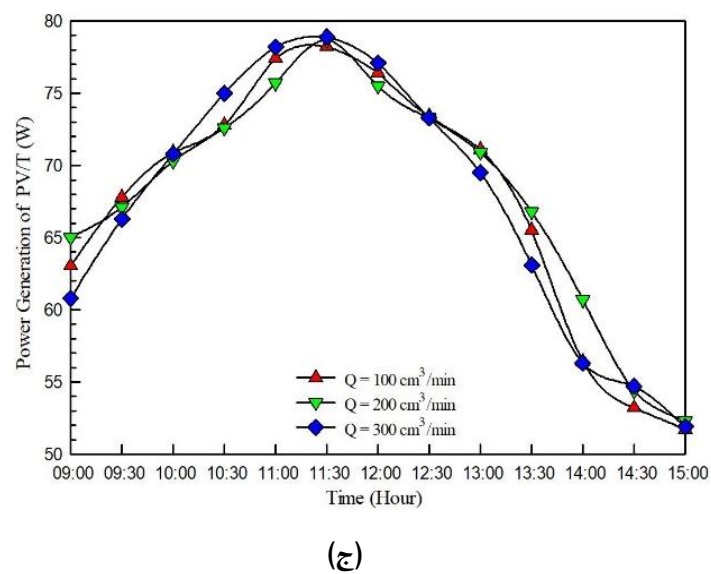
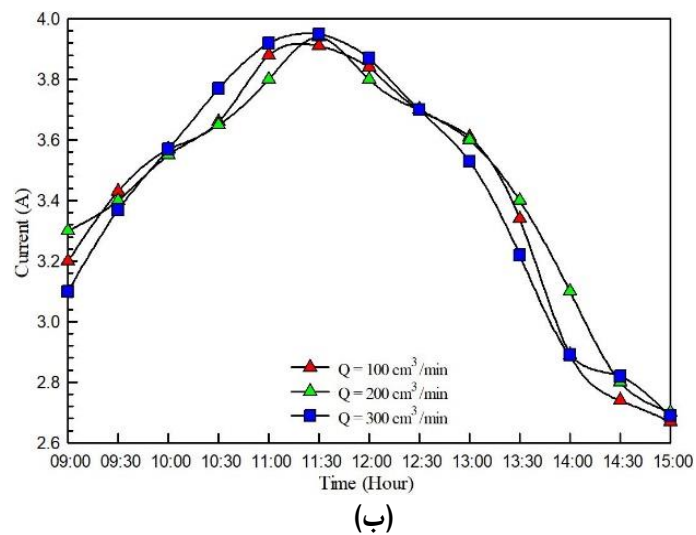
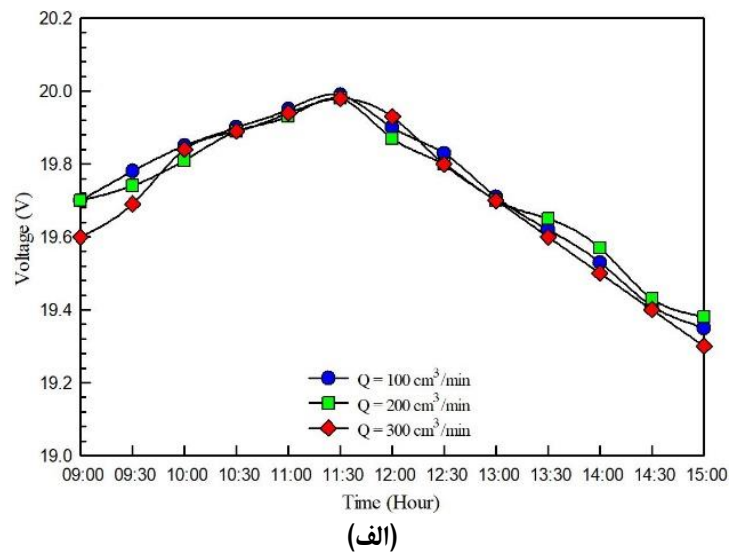
شکل ۷. دما و شدت تابش خورشیدی سطح صفحه الف) سیستم فتوولتائیک/حرارتی ب) ترکیب با ترموالکتریک+چاه حرارتی+فن.

Fig. 7. Temperature and solar radiation intensity of the plate surface a) Photovoltaic/thermal system b) Combination with thermoelectric + heat sink + fan



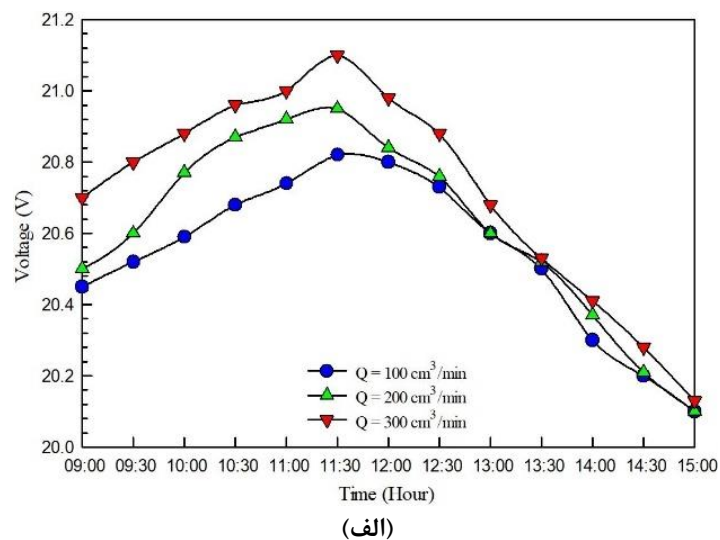
شکل ۸. دمای آب خروجی سیستم فتوولتائیک/حرارتی (الف) سیستم فتوولتائیک/حرارتی (ب) ترکیب با ترموالکتریک+چاه حرارتی+فن

Fig. 8. Outlet water temperature of photovoltaic/thermal system a) photovoltaic/thermal system b) combination with thermoelectric + heat well + fan.

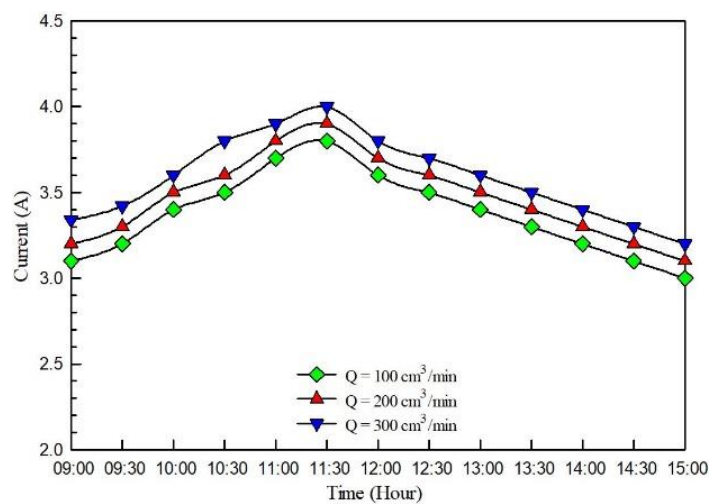


شکل ۹. الف) ولتاژ ب) جریان ج) تولید برق توسط سیستم فتوولتائیک/حرارتی.

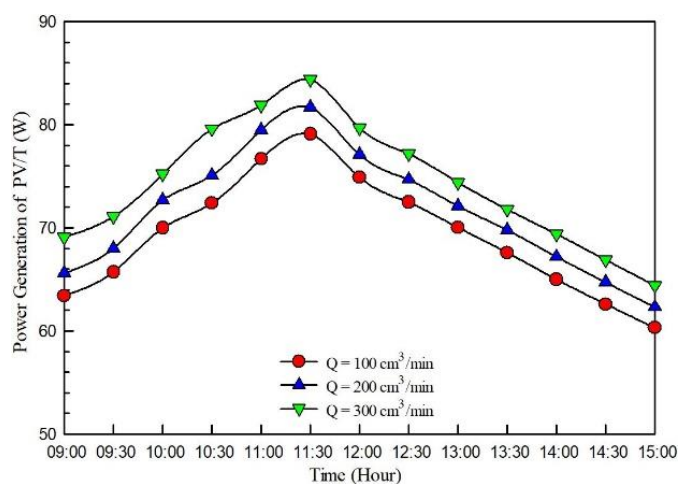
Fig. 9. a) Voltage b) Current c) Electricity generation by photovoltaic/thermal system.



(الف)



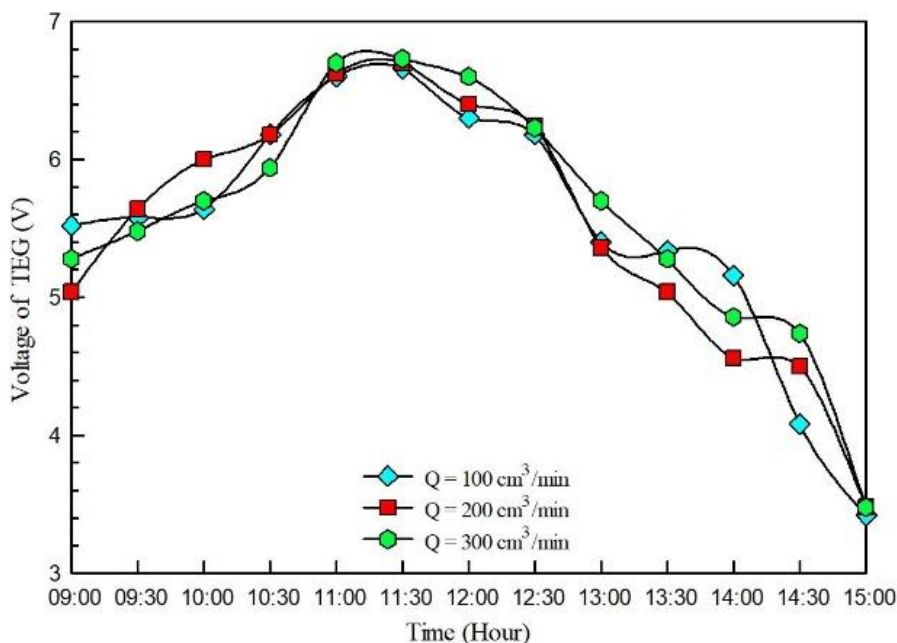
(ب)



(ج)

شکل ۱۰. الف) ولتاژ ب) جریان ج) تولید برق توسط ترکیب ترموالکتریک+چاه حرارتی+فن

Fig. 10. a) Voltage b) Current c) Electricity generation by thermoelectric + heat sink + fan combination.



شکل ۱۱. ولتاژ واحد مولد ترموالکتریک

Fig. 11. Thermoelectric generator unit voltage

شکل ۱۳ تغییرات در راندمان الکتریکی را در طول زمان در نرخ‌های جریان جرمی مختلف در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی و ترکیب با ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن را نشان می‌دهد. در سیستم فتوولتائیک/حرارتی، دمای محیط پایین‌تر و کاهش تابش خورشیدی معمولاً راندمان الکتریکی را افزایش داد. در مقابل، نرخ جریان جرمی بالاتر نیز عموماً راندمان الکتریکی را در هر دو سیستم افزایش داد. علاوه بر این، سیستم ترکیبی افزایش قابل توجهی در راندمان الکتریکی نشان داد. سیستم ترکیبی در مقایسه با سیستم مستقل، راندمان حرارتی را در سه نرخ جریان مختلف به میزان ۲/۴ درصد، ۵/۶ درصد و ۱۱/۲ درصد بهبود بخشید.

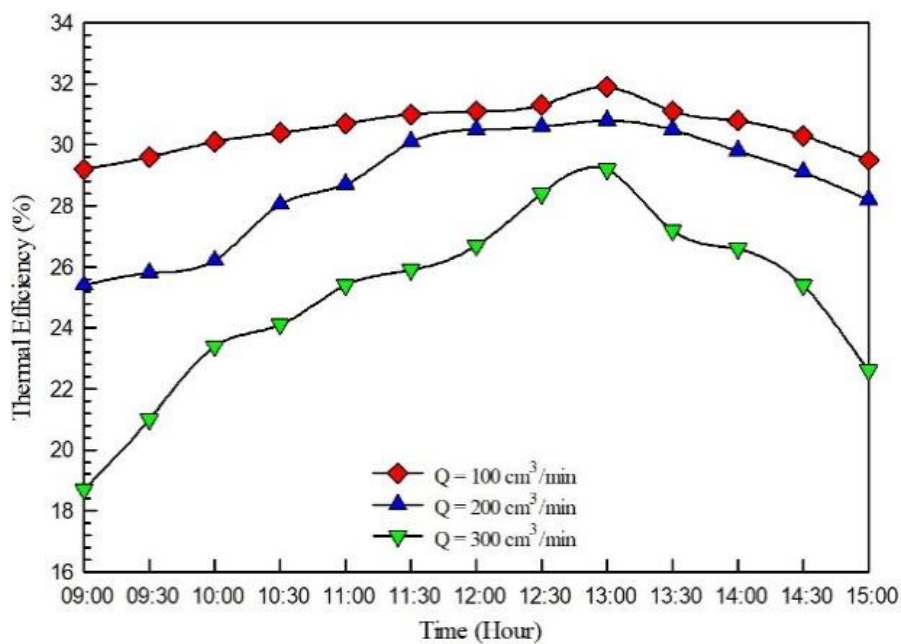
شکل ۱۴ تغییرات عدد ناسلت را برای سیستم فتوولتائیک/حرارتی و ترکیب با ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن نشان می‌دهد. با توجه به شکل، هر دو سیستم بالاترین ناسلت را در ساعت ۱۲:۳۰ تجربه کردند. با این حال، سیستم با ترکیب ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن، تابش و گرمای بیش‌تری از محیط دریافت کرد و میانگین بهبود در سه دبی مختلف ۲۸/۶ درصدی را ثبت کرد. این بهبود در عصر به ۶۳/۸ درصد کاهش یافت زیرا سیستم‌ها به دلیل تبادل گرما با محیط اطراف خود، عملکرد بیش‌تری نشان دادند. با توجه به شکل، هر دو سیستم در ابتدا افزایش عملکرد و سپس کاهش عملکرد را به دلیل انتقال گرما با محیط اطراف خود نشان دادند.

۴-۵- ولتاژ واحد مولد ترموالکتریک

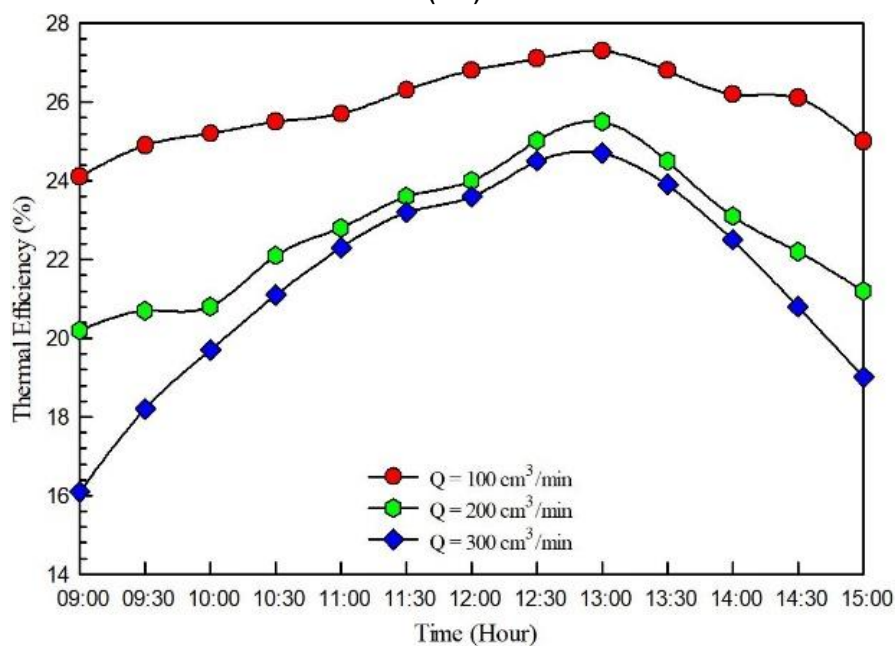
شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییرات ولتاژ واحد مولد ترموالکتریک در طول زمان می‌باشد، که به صورت مستقیم و مدار باز از طریق مولتی‌متر اندازه‌گیری شد. به طور معمول، دمای محیط بالاتر و افزایش تابش خورشیدی منجر به افزایش سطح ولتاژ شد. در مقابل، نرخ جریان بالاتر، تعبیه چاه حرارتی و فن، ولتاژ سیستم را به طور قابل توجهی افزایش داد. حداکثر ولتاژ واحد مولد ترموالکتریک به ترتیب ۶/۶۶ ولت، ۶/۷ ولت و ۶/۷۳ ولت بود.

۴-۶- راندمان حرارتی، الکتریکی و انتقال حرارت سیستم

شکل ۱۲ راندمان حرارتی با گذشت زمان در نرخ‌های جریان جرمی مختلف در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی و ترکیب با ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن را نشان می‌دهد. در سیستم فتوولتائیک/حرارتی، دمای محیط بالاتر و افزایش تابش خورشیدی معمولاً منجر به بهبود راندمان حرارتی شد. برعکس، نرخ جریان بالاتر منجر به کاهش راندمان حرارتی در هر دو سیستم شد. علاوه بر این، سیستم ترکیبی کاهش قابل توجهی در راندمان حرارتی نشان داد. سیستم فتوولتائیک/حرارتی توانست در سه نرخ جریان در مقایسه با سیستم ترکیبی، به ترتیب ۱۶/۳ درصد، ۲۳/۳ درصد و ۱۵/۰۵ درصد راندمان حرارتی را افزایش دهد.



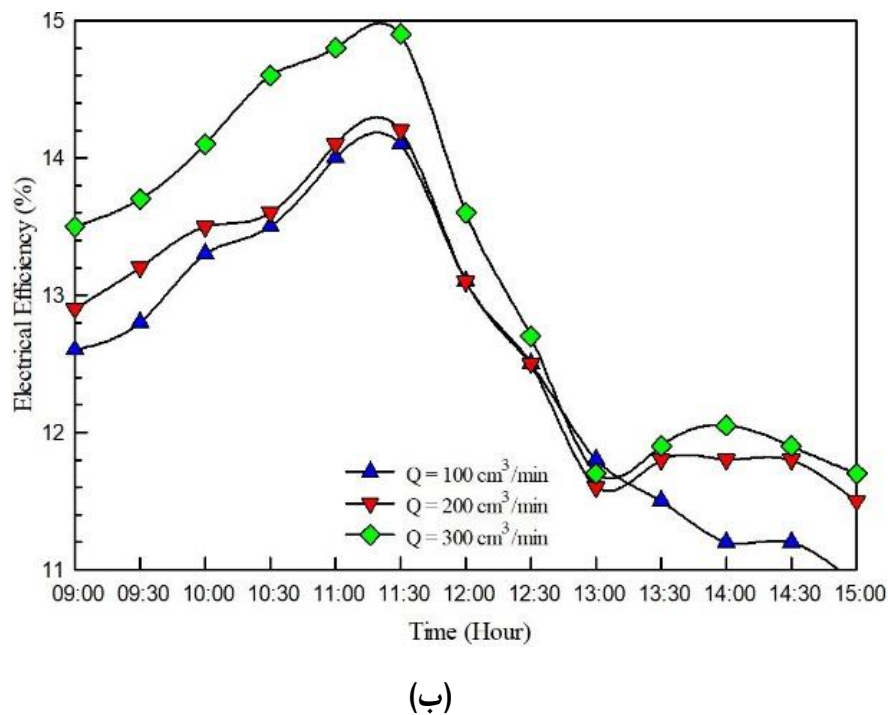
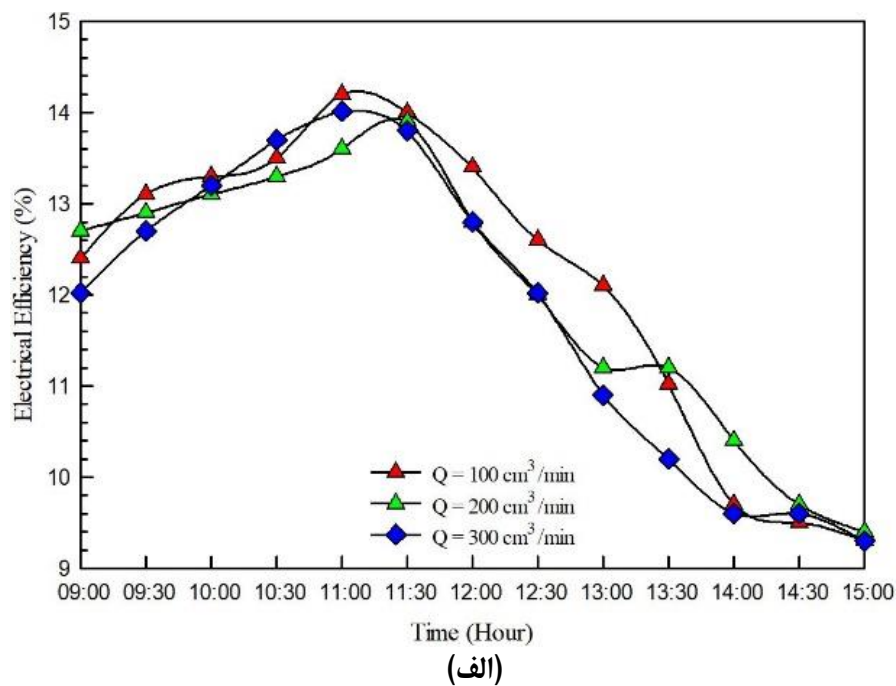
(الف)



(ب)

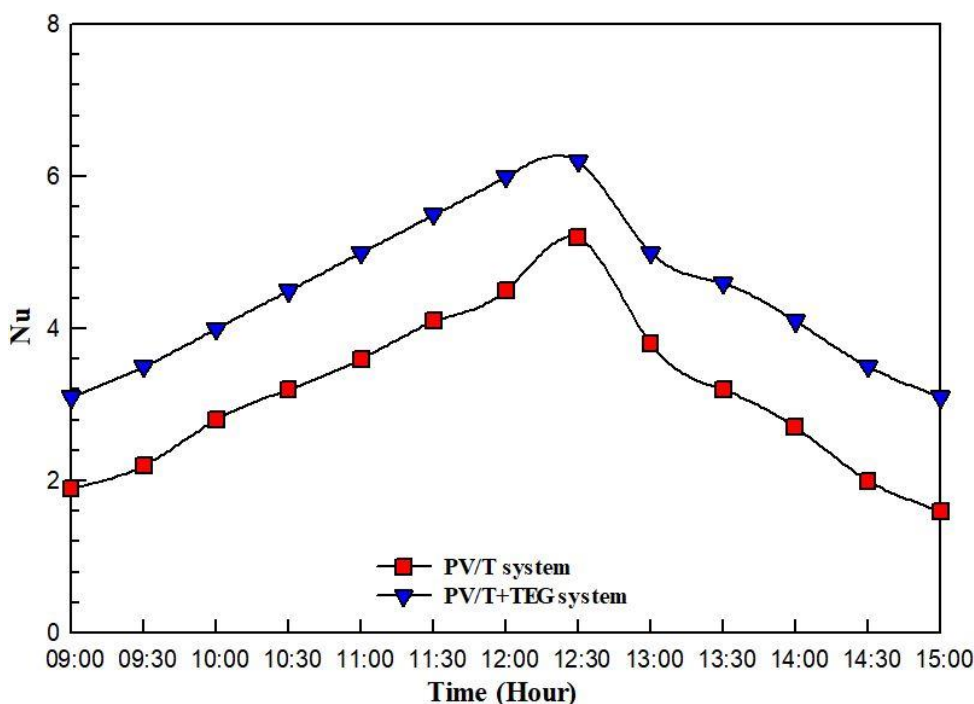
شکل ۱۲. راندمان حرارتی با دبی جرمی مختلف الف) سیستم فتوولتائیک/حرارتی ب) ترکیب با ترموالکتریک+چاه حرارتی+فن

Fig. 12. Thermal efficiency with different mass flow rates a) Photovoltaic/thermal system b) Combination with thermoelectric + heat sink + fan



شکل ۱۳. راندمان الکتریکی با دبی جرمی مختلف (الف) سیستم فتوولتائیک/حرارتی (ب) ترکیب با ترموالکتریک+چاه حرارتی+فن

Fig. 13. Electrical efficiency with different mass flow rates a) Photovoltaic/thermal system b) Combination with thermoelectric + heat sink + fan



شکل ۱۴. تغییرات عدد ناسلت برای سیستم فتوولتائیک/حرارتی و ترکیب با ترموالکتریک، چاه حرارتی و فن.

Fig. 14. Nusselt number variations for photovoltaic/thermal system and combination with thermoelectric, heat sink and fan.

۴-۷- اعتبارسنجی

با توجه به نتایج به دست آمده از این بررسی مشاهده شد که به نتایج مطالعه قبلی [۲۳] همخوانی قابل توجهی دارد. برای اطمینان از صحت و دقت نتایج تجربی، از روش "تجزیه و تحلیل عدم قطعیت" استفاده شد. این روش یک رویکرد استاندارد و پذیرفته شده در تحقیقات تجربی است که به کمی سازی منابع مختلف عدم قطعیت می پردازد و به محققان کمک می کند تا میزان دقت نتایج خود را ارزیابی کنند. جزئیات وسایل مورد استفاده برای اندازه گیری پارامترهای مختلف (مانند شدت تابش خورشیدی، دما، سرعت باد، رطوبت و خروجی الکتریکی) به همراه دقت و عدم قطعیت استاندارد آن ها در جدول ۴ ارائه شد. همچنین، با استفاده از فرمول انتشار عدم قطعیت (معادله ۵)، حداکثر عدم قطعیت در سیستم مورد بررسی محاسبه شده که برابر با ۰/۰۲ درصد شد. این مقدار بسیار پایین نشان دهنده دقت بالای داده های تجربی و قابلیت اعتماد نتایج تحلیل های انجام شده است.

۵- نتیجه گیری

این مقاله یک مطالعه تجربی از یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی مستقل و با واحدهای مولد ترموالکتریک ارائه می دهد. سیستم فتوولتائیک/حرارتی دارای لوله های مسی مارپیچی شکل پوشیده شده با نانوذرات گرافن و یک جاذب مس است. طی شش روز متوالی آزمایش در سمنان، توان خروجی هر دو سیستم در کنار دمای محیط، دمای سطح صفحه، دمای آب، تولید برق و تابش خورشیدی اندازه گیری شد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل هایی از راندمان حرارتی، الکتریکی و انتقال حرارت برای هر دو سیستم انجام شد. این مطالعه یافته های کلی و جزئی زیر را ارائه داد:

- ✓ حداکثر توان تولیدی سیستم مستقل در دبی های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ سانتی متر مکعب بر دقیقه به ترتیب تقریباً ۷۸/۲ وات، ۷۸/۷ وات و ۷۸/۹ وات بود. کل توان تولیدی در دبی های ۳۰۰ سانتی متر مکعب بر دقیقه در مقایسه با ۲۰۰ سانتی متر مکعب بر دقیقه ۰/۲ درصد و در مقایسه با ۱۰۰ سانتی متر مکعب بر دقیقه ۱/۰۲ درصد افزایش یافت.
- ✓ حداکثر توان تولیدی سیستم با واحدهای ترموالکتریک در دبی های

۶- فهرست علائم

علائم انگلیسی	
A	مساحت، m^2
a	دقت ابزارهای اندازه‌گیری
C_p	ظرفیت گرمایی، J/kg.K
D_h	قطر هیدرولیکی، m
G	شدت تشعشع خورشید، W/m^2
k_f	رسانایی حرارتی سیال، W/m.K
Nu	عدد ناسلت
T	دما، $^{\circ}C$
u	عدم قطعیت استاندارد
$\dot{m}$	نرخ جریان جرمی، kg/s

علائم یونانی

η راندمان، %

زیرنویس

c	سلول
el	الکتریکی
f,i	سیال ورودی
f,o	سیال خروجی
mpp	نقطه ماکزیمم توان
oc	اتصال باز
sc	اتصال کوتاه
th	حرارتی
w	دیواره شبکه لوله مارپیچی

منابع

- [1] M.S. Guney, Solar power and application methods, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57 (2016) 776–785.
- [2] A.K. Tiwari, K. Chatterjee, S. Agrawal, G.K. Singh, A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance evaluation and contemporary development, Energy Reports, 10 (2023) 2655–2679.

۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه به ترتیب تقریباً ۷۹/۱ وات، ۸۱/۷ وات و ۸۴/۴ وات بود. کل توان تولیدی در دبی‌های ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در مقایسه با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۳/۲ درصد و در مقایسه با ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۶/۵ درصد افزایش یافت.

✓ حداکثر راندمان حرارتی سیستم مستقل در دبی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۳۱/۹ درصد، در ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۳۰/۸ درصد و در ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۲۹/۲ درصد بود. راندمان حرارتی کل در ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در مقایسه با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۶/۹ درصد و در مقایسه با ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۹/۸ درصد افزایش یافت.

✓ حداکثر راندمان حرارتی سیستم با واحدهای ترموالکتریک در دبی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۲۷/۳ درصد، در ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۲۵/۵ درصد و در ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۲۴/۷ درصد بود. راندمان حرارتی کل در ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در مقایسه با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۳/۲ درصد و در مقایسه با ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۸/۶ درصد افزایش یافت.

✓ حداکثر راندمان الکتریکی سیستم مستقل برای دبی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۴/۲ درصد، برای ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۳/۹ درصد و برای ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۴/۰۱ درصد ثبت شد. راندمان الکتریکی کل در دبی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در مقایسه با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱/۵ درصد و در مقایسه با ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۳/۳ درصد افزایش یافت.

✓ حداکثر راندمان الکتریکی سیستم با واحدهای ترموالکتریک برای دبی ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۴/۱ درصد، برای ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۴/۲ درصد و برای ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۱۴/۹ درصد ثبت شد. راندمان الکتریکی کل در دبی ۳۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه در مقایسه با ۲۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۳/۹ درصد و در مقایسه با ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب بر دقیقه ۵/۴ درصد افزایش یافت.

✓ در پایان با بررسی پارامتر انتقال حرارت، عدد ناسلت هر دو سیستم با مقدار میانگین سه دبی مختلف ۲۸/۶ درصد بهبود را با واحدهای ترموالکتریک نشان داد. این بهبود در عصر به ۶۳/۸ درصد کاهش یافت.

- thermoelectric heat storage system based on phase change temperature control, *Solar Energy*, 274 (2024) 112584.
- [12] Y. Maleki, F. Pourfayaz, M. Mehrpooya, Experimental study of a novel hybrid photovoltaic/thermal and thermoelectric generators system with dual phase change materials, *Renewable Energy*, 201 (2022) 202–215.
- [13] M.A. Fini, D. Gharapetian, M. Asgari, Efficiency improvement of hybrid PV-TEG system based on an energy, exergy, energy-economic and environmental analysis; experimental, mathematical and numerical approaches, *Energy Conversion and Management*, 265 (2022) 115767.
- [14] X. Wen, J. Ji, Z. Li, Z. Song, T. Yao, Performance characterization of a PV/T system employing micro-channel heat pipes and thermoelectric generators: An experimental and numerical study, *Energy*, 264 (2023) 126182.
- [15] Y. Gao, J. Ji, Q. Cui, Z. Dai, B. Chen, C. Wang, D. Wu, G. Xu, X. Zhang, Experimental study on performance assessment of photovoltaic/thermal-thermoelectric generator systems: Bifacial and tandem types, *Energy Conversion and Management*, 295 (2023) 117591.
- [16] F. Rajaei, M.A.V. Rad, A. Kasaeian, O. Mahian, W.-M. Yan, Experimental analysis of a photovoltaic/thermoelectric generator using cobalt oxide nanofluid and phase change material heat sink, *Energy Conversion and Management*, 212 (2020) 112780.
- [17] H. Zhang, H. Yue, J. Huang, K. Liang, H. Chen, Experimental studies on a low concentrating photovoltaic/thermal (LCPV/T) collector with a thermoelectric generator (TEG) module, *Renewable Energy*, 171 (2021) 1026–1040.
- [18] A. Standard, 93-77, Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, The American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Inc., New York, NY, (1977).
- [19] J. Li, X. Ren, W. Yuan, Z. Li, G. Pei, Y. Su, Ç. Kutlu, J. Ji, S. Riffat, Experimental study on a novel photovoltaic thermal system using amorphous silicon cells deposited on stainless steel, *Energy*, 159 (2018) 786–798.
- [3] C. Babu, P. Ponnambalam, The role of thermoelectric generators in the hybrid PV/T systems: A review, *Energy conversion and management*, 151 (2017) 368–385.
- [4] S. Diwania, S. Agrawal, A.S. Siddiqui, S. Singh, Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement, *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(1) (2020) 33–54.
- [5] J. Wu, X. Zhang, J. Shen, Y. Wu, K. Connelly, T. Yang, L. Tang, M. Xiao, Y. Wei, K. Jiang, A review of thermal absorbers and their integration methods for the combined solar photovoltaic/thermal (PV/T) modules, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75 (2017) 839–854.
- [6] S.M.A. Shurafa, F.B. Ismail, H.A. Kazem, T.E. Sann, T.A.H. Almajali, Enhancing Photovoltaic-Thermoelectric Generator (PV-TEG) system performance via mathematical modeling and advanced thermal interface material: An emphasis on Pyrolytic graphite Sheet (PGS), *Solar Energy*, 273 (2024) 112514.
- [7] M. Gopinath, R. Marimuthu, Experimental study of photovoltaic-thermoelectric generator with graphite sheet, *Case Studies in Thermal Engineering*, 54 (2024) 103982.
- [8] J. Wang, Y. Li, B. Yang, L. Jiang, Multi-optimized reconfiguration of hybrid photovoltaic-thermoelectric generation (PV-TEG) system for performance enhancement, *Energy Conversion and Management*, 307 (2024) 118373.
- [9] Q. Wang, C. Yu, T. Li, J. Wang, Y. Liu, Y. Shi, Y. Song, H. Chang, W. Peng, Y. Niu, Enhancing the performance of PVT-TEG power generation systems by heat pipes and Fe₃O₄ nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 319 (2024) 118938.
- [10] A. Khanalizadeh, F.R. Astarai, M.M. Heyhat, M.A.V. Rad, Experimental investigation of a PV/T system containing a TEG section between water-based heat exchanger and air-based heat sink, *Thermal Science and Engineering Progress*, 42 (2023) 101909.
- [11] W. Li, W. Zhao, J. Kan, Q. Dai, S. Li, X. Zhang, J. Zhao, Experimental and numerical study on photovoltaic

- Hernadi, T. Koós, Energy and exergy assessment of photovoltaic-thermal system using tungsten trioxide nanofluid: An experimental study, *International Journal of Thermofluids*, 16 (2022) 100228.
- [23] A.M. Ramezani, A.M. Jadidi, S. Rashidi, Techno-economic and environmental investigation between a low-concentrating photovoltaic thermal collector and a regular photovoltaic flat plate thermal collector, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 155 (2024) 107529.
- [20] S. Preet, Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (2018) 791–807.
- [21] T.N. Anderson, M. Duke, J.K. Carson, Experimental determination of natural convection heat transfer coefficients in an attic shaped enclosure, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(4) (2010) 360–363.
- [22] M. Alktranee, M.A. Shehab, Z. Németh, P. Bencs, K.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

P. Golmohammadpour, A. karimabadi, A. mohammad Jadidi, Experimental Investigation of the Use of Thermoelectric on a Photovoltaic/Thermal System to Increase Efficiency and Heat Transfer, Amirkabir J. Mech Eng., 57(6) (2025) 685-708.

DOI: [10.22060/mej.2025.24538.7881](https://doi.org/10.22060/mej.2025.24538.7881)

