



The University of Tehran Press

Improving the Performance of a Photovoltaic-Thermal Panel by Utilizing Different Geometries

Mohammad Mazidi Sharafabadi^{1*} | Mohammad Khodr Mohammad² | Seyed Mohammad Sadegh MousaviShad³

1. Corresponding Author, Associate Professor of Mechanical Engineering, Research Institute of Petroleum Industry, Tehran, Iran. Email: mazidim@ripi.ir

2. M.Sc. in Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. Email: mohammedkhudhur710@gmail.com

3. M.Sc. in Energy Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. Email: Sadeghmo76@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Paper

Article History:
Received 15 February 2025
Revised 15 March 2025
Accepted 09 April 2025
Published Online 22 June 2025

Keywords:
Photovoltaic-Thermal Panel (PVT),
Fluid Flow Geometries,
Heat Transfer and Energy Efficiency,
Simulation,
Dual-Spiral Configuration.

ABSTRACT

In this paper, various geometries are employed in the design of photovoltaic-thermal (PVT) systems to enhance their performance. The main objective is to investigate the impact of different flow configurations on heat transfer, thermal efficiency, and electrical efficiency of the system. This study examines four types of flow configurations, including the original model with 8 pipes, modified models with 6 and 10 pipes, and a dual-spiral flow configuration. Simulation results obtained using COMSOL software indicate that the dual-spiral flow configuration, when using water as the working fluid, provides the best performance in terms of electrical and thermal efficiency. In this case, the electrical efficiency reaches a maximum of 14.735%, while the thermal efficiency attains 34.164%. These values show a slight improvement compared to other configurations, including the 6-pipe system (14.567 درصد and 30.139%), the 8-pipe system (14.676 درصد and 32.641%), and the 10-pipe system (14.737 درصد and 34.128%). Although the increase in electrical and thermal efficiency is not significantly higher than in other configurations, the results suggest that the dual-spiral configuration can be considered an optimal choice under specific conditions. This study also highlights the importance of proper geometric design in improving the performance of PVT systems and its impact on overall system efficiency. The findings can contribute to the development of innovative technologies and the enhancement of renewable energy system efficiency.

Cite this article: Mazidi Sharafabadi, M.; Khodr Mohammad, M. & MousaviShad, M. S. (2025). Improving the Performance of a Photovoltaic-Thermal Panel by Utilizing Different Geometries. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 4 (3), 339-358. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391817.1126>



© Mohammad Mazidi Sharafabadi, Mohammad Khodr Mohammad, Seyed Mohammad Sadegh MousaviShad
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391817.1126>

1.Introduction

Renewable energies are crucial not only for achieving long-term international and European climate and energy goals, which include transitioning from fossil fuel-based energy supply to zero-carbon energy production, but also for protecting the environment and human health. With growing concerns about global warming and the increasing environmental issues associated with fossil fuel consumption, renewable energy policies and energy efficiency measures are essential to addressing these challenges. A country's energy demand serves as an indicator of its economic development. It is projected that energy consumption will increase by 33 درصد by the year 2030 [1]. Globally, 67 درصد of

electricity production relies on fossil fuel-based power plants, which emit pollutants that contribute to global warming [2]. Therefore, renewable energy sources (RES) have become a vital alternative to meet the significantly rising energy demand in power systems [3]. These sources not only offer environmentally friendly solutions and help meet additional energy demands but also provide exceptional solutions for supplying energy to remote areas, either independently or in combination with other energy sources [4]. This study was conducted during the summer at the Research Institute of Petroleum Industry in Tehran, aiming to investigate the effects of solar radiation, inlet water temperature, and ambient temperature on the performance of a photovoltaic-thermal (PVT) system using various water-based geometries. The research, along with all numerical analyses and data validation, was carried out using COMSOL software. The results indicate that an increase in solar radiation intensity and inlet water temperature leads to a decrease in both the electrical and thermal efficiency of the system. The primary objective of this study is to enhance the electrical and thermal efficiency of PVT panels. The findings suggest that employing different geometric designs can improve the overall performance of these systems. By focusing on a detailed analysis of influencing parameters, this study provides optimization strategies for photovoltaic-thermal systems.

2. Methodology

Boundary Conditions

This problem has been solved for different numbers of pipes as well as varying inlet fluid temperatures. In the modeled system, heat transfer occurs through convection, radiation, and heat transfer from the cell surface to the deep sky. The initial inlet fluid temperature of the panel is assumed to be equal to the ambient temperature. Additionally, a no-slip boundary condition is applied to model the walls. A no-slip wall is a surface where the fluid velocity relative to the wall is zero.

Geometric Modeling

The arrangement of the pipes modeled in the software is shown in Figures (2) and (3). These figures illustrate the collector pipes for the configurations with 8 pipes and the spiral flow design. The dimensions were selected based on common values found in the relevant photovoltaic-thermal (PVT) system catalogs. The aluminum cover layer (Aluminum, box) was modeled separately but is not depicted in the figures. Its thickness, which is 0.7 mm, was only considered in the equations and not illustrated in the diagrams. In the design of this system, the solar cells are compressed between the encapsulating material layers to prevent breakage and contamination. Transparent glass is used on the front surface to allow sunlight to pass through. The EVA layer (Ethylene Vinyl Acetate) is a key component of the solar panel and consists of a highly transparent polymer (plastic) material. Ethylene vinyl acetate is used to encapsulate the cells and hold them in position during manufacturing. EVA materials are highly durable and resistant to extreme temperatures and humidity, playing a crucial role in preventing moisture and dust infiltration, which is essential for the long-term performance of the system. Figure (4) illustrates the structural arrangement of the PVT layers.

3. Results

Mesh Independence

This section examines the mesh independence of the results. Mesh independence is an essential characteristic of any numerical method. As shown in Table (7), simulations were first performed with 2.4 million elements, then with 3.6 million elements, and finally with 5.5 million elements. These three element configurations correspond to the electrical efficiency, thermal efficiency, and overall efficiency. It is observed that the percentage change in each of the efficiencies for all the element configurations is very similar to each other. For example, the overall efficiency values for the three element configurations are 53.15%, 53.12%, and 53.02%, respectively, indicating that the differences are negligible. Therefore, mesh independence is achieved.

Validation

In the nominal case, a power of 800 watts, extracted from the photovoltaic-thermal catalog, is considered. The inlet water temperature is 20°C, and the wind speed is 1 meter per second. the

electrical power corresponds to the electrical efficiency of 15.07 درصد in the relevant catalog, while the electrical efficiency obtained from the software is 15.1%. Therefore, due to the negligible difference between the catalog's original value and the software's result, it can be concluded that the validation is acceptable. Similarly, the validation is also confirmed for the efficiency, as the main efficiency value in the catalog is 56%, while the value obtained in the software is 53.1%. The difference in this overall efficiency is small and acceptable.

Effect of Water Flow Channel Geometry

The main model consists of 8 pipes, which differs from the nominal model in that the incoming heat flux in the main model is 1000 watts. All these configurations have been chosen such that the weight of the copper used in the copper pipes remains constant. In this section, the 10-pipe and spiral models are examined. For the parametric study, the ambient temperature is considered to be 20°C and 30°C, while the inlet water temperature, T_{aT_a} , is set at T_{aT_a} , $T_{aT_a} + 10$, and again $T_{aT_a} + 20$. Summary of the Effect of Ambient Temperature and Inlet Water Temperature on Numerical Results. The numerical results show the thermal efficiency of the system, as well as the inlet fluid temperature and pressure. From the analysis of the results in the following tables, it can be observed that with an increase in ambient temperature, and consequently the heating of the absorber surface, the system's efficiency decreases. This trend also impacts the inlet fluid pressure, as higher ambient temperatures lead to lower inlet pressure. As the number of pipes increases, the inlet fluid pressure also increases, with the highest inlet pressure observed in the dual-spiral pipe configuration. The efficiency does not exhibit significant changes in all four configurations, but in the cases of the 10-pipe and dual-spiral models, the highest efficiency is observed compared to the two initial models.

4. Conclusion

Table 10 presents the numerical results for the 8-pipe photovoltaic-thermal (PVT) system. According to this table, the maximum electrical and thermal efficiencies of this system are 14.676 درصد and 32.641%, respectively, while the overall efficiency at an ambient temperature of 20°C is reported as 47.318%. With an increase in ambient temperature to 30°C, the electrical and thermal efficiencies decreased to 14.119 درصد and 32.437%, respectively. These results indicate that an increase in cell temperature leads to a decrease in both electrical and thermal efficiencies. Table 11 examines the electrical, thermal, and overall efficiencies, along with the average cell temperature, in the 10-pipe PVT system. The results show that the maximum electrical and thermal efficiencies in this configuration are 14.737 درصد and 34.128%, respectively. According to Table 12, for the 6-pipe PVT system, the maximum electrical and thermal efficiencies are 14.567 درصد and 30.139%, with the overall efficiency at an ambient temperature of 20°C reported as 44.715%. This comparison shows that increasing the number of pipes in the PVT system has a positive effect on both electrical and thermal efficiencies, as well as a reduction in the average cell temperature. Table 13 presents the results for the dual-spiral flow configuration. In this case, the maximum electrical, thermal, and overall efficiencies are 14.735%, 34.164%, and 48.9%, respectively. These results show that the dual-spiral flow configuration outperforms all the other configurations investigated. Additionally, the maximum cell surface temperature in the dual-spiral flow at an ambient temperature of 30°C reached 56.329°C, while in the 6, 8, and 10-pipe configurations, the temperatures were 47.14°C, 45.43°C, and 44.39°C, respectively. The improved performance of the dual-spiral flow configuration can be attributed to its larger surface area, which enhances heat transfer and improves heat dissipation in the water flow. These features make the dual-spiral flow configuration an optimal choice for use in photovoltaic-thermal systems.



بهبود عملکرد پنل فتوولتائیک حرارتی با به کارگیری هندسه‌های مختلف

محمد مزیدی شرف‌آبادی^{۱*} | محمد خضر محمد^۲ | سید محمدصادق موسوی شاد^۳۱. نویسنده مسئول، دانشیار مهندسی مکانیک، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران. رایانامه: mazidim@ripi.ir۲. کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. رایانامه: mohammedkhudhur710@gmail.com۳. کارشناس ارشد مهندسی انرژی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران. رایانامه: Sadeghmo76@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه:

پنل فتوولتائیک حرارتی (PVT)،

هندسه‌های جریان سیال،

انتقال حرارت و بهره‌وری انرژی،

شبیه‌سازی،

پیکربندی مارپیچی دوگانه.

در این مقاله، به منظور بهبود عملکرد پنل‌های فتوولتائیک حرارتی (PVT)، از هندسه‌های مختلف در طراحی سیستم استفاده شده است. هدف اصلی، بررسی تأثیر پیکربندی‌های مختلف جریان بر انتقال حرارت، بهره‌وری حرارتی و بازده الکتریکی سیستم بوده است. در این پژوهش، چهار نوع پیکربندی جریان شامل مدل اصلی با ۸ لوله، مدل‌های اصلاح‌شده با ۶ و ۱۰ لوله و پیکربندی جریان مارپیچی دوگانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار کامسول نشان می‌دهد پیکربندی جریان مارپیچی دوگانه هنگام استفاده از آب به عنوان سیال عامل، بهترین عملکرد را از نظر بازده الکتریکی و حرارتی ارائه می‌دهد. در این حالت، بازده الکتریکی به مقدار حداکثر ۱۴/۷۳۵ درصد و بازده حرارتی به مقدار ۳۴/۱۶۴ درصد رسیده است. این مقادیر در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها از جمله سیستم با ۶ لوله (۱۴/۵۶۷ و ۳۰/۱۳۹ درصد)، ۸ لوله (۱۴/۶۷۶ و ۳۲/۶۴۱ درصد) و ۱۰ لوله (۱۴/۷۳۷ و ۳۴/۱۲۸ درصد) افزایش جزئی داشته‌اند. اگرچه این افزایش در بهره‌وری الکتریکی و حرارتی نسبت به پیکربندی‌های دیگر قابل توجه نیست، اما نشان می‌دهد پیکربندی مارپیچی دوگانه می‌تواند در شرایط خاصی به عنوان یک گزینه بهینه انتخاب شود. این مطالعه همچنین اهمیت طراحی هندسی مناسب برای بهبود عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک حرارتی و تأثیر آن بر کارایی کلی سیستم را برجسته می‌کند. یافته‌ها می‌توانند در توسعه فناوری‌های نوین و افزایش بازده سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: نهاوندی، علی و احمدی واحد، حسین (۱۴۰۴). پایداری و ولتاژ شین ریز شبکه جریان مستقیم با کنترل نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌سازهای موجود در ریز شبکه به روش ANFIS. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۴ (۳) ۳۳۹-۳۵۸.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391817.1126>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© محمد مزیدی شرف‌آبادی، محمد خضر محمد، سید محمدصادق موسوی شاد

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2025.391817.1126>

۱. مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر نه تنها برای دستیابی به اهداف بلندمدت اقلیمی و انرژی بین‌المللی و اروپایی که شامل تبدیل تأمین انرژی از منابع فسیلی به تولید انرژی صفر کربن است، بلکه برای حفاظت از محیط زیست و سلامت انسان نیز بسیار مهم هستند. با توجه به نگرانی‌های فزاینده درباره گرم شدن جهانی و مسائل فزاینده‌ای که با اثرات زیست‌محیطی مرتبط با سوخت‌های فسیلی همراه است، اهداف و سیاست‌های انرژی تجدیدپذیر و کارایی انرژی به طور قطع برای مقابله با این مسائل حیاتی هستند. تقاضای انرژی یک کشور معیاری از توسعه اقتصادی آن است. پیش‌بینی می‌شود که مصرف انرژی در سال ۲۰۳۰ به میزان ۳۳ درصد افزایش یابد [۱]. در سطح جهانی، ۶۷ درصد از تولید برق به نیروگاه‌های مبتنی بر سوخت وابسته است که گازهای آلاینده‌ای تولید می‌کنند که موجب گرمایش جهانی می‌شوند [۲]؛ بنابراین، منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) به یک جایگزین حیاتی برای افزایش چشمگیر تقاضای انرژی در سیستم‌های برق تبدیل شده‌اند [۳]. این منابع نه تنها دوستدار محیط زیست هستند و تقاضای اضافی انرژی را تأمین می‌کنند، بلکه راه‌حل‌های فوق‌العاده‌ای برای تأمین انرژی مناطق دورافتاده با استفاده از منابع انرژی مختلف به طور مستقل یا ترکیبی از دیگر انواع منابع انرژی ارائه می‌دهند [۴]. به تازگی، در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های فتوولتائیک (PV) به دلیل عملیات ساده، هزینه کم یا متوسط اجرای آن‌ها و توسعه‌های گسترده در تولید و کنترل آن‌ها، به فناوری‌های غالب تبدیل شده‌اند [۵]. عملکرد سیستم فتوولتائیک برای نخستین بار در سال ۱۹۵۳ در آزمایشگاه‌های بل پیشنهاد شد که در آن از شکاف باند نیم‌رسانا برای تبدیل نور خورشید به برق استفاده شد [۶]. از آن زمان، تلاش‌های زیادی توسط محققان برای ایجاد روش‌های مدرن در تولید سلول‌های فتوولتائیک انجام شده است [۷].

رحمان و همکاران [۸] طی پژوهشی دمای سطح، گردوغبار انباشته شده و موقعیت تابش از جمله عواملی هستند که بر عملکرد ماژول‌های فتوولتائیک (PV) تأثیر می‌گذارند. برخی دیگر از عوامل مؤثر بر عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک شامل شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPIs) هستند. برخی از این شاخص‌ها شامل تلفات ناشی از شرایط جوی، کابل‌ها، سایه‌ها، اتصال‌ها و مدارها هستند. تحلیل نقطه حداکثر توان نیز یکی از عوامل مهم است و به طور کلی این شاخص‌ها عملکرد خارجی سیستم را تعیین می‌کنند. در میان این تأثیرات، دمای سطح ماژول PV مهم‌ترین پارامتر است، چراکه افزایش ۱ درجه سلسیوس دمای سطح موجب کاهش کارایی ۰/۴۰ تا ۰/۶۵ درصدی می‌شود. سو و همکاران [۹] و همچنین افزایش بیش از حد دما می‌تواند ساختار مواد PV را تخریب کند و عمر عملیاتی آن را کاهش دهد. کورنیک و همکاران [۱۰] کنترل دمای سطح PV از طریق توسعه تکنیک‌های خنک‌سازی و دستیابی به عملکرد بهینه با استفاده از فناوری خنک‌سازی انتخابی، امری ضروری شده است. بسیاری از روش‌ها و تحقیقات توسط محققان مختلف با استفاده از فرایندهای خنک‌سازی فعال و یا غیرفعال پیشنهاد و ارزیابی شده‌اند. لیانگ و همکاران [۱۱] طی پژوهشی به طور تجربی یک جمع‌کننده PV/T پر شده با گرافیت و ردیف لوله‌های قرار گرفته در پشت آن را ارزیابی کردند. نتایج پژوهش یادشده نشان داد کارایی الکتریکی متوسط سیستم PV/T برابر با ۶/۴۶ درصد است، در حالی که برای سیستم PV معمولی ۵/۱۵ درصد بود. حسین و همکاران [۱۲] طی پژوهشی کارایی حرارتی یک جمع‌کننده PV/T مبتنی بر آب با جذب‌کننده مارپیچی دوطرفه را مطالعه کردند. گزارش شده است که کارایی حرارتی آن بسیار بالا (۷۴/۶ درصد) بوده و ۵/۷۶ درصد بهبود در کارایی الکتریکی نسبت به سیستم PV معمولی دارد. بلوس و تزیوانیدیس [۱۳] طی پژوهشی نوعی سیستم تولید هم‌زمان انرژی (کوجنراسیون) پیشنهاد دادند که شامل جمع‌کننده‌های PV/T و یک پمپ حرارتی است که توسط این جمع‌کننده‌ها هدایت می‌شود. نتایج پژوهش یادشده نشان داد R32 مناسب‌ترین مایع انتقال حرارت برای سیستم پیشنهادی است. کارایی انرژی و اگزرژی متوسط روزانه برای یک روز نماینده در ماه ژانویه در آتن، یونان، به ترتیب ۶۰/۵۳ درصد و ۹/۲۶ درصد بود. کوا و همکاران [۱۴] طی پژوهشی از روش تاگوچی همراه با روش تحلیل سلسله‌مراتبی برای پیش‌بینی مقدار ایده‌آل شرایط کاری مانند نرخ جریان، تعداد لوله‌های جمع‌کننده و زاویه سطح استفاده کردند. آن‌ها توانستند پس از بهینه‌سازی، دمای سطح را ۱۰ درجه سانتی‌گراد کاهش دهند. در تحقیق دیگری، ارسلان و همکاران [۱۵] یک سیستم PVT را از دیدگاه‌های انرژی و اگزرژی با استفاده از هر دو روش عددی و تجربی بررسی کردند. اگرچه ماژول‌های PVT عملکرد کلی بهتری نسبت به سیستم‌های PV تنها دارند، هنوز برخی مشکلات در استفاده از سیستم‌های PVT وجود دارد. یکی از این مشکلات، یخ زدن مایع

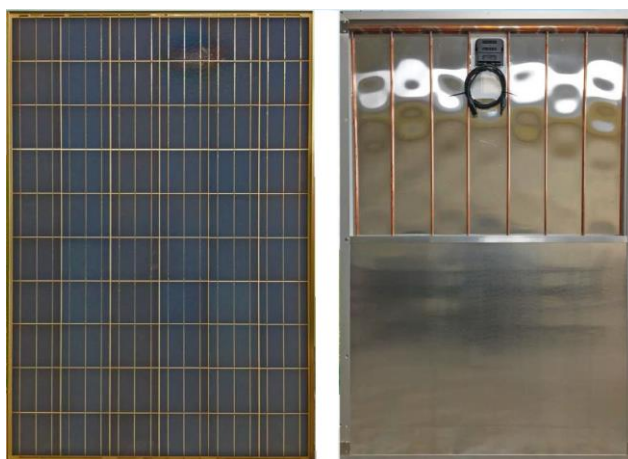
خنک‌کننده در مناطق سرد است. علاوه بر این، سیستم PVT قابلیت ذخیره انرژی را ندارد. ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند به‌ویژه زمانی مفید باشد که هزینه‌ها و مصرف انرژی را کاهش دهد. یون و همکاران [۱۶] تجزیه و تحلیل عملکرد مبدل‌های حرارتی افقی مختلف را از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی انجام دادند. علاوه بر این، از طریق تحلیل هزینه، تأیید شد که از بین مبدل‌های حرارتی افقی، نوع خط افقی بیشترین فضای نصب را نیاز دارد، اما بهترین عملکرد را نسبت به طول لوله‌کشی واحد و کمترین هزینه نصب دارد. داسار و سها [۱۷] طی پژوهشی نشان دادند هندسه حلزونی مبدل‌های حرارتی افقی بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر هندسه‌ها دارد و تحقیقاتی را به منظور یافتن هندسه بهینه برای مساحت پایه و میزان اتلاف انرژی حرارتی میانگین در یک روش محاسباتی گسترش دادند. کیم و همکاران [۱۸] طی پژوهشی معادله‌ای برای تعیین طول ترنج مبدل حرارتی مارپیچ افقی پیشنهاد کردند که معادله طراحی برای مبدل حرارتی عمودی که توسط کاوانا و رافرتی [۱۹] پیشنهاد شده بود را اصلاح کرده است. در این معادله، پالس‌های حرارتی به سه دسته بلند، متوسط و کوتاه مدت تقسیم شدند با معرفی مقاومت حرارتی زمین و توسط شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) تأیید شد. این مطالعات قبلی اثربخشی مبدل‌های حرارتی مارپیچ افقی را اثبات کرده‌اند، اما به عملکرد حرارتی ناشی از تغییرات قطر مارپیچ و هندسه مربوط به گام توجه نکرده‌اند.

این مطالعه تابستان در پژوهشگاه صنعت نفت، شهر تهران با هدف بررسی تأثیر تابش‌های خورشیدی، دمای آب ورودی و دمای محیط بر عملکرد سیستم فتوولتائیک - حرارتی (PVT) با استفاده از هندسه‌های مختلف مبتنی بر آب انجام شده است. این پژوهش و تمامی تحلیل‌های عددی مرتبط و صحت‌سنجی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار کامسول انجام شده است. نتایج نشان داده‌اند با افزایش شدت تابش خورشیدی و دمای آب ورودی، بازده الکتریکی و حرارتی سیستم کاهش می‌یابد. هدف اصلی این پژوهش، افزایش راندمان الکتریکی و حرارتی پنل‌های PVT است. یافته‌ها نشان می‌دهند استفاده از طراحی‌های هندسی متفاوت می‌تواند به بهبود عملکرد کلی این سیستم‌ها کمک کند. این مطالعه با تمرکز بر تحلیل دقیق پارامترهای تأثیرگذار، راهکارهایی برای بهینه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی ارائه کرده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. معرفی پنل مورد مطالعه

در این مطالعه از یک سیستم پنل فتوولتائیک حرارتی که در شکل ۱ مشخص شده، برای شبیه‌سازی استفاده شده است. در جدول‌های ۱ تا ۴ مشخصات هندسی گرمایی و مشخصات ترموفیزیکی لایه‌ها و مشخصات هندسی الکتریکی و همچنین، ضخامت و ضرایب انتشار و جذب پنل مورد بررسی آورده شده است.



شکل ۱. شماتیک پنل فتوولتائیک حرارتی

جدول ۱. مشخصات گرمایی و مکانیکی [۱۴]

مشخصات	کمیت	مقدار
حرارتی	دمای رکود ($^{\circ}\text{C}$)	۹۰/۳
	فشار آزمایشی (Bar)	۱۲
	شار کاری (Bar)	۴
	حداکثر دمای عملیاتی ($^{\circ}\text{C}$)	۸۰
	ضخامت و قطر لوله داخلی (mm)	۸ x ۰/۵
	ضخامت و قطر لوله جمع‌کننده (mm)	۲۲ x ۰/۸
	سطح جاذب (m^2)	۱/۴۸
مکانیکی	سطح کل (m^2)	۱/۶۳
	وزن (kg)	۲۲
	ابعاد (mm)	۴۰ x ۹۹۲ x ۱۶۴۰

جدول ۲. مشخصات ترموفیزیکی لایه‌های مختلف [۲۰]

لایه	گرمای ویژه (J/Kg.K)	چگالی (Kg/M3)	رسانایی گرمایی (W/m.K)
شیشه	۵۰۰	۳۰۰۰	۱/۸
اتیلن وینیل استات	۲۰۹۰	۹۵۰	۰/۳۱۲
سلول پنل	۷۰۰	۲۳۳۰	۱۴۹
تدلاز	۱۲۵۰	۱۲۰۰	۰/۲
صفحه آلومینیوم	۸۸۷	۲۷۰۰	۲۰۶
لوله مسی	۳۸۱	۸۹۷۸	۲۸۷/۷
آب‌خنک کن	۴۱۸۲	۹۹۸/۲	۰/۶

جدول ۳. مشخصات الکتریکی [۱۴]

مشخصات	کمیت	مقدار
پارامترهای الکتریکی در شرایط آزمایشی استاندارد	حداکثر توان (W)	۲۵۰
	جریان اتصال کوتاه (A)	۸/۸۱
	ولتاژ مدارباز (V)	۳۷/۶۸
	نرخ جریان (A)	۸/۳۳
	نرخ ولتاژ (V)	۳۰/۰۳
	بازده ماژول (%)	۱۵/۰۷
پارامترهای الکتریکی در دمای نومینال سلول عملیاتی	حداکثر توان (W)	۱۸۱/۹
	جریان اتصال کوتاه (A)	۶/۹۲
	ولتاژ مدارباز (V)	۳۵/۱
	نرخ جریان (A)	۰/۴۴
	نرخ ولتاژ (V)	۲۸/۲

جدول ۴. ضریب جذب و انتشار و ضخامت لایه‌های مختلف [۲۱]

لایه	قابلیت انتقال	قابلیت جذب	قابلیت انتشار	ضخامت
شیشه	۰/۹۱	۰/۰۰۵	۰/۹۴	۳/۲
اتیلن وینیل استات	۰/۹۳	۰/۰۰۵	—	۰/۵
قسمت فتوولتائیک	۰/۰۹	۰/۸	—	۰/۳
سطح رو به پایین	۰/۹۱	۰/۰۰۵	—	۰/۵
آینه	۰/۹۵	۰/۹۵	—	—
باکس	—	—	۰/۳۱	۰/۷
لوله مسی	—	—	—	۲

۳. معادلات حاکم

۳-۱. معادله پیوستگی

قانون پایستگی (بقا) جرم که جزء قوانین پایه‌ای و بنیادی مکانیک سیالات است به دو دسته پایستگی جرم و پیوستگی جرم تقسیم می‌شود. در خور یادآوری است که پایستگی مربوط به سیستم‌های بسته و پیوستگی مربوط به سیستم‌های باز است. معادله پیوستگی سیستم مورد نظر به صورت رابطه ۱ نوشته می‌شود [22].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot j = \sigma \quad (1)$$

که در رابطه ۱ چگالی جامد $\rho (\frac{kg}{m^3})$ و t زمان است.

۳-۲. معادله بقای مومنتوم

نکته مورد توجه اینکه حالت جریان ضعیف تراکم‌پذیری انتخاب می‌شود چون چگالی ما به دما وابسته است و با دما تغییر می‌کند، معادله‌های آن در ذیل مشخص شده است (معادلات ۲ و ۳) [۲۳].

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-\rho 1 + \kappa] + F \quad (2)$$

در اینجا u میدان سرعت و F نیروی حجمی سیستم است که به معادله تکانه فوق افزوده شده است. پارامتر κ تانسور تنش است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa = \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla u) l \quad (3)$$

که در رابطه ۳ μ ویسکوزیته دینامیکی سیستم است.

۳-۳. معادله انرژی

با در نظر گرفتن یک حجم کنترل و فرض دوبعدی بودن جریان به فرم کلی معادله انرژی به شکل زیر خواهیم رسید (معادله ۴):

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \rho C_p u \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + Q \quad (4)$$

C_p ظرفیت گرمایی جامد در فشار ثابت $(\frac{J}{kg \cdot K})$ ، k ضریب هدایت حرارتی جامد برحسب $(\frac{W}{m \cdot K})$ است، u میدان سرعتی

است که توسط گره مش متحرک تعریف می‌شود.

زمانی که بخش‌هایی از مدل در قاب ماده در حالی که حرکت هستند. همچنین، Q نیز شار منبع حرارتی برحسب وات بر مترمربع است.

۳-۴. بازده حرارتی

بازدهی حرارتی یک سیستم جمع‌کننده خورشیدی عبارت است از: نسبت انرژی حرارتی مفید به تابش خورشیدی به سطح جمع‌کننده که به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود.

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{GA} = \frac{\int \rho c_p n \cdot u T (d\Omega_{out} - d\Omega_{in})}{GA} \quad (5)$$

در این رابطه A مساحت سطح جاذب جمع‌کننده و G تشعشع خورشیدی است. انرژی حرارتی مفید، حاصل تفاضل انرژی ورودی و خروجی سیال است.

۳-۵. بازده الکتریکی

عملکرد الکتریکی پنل های فتوولتائیک موجود در سیستم های فتوولتائیک حرارتی توسط بازده الکتریکی مورد بررسی قرار می گیرد. افزایش بازده الکتریکی سیستم فتوولتائیک حرارتی ارتباط مستقیم با افزایش میزان تشعشع جذب شده توسط پنل های فتوولتائیک و میزان انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری دارد.

بازده الکتریکی سیستم های پنل فتوولتائیک نسبت بیشینه توان خروجی محاسبه شده به تابش خورشیدی دریافتی روی سطح فعال سلول های خورشیدی است.

$$\eta_e = \frac{VI}{GA} \quad (۶)$$

به طوری که در این رابطه I شدت تابش خورشیدی و A مساحت سطح پنل است. با تغییرات دمای پنل توان خروجی پنل تغییر می کند و با افزایش دمای پنل خورشیدی بازده الکتریکی آن کاهش می یابد. همچنین، تغییرات بازده سلول خورشیدی با تغییر دمای سلول را می توان با رابطه γ معین کرد.

$$\eta_e = \eta_c \left[1 - \beta (T_{pv, avg} - 298.15) \right] \quad (۷)$$

که در آن ضریب دمایی بازده سلول خورشیدی است که به صورت تجربی محاسبه می شود و مقدار آن 0.045% گزارش شده است. در کاتالوگ پنل فتوولتائیک حرارتی مقدار $P_{mpp} = -0.37\%/K$ است؛ درواقع انرژی الکتریکی استفاده شده توسط پنل را به صورت منبع حرارتی از قسمت انتقال حرارت کسر شده است.

$$\eta_e = p_0 - \frac{Q_0}{I_0} [1 - 0.37\% (T_{pv, avg} - 298.15) / V_{cell}] \quad (۸)$$

$$q_e = \eta_e \tau_g \alpha_{pv} G(t) \quad (۹)$$

دمای سطح پنل برابر است با انتگرال دما روی حجم کل پنل که در آن منظور از حجم کل سلول حاصل ضرب مساحت مؤثر در ارتفاع سلول فتوولتائیک است.

$$T_{Cell} = \int \frac{T}{V_{Cell}} dV \quad (۱۰)$$

$$V_{Cell} = A_{eff} \times h_{pv} \quad (۱۱)$$

اضافه کردن مقدار دمای حجمی سیال در خروجی نیز ضروری است، یعنی $T_{bulk} = \frac{\int \vec{u} \cdot \vec{n} T d\Omega}{\int \vec{u} \cdot \vec{n} d\Omega}$ که مبین دمای تجربی در خروجی است. ($\vec{u} \cdot \vec{n}$ بردار سرعت در بردار نرمال سیال خروجی است) درنتیجه اختلاف دمای سیال برابر است با:

$$DT = T_{bulk} - T_{in} \quad (۱۲)$$

همچنین در رابطه ۱۲ مقادیر $P_0 = 250$ ، $I_0 = 1000$ و $T_0 = 298.15$ هستند که T_{in} دمای ورودی سیال است.

۳-۶. بازده کلی

بازده کلی از قانون اول ترمودینامیک حاصل می شود و درصدی از انرژی تبدیل شده از تابش خورشیدی را تعیین می کند. بازده کلی به صورت رابطه ۱۳ است:

$$\eta_t = \eta_e + \eta_{th} \quad (۱۳)$$

۳-۷. شرایط مرزی

این مسئله برای تعداد لوله‌های مختلف و همچنین، دمای متفاوت سیال ورودی حل شده است. در سیستم مدل‌سازی شده، انتقال حرارت حاصل از همرفت، تابش و انتقال حرارت از سطح سلول به آسمان عمیق وجود دارد. دمای ورودی سیال اولیه پیل با دمای محیط یکسان در نظر گرفته می‌شود. همچنین، شرایط مرزی بدون لغزش برای مدل‌سازی دیوارها برقرار است. دیوار بدون لغزش دیواری است که در آن سرعت سیال در مقایسه با سرعت دیوار صفر است. شرایط مرزی حرارتی و سرعت به ترتیب در جدول‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.

جدول ۵. شرایط مرزی حرارتی

موقعیت هندسی	معادلات	لایه مرزی
لبه‌های لوله	$-n.q = 0$	عایق بندی
ورودی لوله	$-n.q = \rho \Delta H u . n$ $\Delta H = \int_{T_{in}}^T C_p dT$	دما ثابت
همه سطوح جز ورودی و خروجی سیال و سطح شیشه	$-n.q = q_0$ $q_0 = h_s (T_a - T_s)$ $-n_d . q_d = \frac{(T_u - T_d)}{R_s} + \frac{1}{2} d_s Q_s$ $R_s = \frac{d_s}{K}$ $K = \frac{d_s}{\sum_{kj} \frac{d_{sj}}{k_j}}, \quad d_s = \sum d_{sj}$	جریان حرارتی همرفتی
قاب پانل	$-n.q = q_0$ $q_0 = \varepsilon_g \sigma (T_{sky}^4 - T_s^4)$	تابش سطح به محیط
سطح بالای پیل فتوولتائیک به آسمان	$-n.q = q_0$ $q_0 = \varepsilon_g G$	انتقال حرارت تشعشعی
سطح بالایی پیل فتوولتائیک		

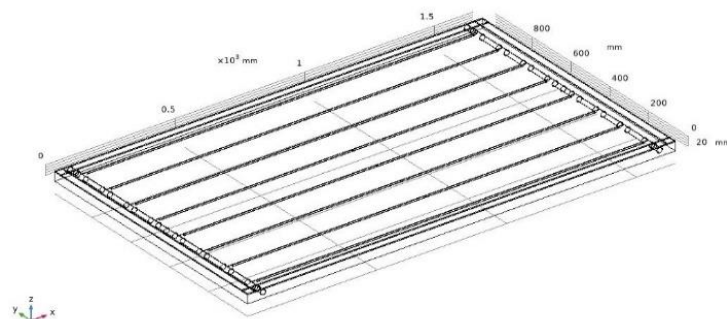
جدول ۶. شرایط مرزی سرعت

موقعیت هندسی	معادلات	لایه مرزی
تمام لوله‌های دیواره	$u = 0$	دیواره
ورودی لوله	$Q = - \int_{\Omega_{in}} u . n . ds = 0.5 \left(\frac{l}{\min} \right)$	نرخ جریان ثابت
خروجی لوله	$p = 0$	فشار میانگین

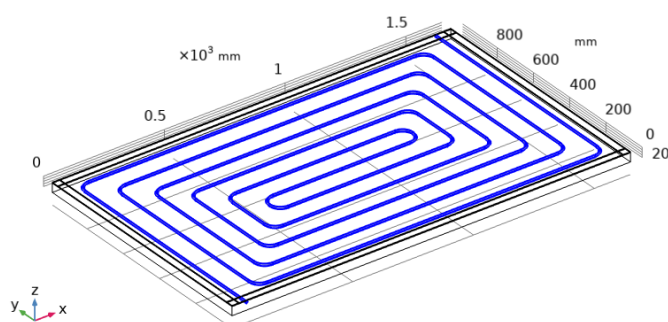
۴. مدل‌سازی هندسی

آرایش لوله‌های مدل‌سازی شده درون نرم‌افزار در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است. لوله‌های جمع‌کننده برای حالتی که تعداد لوله‌ها ۸ عدد و ماریپیچی است را نمایش می‌دهد. این ابعاد با توجه به مقادیر مرسوم در کاتالوگ فتوولتائیک حرارتی مربوطه انتخاب شده‌اند. لایه مربوط به پوشش آلومینیومی (Aluminum, box) به صورت مجزا مدل شده و رسم نشده است. مقدار ضخامت آن که برابر ۰/۷ است، فقط در معادلات لحاظ شده و در شکل رسم نشده است. در طراحی این سیستم سلول‌ها بین لایه‌های مواد پوشش‌دهنده فشرده می‌شوند تا از شکستن و ورود آلودگی جلوگیری شود. شیشه شفاف برای عبور دادن تابش خورشید در سطح جلویی استفاده می‌شود. لایه EVA یکی از اجزای اصلی پیل خورشیدی و مخفف اتیلن وینیل استات است که با یک لایه پلیمر بسیار شفاف (پلاستیکی) طراحی شده است. اتیلن وینیل استات برای کپسوله کردن سلول‌ها و نگه داشتن آن‌ها

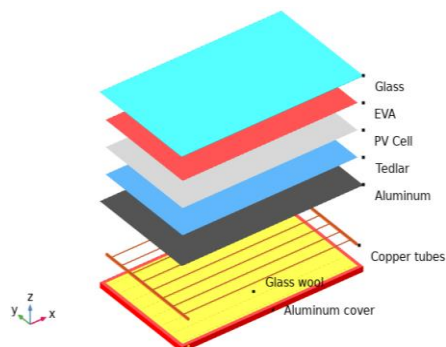
در موقعیت طی تولید استفاده می‌شود. مواد EVA بسیار بادوام و مقاوم در برابر دما و رطوبت بسیار شدید است، بنابراین در جلوگیری از رطوبت و نفوذ خاک، نقش مهمی در عملکرد بلندمدت ایفا می‌کند. در شکل ۴ آرایش ساختار لایه‌های PVT مشخص شده است.



شکل ۲. شماتیک هندسه ۸ لوله‌ای



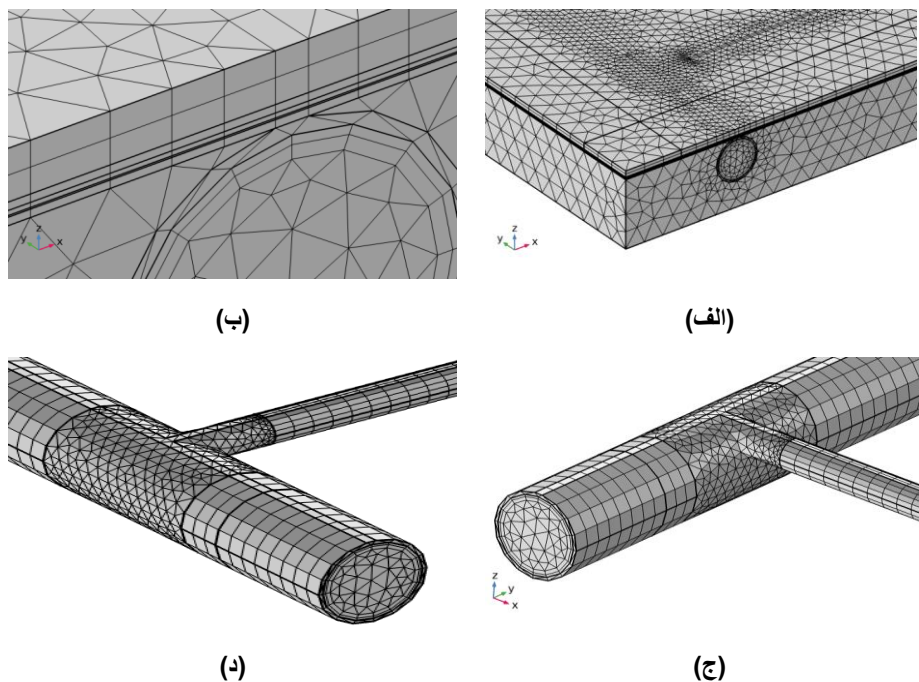
شکل ۳. شماتیک هندسه لوله‌های مارپیچ



شکل ۴. شماتیک ساختار لایه‌های PVT

۴-۱. شبکه‌بندی

در این بخش تصاویر مربوط به شبکه‌بندی یک پنل فتوولتائیک حرارتی در شکل ۵ مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است، مش‌بندی در قسمت‌های انتهایی لوله و محل اتصال لوله‌ها ریزتر از سایر قسمت‌ها است.



شکل ۵. مش‌بندی هندسه مورد بررسی

۵. نتایج و بحث

۵-۱. استقلال از شبکه

در این بخش به بررسی قابلیت استقلال از شبکه پرداخته می‌شود. استقلال نتایج حل از شبکه نیز ویژگی جدایی‌ناپذیر هر روش عددی است. همان‌طور که در جدول ۷ مشاهده می‌شود، ابتدا دو میلیون و چهارصد هزار المان، سپس سه میلیون و ششصد هزار المان و در نهایت پنج میلیون و پانصد هزار المان حل شده است. هر سه المان مشخص شده مربوطه به بازده الکتریکی بازده حرارتی و بازده کلی هستند. مشاهده می‌شود درصد تغییرات هریک از المان‌ها برای تمامی بازده‌ها به یکدیگر نزدیک است؛ برای مثال در بازده کلی برای هر سه المان مقدار بازده ۵۳/۱۵ درصد و ۵۳/۱۲ درصد و ۵۳/۰۲ درصد است که عملاً اختلاف‌ها ناچیز است و در نتیجه، استقلال از مش نیز برقرار شده است.

جدول ۷. درصد تغییرات بازده حرارتی برای تعداد المان‌های مختلف

عناصر	بازده الکتریکی (%)	بازده حرارتی (%)	بازده کل (%)
2431350	۱۵/۱۱۵	۳۸/۰۴۱	۵۳/۱۵۶
3655556	۱۵/۱۱۴	۳۸/۰۰۷	۵۳/۱۲۱
5512834	۱۵/۱۰۹	۳۷/۹۱۱	۵۳/۰۲۱

۵-۲. اعتبارسنجی

در حالت نومینال توان ۸۰۰ وات را که از کاتالوگ فتوولتائیک حرارتی استخراج شده، در نظر گرفته می‌شود. دمای ورودی آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت باد ۱ متر بر ثانیه است. مطابق با جدول ۸ مقدار توان الکتریکی درواقع همان بازده الکتریکی در کاتالوگ مربوطه ۱۵/۰۷ درصد است، اما مقدار بازده الکتریکی به دست آمده از طریق نرم‌افزار ۱۵/۱ درصد است؛ بنابراین به دلیل اختلاف ناچیز بین دو مقدار اصلی کاتالوگ و مقدار به دست آمده از نرم‌افزار می‌توان گفت که اعتبارسنجی آن قابل قبول هست. همچنین، برای بازده نیز این صحت اعتبارسنجی برقرار شده است، چراکه مقدار بازده اصلی در کاتالوگ ۵۶ درصد است که این مقدار در نرم‌افزار ۵۳/۱ درصد به دست آمده و اختلاف در این بازدهی کلی ناچیز و قابل قبول است.

جدول ۸. مقایسه درصد تغییرات بازدهی به‌دست‌آمده در کاتالوگ و نرم‌افزار [۲۴]

مقادیر	بازده الکتریکی (%)	بازده حرارتی (%)	بازده کل (%)
کاتالوگ	۱۵/۱۱۵	۳۸/۰۴۱	۵۶
نرم‌افزار	۱۵/۱۱۴	۳۸/۰۰۷	۵۳/۱۲۱

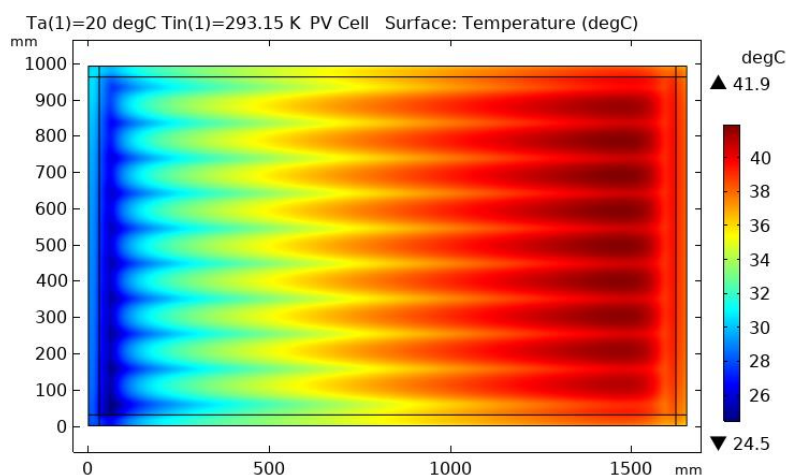
۶. بررسی اثر هندسه راهگاه‌های آب

مدل اصلی ۸ لوله هست که تفاوت آن با مدل نومینال این است که شار ورودی در مدل اصلی ۱۰۰۰ وات است. این‌ها همگی طوری انتخاب شده‌اند که وزن مس به‌کاررفته در لوله‌های مسی یکسان باشد. در اینجا مدل ۱۰ لوله و مارپیچ مورد بررسی قرار گرفته است. برای قسمت بررسی پارامتریک دمای محیط ۲۰ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد و دمای ورودی آب، Ta، Ta+10 و بار دیگر Ta+20 در نظر گرفته می‌شود.

۶-۱. نمودار دمای دوبعدی در سطح شیشه پنل (۱۰ لوله)

۶-۱-۱. بررسی اثر تغییر دمای ورودی آب بر نمودار دمای دوبعدی در سطح شیشه

این بخش نمودار دما ثابت در حالت دوبعدی را نشان می‌دهد. مشخص است که سیال به واسطه مکانیزم انتقال حرارت هدایتی یا رسانش در طول محفظه به دلیل اختلاف گرادیان دما تبادل حرارت می‌کند. برای سلول فتوولتائیک حرارتی شکل ۶ به‌وضوح مشاهده می‌شود که دمای سطح سلول در ورودی آب سردتر از دمای سطح در خروجی آب است. دلیل این امر این است که دمای آب ورودی تا حد امکان پایین و خنک است. سپس دمای سطح سلول طی مراحل به‌تدریج با دریافت تابش نور خورشید از طریق سطح جاذب خود افزایش می‌یابد. درنهایت، تابش دریافت‌شده طی یک فرایند انتقال حرارت به لوله‌های موجود در زیر سطح سلول منتقل شده و باعث افزایش دمای سیال جاری در بین لوله‌ها می‌شود؛ بنابراین در نتیجه این انتقال حرارت دمای سطح سلول نسبت به دمای سیال گرم‌شده به‌تدریج کمتر می‌شود. باید توجه شود که دمای محیط اطراف ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.



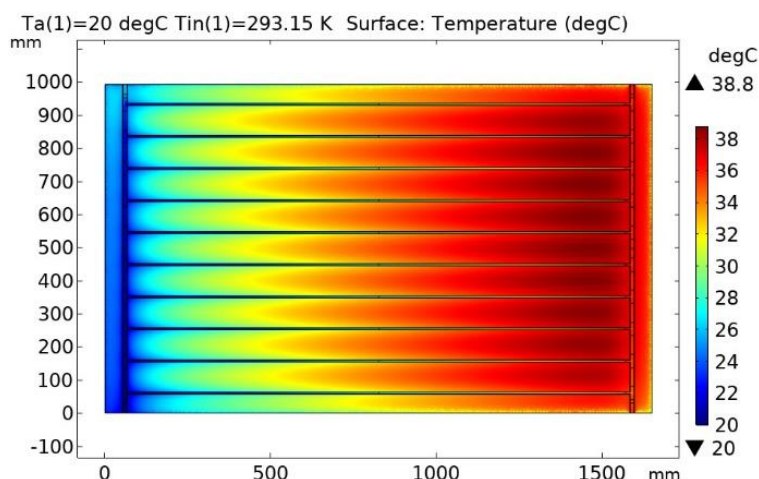
شکل ۶. نمودار دمای سطح شیشه پنل (۱۰ لوله‌ای) با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

۶-۲. نمودار دمای دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده (۱۰ لوله)

۶-۲-۱. نمودار دمای دوبعدی در میانه لوله‌ها و دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد

برای لوله‌های درون سلول فتوولتائیک حرارتی در شکل زیر به‌وضوح در شکل ۷ مشاهده می‌شود که دمای قسمت‌های کناری سطح پنل همان‌جایی که سیال عامل وارد می‌شود سردتر از قسمت‌های دیگر است، چون دمای آب ورودی تا حد امکان پایین است. سپس دمای سطح سلول با دریافت تابش خورشید طی مراحل به‌تدریج افزایش می‌یابد و این حرارت را به لوله‌های موجود

در زیر سطح پنل منتقل می‌کند و باعث جریان یافتن سیال در لوله‌های جمع‌کننده و در نتیجه، بالا رفتن دمای سیال ورودی طی این گردش می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دمای آب ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد است که پس از دریافت حرارت و گردش بین لوله‌ها مقدار دمای آن به بالای ۳۸ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که نسبت به سطح پنل در شکل ۶ به دلیل جذب حرارت از سطح روی پنل زودتر گرم‌تر می‌شود.



شکل ۷. نمودار دما در میانه لوله‌ها (۱۰ لوله‌ای) با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

۳-۶. نمودار سرعت دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده (۱۰ لوله)

۱-۳-۶. نمودار سرعت دوبعدی در میانه لوله‌ها در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد

برای لوله‌های درون سلول فتوولتائیک حرارتی در شکل زیر به‌وضوح مشاهده می‌شود که سرعت در قسمت‌های کناری سطح پنل همان‌جایی که سیال عامل وارد می‌شود کمتر از قسمت‌های دیگر است. سپس سرعت سیال جاری بین لوله‌ها طی گردش با گرم شدن دمای آن به‌تدریج افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، سرعت در قسمت ورودی یا لوله اصلی ورودی در سمت چپ، کمتر است و دلیل آن این است که قطر لوله در آن قسمت بیشتر است. در لوله‌های میانی سرعت بیشتر به دلیل کوچک‌تر بودن قطر لوله، سرعت بیشتر است. در نهایت، طی گرمایش به دلیل کاهش لایه مرزی سرعت حتی ممکن است هنگام مسیر گرمایش در لوله میانی، سرعت اندکی کاهش یابد که البته این مورد الزامی نیست و به موارد دیگر نیز وابسته است.

۴-۶. نمودار دمای دوبعدی در سطح شیشه پنل (مارپیچ)

۱-۴-۶. بررسی اثر تغییر دمای ورودی آب بر نمودار دمای دوبعدی در سطح شیشه

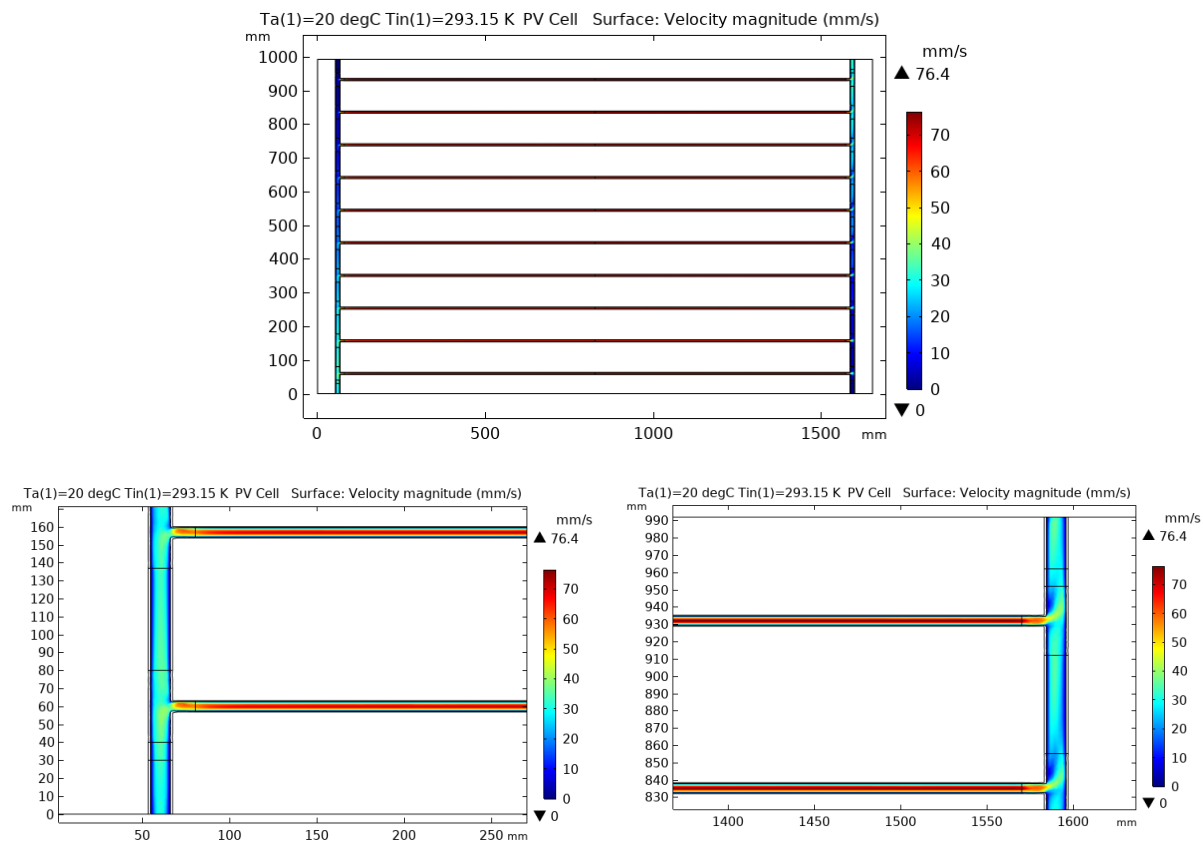
برای سلول فتوولتائیک حرارتی شکل زیر به‌وضوح مشاهده می‌شود که دمای سطح سلول در ورودی آب کمتر از دمای سطح در خروجی آب است. دلیل این امر این است که دمای آب ورودی تا حد امکان پایین و خنک است. در اینجا پس از ورود سیال به درون پنل به‌تدریج دمای سیال جاری بین لوله‌ها بیشتر می‌شود. از شکل ۹ تغییرات افزایش تدریجی دما به دلیل مارپیچ بودن لوله‌های درون کلکتور به‌طور دقیق مشخص است.

۵-۶. نمودار دمای دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده (مارپیچ)

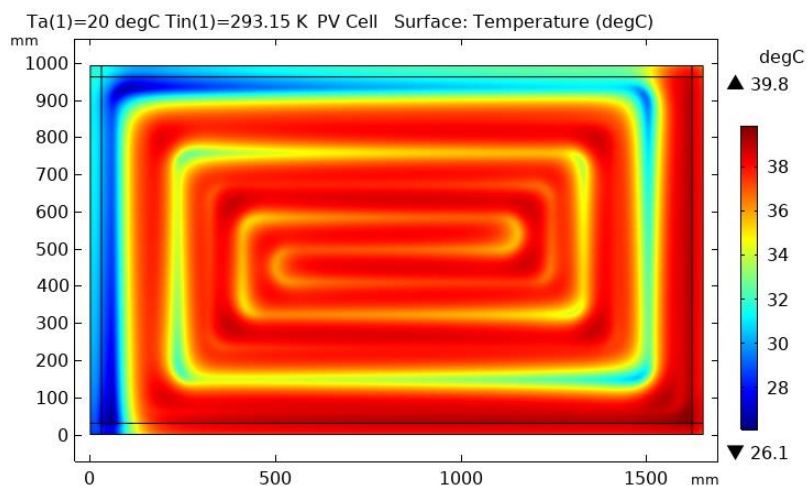
۱-۵-۶. نمودار دمای دوبعدی در میانه لوله‌ها و دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد

در شکل ۱۰ برای تغییرات دمای سیال جریان‌یافته درون لوله‌های کلکتور به‌وضوح مشاهده می‌شود که به دلیل مارپیچ بودن لوله‌های داخلی، روند افزایش دما تدریجی اتفاق می‌افتد. در ابتدای لوله قسمت ورودی سیال کمترین دما را نشان می‌دهد که تقریباً با دمای محیط یکسان است. سپس، با گردش سیال بین لوله‌های کلکتور مقدار آب درون لوله گرم‌تر شده و در نتیجه، افزایش دما مشاهده می‌شود. پس از عبور سیال از بین لوله‌ها در قسمت خروجی سیال بیشترین مقدار دمای ممکن که به بالای

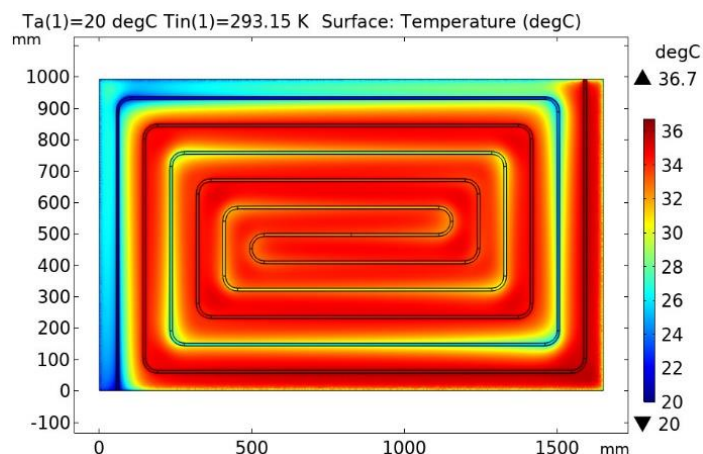
۳۶ درجه می‌رسد را خواهیم داشت. مقدار دمای سیال حاصل در حالت لوله‌های مارپیچ دویل به دلیل وجود موانع در گوشه‌های لوله یعنی قسمتی که به دلیل حالت مارپیچی آن جهت حرکت جریان تعویض می‌شود، کمتر از حالتی است که لوله‌ها به صورت موازی و صاف قرار می‌گیرند.



شکل ۸. نمودار سرعت در میانه لوله‌ها (۱۰ لوله‌ای) با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)



شکل ۹. نمودار دما دویعدی در سطح شیشه پنل مارپیچ با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

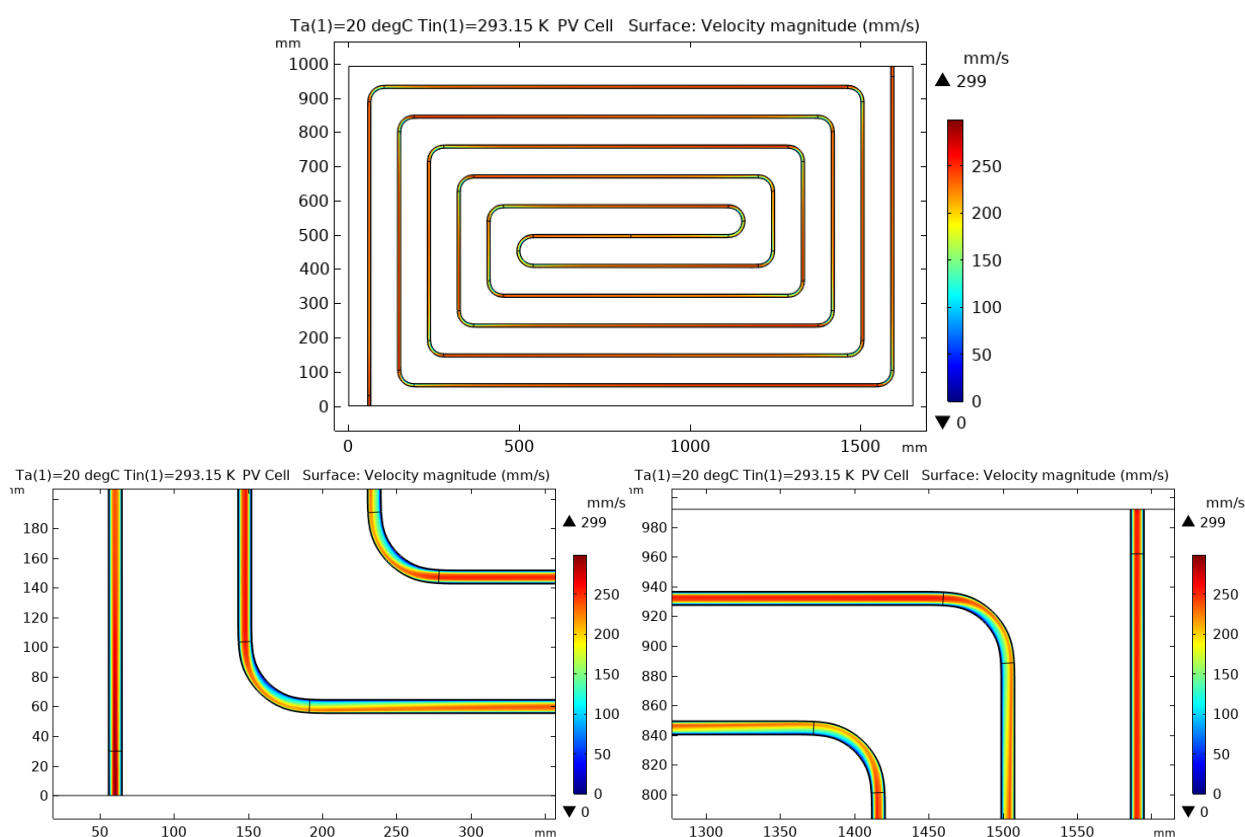


شکل ۱۰. نمودار دما دوبعدی در میانه لوله‌های مارپیچ با دمای سیال ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد)

۶-۶. نمودار سرعت دوبعدی در میانه لوله‌های جمع‌کننده (مارپیچ)

۶-۶-۱. نمودار سرعت دوبعدی در میانه لوله‌ها در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد

در لوله‌های درون سلول فتوولتائیک حرارتی شکل ۱۱ به‌وضوح مشاهده می‌شود که حداکثر سرعت جریان سیال در قسمت مارپیچ قدری کاهش پیدا می‌کند. دلیل این کاهش سرعت این است که به وسیله نیروی گریز از مرکز، سیال به سمت خارج از مرکز متمایل می‌شود و در نتیجه، اندازه لایه مرکزی در خارج از مرکز کوچک‌تر شده و در درون آن بزرگ‌تر می‌شود که در نهایت پروفیل سیال از حالت سهمی خارج می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار سرعت دوبعدی در میانه لوله‌های مارپیچ در دمای آب ورودی ۲۰ درجه سانتی‌گراد

۶-۷. جمع بندی بررسی اثر دمای محیط و دمای ورودی آب بر نتایج عددی

در این بخش جدول های ۹ تا ۱۲ برحسب شرایط دمایی متفاوت برای هندسه های مختلف تنظیم شده است. در این نتایج عددی مقدار بازدهی حرارتی سیستم و همچنین، دما و فشار ورودی سیال نیز مشاهده می شود. از بررسی نتایج جدول های ذیل مشاهده می شود که با بالا رفتن دمای محیط و در نتیجه آن، گرم تر شدن سطح جاذب جمع کننده، مقدار بازده سیستم کاهش می یابد. همچنین، این روند بر فشار ورودی سیال نیز تأثیر می گذارد، چراکه هرچه دمای محیط گرم تر باشد، مقدار فشار ورودی نیز کمتر می شود. هرچه تعداد لوله ها بیشتر شود، مقدار فشار ورودی سیال نیز افزایش می یابد و برای حالت لوله های مارپیچ دابل حداکثر فشار ورودی سیال مشاهده می شود. مقدار راندمان در هر چهار حالت تغییرات به خصوصی نداشته است تنها در دو حالت ۱۰ لوله ای و مارپیچ دابل بیشترین مقدار راندمان نسبت به دو مدل اولیه مشاهده می شود.

جدول ۹. نتایج عددی به دست آمده سیستم فتوولتائیک حرارتی برای مدل اصلی ۸ لوله ای

دمای محیط	دمای ورودی آب	بازده حرارتی	بازده الکتریکی	بازده کل	دمای سطح	اختلاف دمای بالک ورودی و خروجی	فشار ورودی سیال	جرم مس (kg)
	۲۰	۳۲/۶۴۱	۱۴/۶۷۶	۴۷/۳۱۸	۳۵/۵۶۸	۱۵/۳۶۸	۲۶/۸۳	
۲۰	۳۰	۲۳/۶۳۹	۱۴/۳۴۹	۳۷/۹۸۸	۴۱/۳۶۵	۱۱/۱۶۴	۲۳/۳۷	
	۴۰	۱۴/۵۵۹	۱۴/۰۲۳	۲۸/۵۸۲	۴۷/۱۲۷	۶/۹۰۰۷	۲۰/۷۱۹	۲/۲۳۰۶
	۳۰	۳۲/۴۳۷	۱۴/۱۱۹	۴۶/۵۵۶	۴۵/۴۳	۱۵/۳۱۸	۲۲/۳۳	
۳۰	۴۰	۲۳/۲۲۴	۱۳/۷۹۶	۳۷/۰۲	۵۱/۱۴۵	۱۱/۰۰۵	۱۹/۸۹۸	
	۵۰	۱۳/۹۳۱	۱۳/۴۷۵	۲۷/۴۰۶	۵۶/۸۲	۶/۶۲۷۷	۱۷/۹۶۴	

جدول ۱۰. نتایج عددی به دست آمده سیستم فتوولتائیک حرارتی برای مدل ۱۰ لوله ای

دمای محیط	دمای ورودی آب	بازده حرارتی	بازده الکتریکی	بازده کل	دمای سطح	اختلاف دمای بالک ورودی و خروجی	فشار ورودی سیال	جرم مس (kg)
	۲۰	۳۴/۱۲۸	۱۴/۷۳۷	۴۸/۸۶۵	۳۴/۴۹۸	۱۶/۰۶۹	۵۹/۷۳۸	
۲۰	۳۰	۲۴/۷۶۴	۱۴/۳۹۳	۳۹/۱۵۷	۴۰/۵۸۶	۱۱/۶۹۵	۵۱/۹۷۱	
	۴۰	۱۵/۳۳۶	۱۴/۰۵۱	۲۹/۳۸۷	۴۶/۶۳۹	۷/۲۶۹۱	۴۶/۰۳۹	۲/۰۵۴۰
	۳۰	۳۳/۹۳۱	۱۴/۱۷۸	۴۸/۱۰۹	۴۴/۳۹۴	۱۶/۰۲۴	۴۹/۶۱	
۳۰	۴۰	۲۴/۳۴۴	۱۳/۸۳۸	۳۸/۱۸۲	۵۰/۳۹۹	۱۱/۵۳۵	۴۴/۱۵۱	
	۵۰	۱۴/۶۹۱	۱۳/۵۰۱	۲۸/۱۹۲	۵۶/۳۶۶	۶/۹۸۹۱	۳۹/۸۳	

جدول ۱۱. نتایج عددی به دست آمده سیستم فتوولتائیک حرارتی برای مدل ۶ لوله ای

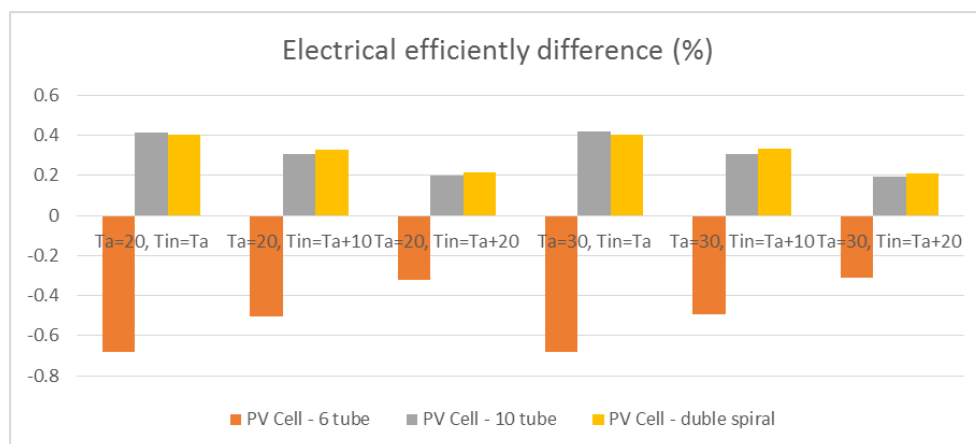
دمای محیط	دمای ورودی آب	بازده حرارتی	بازده الکتریکی	بازده کل	دمای سطح	اختلاف دمای بالک ورودی و خروجی	فشار ورودی سیال	جرم مس (kg)
	۲۰	۳۰/۱۳۹	۱۴/۵۷۶	۴۴/۷۱۵	۳۷/۳۴۱	۱۴/۱۸۸	۱۵/۴	
۲۰	۳۰	۲۱/۶۸	۱۴/۲۷۷	۳۵/۹۵۷	۴۲/۶۳۶	۱۰/۲۳۸	۱۳/۴۰۸	
	۴۰	۱۳/۲۴۷	۱۳/۹۷۸	۲۷/۲۲۵	۴۷/۹۲۸	۶/۲۷۹	۱۱/۸۹۲	۲/۴۰۴۳
	۳۰	۲۹/۹۳۲	۱۴/۰۲۳	۴۳/۹۵۵	۴۷/۱۴	۱۴/۱۳۵	۱۲/۸۲۹	
۳۰	۴۰	۲۱/۲۹۱	۱۳/۷۲۸	۳۵/۰۱۹	۵۲/۳۵۷	۱۰/۰۸۹	۱۱/۴۲۹	
	۵۰	۱۲/۶۵۴	۱۳/۴۳۳	۲۶/۰۸۸	۵۷/۵۶۵	۶/۰۲۰۷	۱۰/۳۲۳	

جدول ۱۲. نتایج عددی به دست آمده سیستم فتوولتائیک حرارتی برای مدل مارپیچی

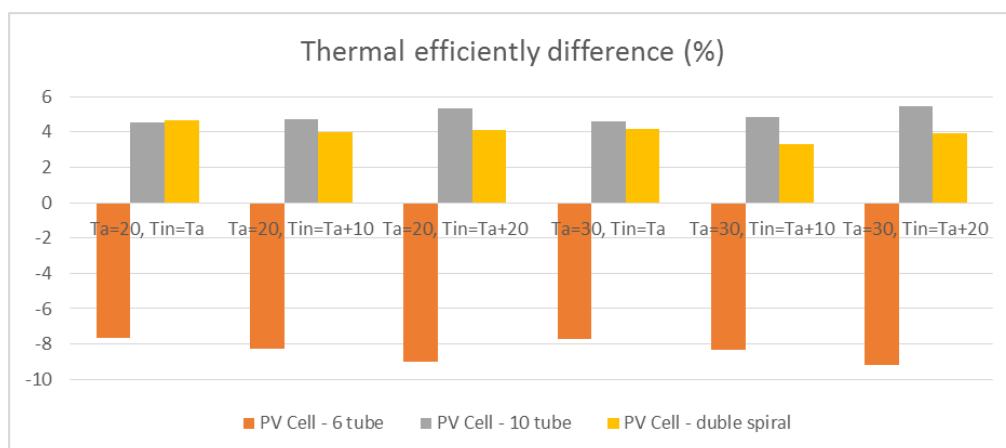
جرم مس (kg)	فشار ورودی سیال	اختلاف دمای بالک ورودی و خروجی	دمای سطح	بازده کل	بازده الکتریکی	بازده حرارتی	دمای ورودی آب	دمای محیط
	۱۲۷۴/۱	۱۶/۰۸۵	۳۴/۵۲۷	۴۸/۹	۱۴/۷۳۵	۳۴/۱۶۴	۲۰	
	۱۱۲۷/۴	۱۱/۶۰۶	۴۰/۵۳۲	۳۸/۹۷۳	۱۴/۳۹۶	۲۴/۵۷۷	۳۰	۲۰
۲/۱۹۳۵	۱۰۰۶/۹	۷/۱۸۳۲	۴۶/۵۹۴	۲۹/۲۰۹	۱۴/۰۵۳	۱۵/۱۵۶	۴۰	
	۱۰۸۰	۱۵/۹۵۹	۴۴/۴۲۲	۴۷/۹۷۱	۱۴/۱۷۶	۳۳/۷۹۵	۳۰	
	۹۷۳/۷۵	۱۱/۳۷۲	۵۰/۳۲۹	۳۷/۸۴۲	۱۳/۸۴۲	۲۴	۴۰	۳۰
	۸۸۳/۱۸	۶/۸۸۸	۵۶/۳۲۹	۲۷/۹۸۲	۱۳/۵۰۳	۱۴/۴۷۹	۵۰	

۷. راندمان الکتریکی و حرارتی سلول نسبت به مدل اصلی ۸ لوله‌ای

برای قسمت سلول فتوولتائیک حرارتی نمودارهای راندمان الکتریکی و حرارتی چون خیلی تغییرات آن مشخص نبود ما درصد تغییرات آن‌ها را نسبت به مدل اصلی ۸ لوله محاسبه و به عنوان آن عبارت difference اضافه شده است. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود که نتایج مدل ۱۰ لوله و مدل مارپیچ دویل تقریباً یکسان است، اما برای مدل ۶ لوله نتایج منفی شده و بدتر می‌شود. از این مقایسه نتیجه می‌گیریم که عملکرد مدل ۱۰ لوله‌ای بهتر است. با توجه به نمودارهای ذیل مشاهده می‌شود که در هندسه ۶ لوله‌ای راندمان الکتریکی و حرارتی روبه‌زوال است. همانند نمودارهای قبل، روند تغییرات مدل ۱۰ لوله‌ای و مارپیچ دور نزدیک به هم و تقریباً یکسان است. هرچه دمای محیط و در نتیجه، آن دمای ورودی سیال بیشتر شود، راندمان سیستم به طور نامحسوس افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. تغییرات راندمان الکتریکی سلول نسبت به مدل اصلی ۸ لوله‌ای



شکل ۱۳. تغییرات راندمان حرارتی سلول نسبت به مدل اصلی ۸ لوله‌ای

۸. نتیجه‌گیری

جدول ۱۰ نتایج عددی مربوط به سیستم فتوولتائیک - حرارتی (PVT) مبتنی بر ۸ لوله را توضیح می‌دهد. بر اساس این جدول، حداکثر بازده الکتریکی و حرارتی این سیستم به‌ترتیب $۱۴/۶۷۶$ و $۳۲/۶۴۱$ درصد بوده، در حالی که بازده کل در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد معادل $۴۷/۳۱۸$ درصد گزارش شده است. با افزایش دمای محیط به ۳۰ درجه سانتی‌گراد، بازده الکتریکی و حرارتی به‌ترتیب به $۱۴/۱۱۹$ و $۳۲/۴۳۷$ درصد کاهش یافت. این نتایج نشان می‌دهد افزایش دمای سلول به کاهش بازده الکتریکی و حرارتی منجر می‌شود. جدول ۱۱ به بررسی بازده الکتریکی، حرارتی، کل و دمای متوسط سلول در سیستم PVT مبتنی بر ۱۰ لوله پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد حداکثر بازده الکتریکی و حرارتی در این پیکربندی به‌ترتیب برابر با $۱۴/۷۳۷$ و $۳۴/۱۲۸$ درصد است. بر اساس جدول ۱۲، برای سیستم PVT مبتنی بر ۶ لوله، حداکثر بازده الکتریکی و حرارتی به‌ترتیب برابر با $۱۴/۵۶۷$ و $۳۰/۱۳۹$ درصد بوده و بازده کل در دمای محیط ۲۰ درجه سانتی‌گراد معادل $۴۴/۷۱۵$ درصد گزارش شده است. این مقایسه نشان می‌دهد افزایش تعداد لوله‌های سیستم PVT تأثیر مثبتی برافزایش بازده الکتریکی و حرارتی داشته و همچنین، به کاهش دمای متوسط سلول منجر می‌شود. جدول ۱۳ نتایج مربوط به پیکربندی جریان مارپیچی دوگانه را ارائه می‌دهد. در این حالت، حداکثر بازده الکتریکی، حرارتی و کل به‌ترتیب برابر با $۱۴/۷۳۵$ ، $۳۴/۱۶۴$ و $۴۸/۹$ درصد بوده است. این نتایج نشان می‌دهد پیکربندی جریان مارپیچی دوگانه بهترین عملکرد را در میان تمامی پیکربندی‌های بررسی شده داشته است. علاوه بر این، حداکثر دمای سطح سلول در جریان مارپیچی دوگانه در دمای محیط ۳۰ درجه سانتی‌گراد به $۵۶/۳۲۹$ درجه سانتی‌گراد رسید، در حالی که در پیکربندی‌های ۶، ۸ و ۱۰ لوله به‌ترتیب به $۴۷/۱۴$ ، $۴۵/۴۳$ و $۴۴/۳۹۴$ درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. عملکرد بهبودیافته جریان مارپیچی دوگانه را می‌توان به سطح بزرگ‌تر این پیکربندی نسبت داد که باعث افزایش انتقال حرارت و بهبود اتلاف حرارت در جریان آب می‌شود. این ویژگی‌ها پیکربندی مارپیچی دوگانه را به گزینه‌ای بهینه برای استفاده در سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی تبدیل کرده است.

منابع

- [1] AGROUI, K. Indoor and outdoor characterizations of photovoltaic module based on multicrystalline solar cells. *Energy Procedia*, 2012, 18: 857-866.
- [2] CHAUHAN, Priyesh J., et al. Battery energy storage for seamless transitions of wind generator in standalone microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 55.1: 69-77.
- [3] ADEFARATI, Temitope; BANSAL, Ramesh C. Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review. *IET Renewable Power Generation*, 2016, 10.7: 873-884.
- [4] KUMAR, J. Senthil, et al. Optimizing renewable based generations in AC/DC microgrid system using hybrid Nelder-Mead-Cuckoo Search algorithm. *Energy*, 2018, 158: 204-215.
- [5] HU, Jianhui, et al. Energy performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermal system on hot and cold days. *Applied energy*, 2016, 173: 40-51.
- [6] NELSON, Jenny A. *The physics of solar cells*. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [7] SCHMIDTKE, Johanna. Commercial status of thin-film photovoltaic devices and materials. *Optics Express*, 2010, 18.S3: A477-A486.
- [8] RAHMAN, M. M.; HASANUZZAMAN, Md; RAHIM, Nasrudin Abd. Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103: 348-358.
- [9] SU, Di, et al. Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors integrated with phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 2017, 131: 79-89.
- [10] KURNIK, Jurij, et al. Outdoor testing of PV module temperature and performance under different mounting and operational conditions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95.1: 373-376.
- [11] R. Liang, J. Zhang, L. Ma, Y. Li, Performance evaluation of new type hybrid photovoltaic/thermal solar collector by experimental study, *Appl. Therm. Eng.* 75, 2015, 487-492.
- [12] M.S. Hossain, A.K. Pandey, J. Selvaraj, N. Abd Rahim, A. Rivai, V.V. Tyagi, Thermal performance analysis of parallel serpentine flow based photovoltaic/ thermal (PV/T) system under composite climate of Malaysia, *Appl. Therm. Eng.* 153, 2019, 861-871.
- [13] E. Bellos, C. Tzivanidis, Multi-objective optimization of a solar assisted heat pump driven by hybrid PV, *Appl. Therm. Eng.* 149, 2019, 528-535.
- [14] The catalog of FDE- HYBRID "the PV-Thermal Panel, 2022.
- [15] Arslan, E., Aktas, M., Can, O.F., Experimental and numerical investigation of a novel photovoltaic thermal (PV/T) collector with the energy and exergy analysis. *J. Clean. Prod.* 276, 2020, 123255.
- [16] S. Yoon, S.R. Lee, G.H. Go, Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers, *Energy and Buildings* 105, 2015, 100-105.
- [17] R. R. Dasare, S. K. Saha, Numerical study of horizontal ground heat exchanger for high energy demand applications, *Applied Thermal Engineering* 85, 2015, 252-263.
- [18] M. J. Kim, S. R. Lee, S. Yoon, J. S. Jeon, An applicable design method for horizontal spiral-coil-type ground heat exchangers, *Geothermics* 72, 2018, 338-347.
- [19] S. Kavanaugh, K. Rafferty, *Ground-source heat pumps : design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*, ASHRAE, 1997.
- [20] Yang, D. J., Z. F. Yuan, P. H. Lee, and H. M. Yin. "Simulation and experimental validation of heat transfer in a novel hybrid solar panel." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55, no. 4, 2012, 1076-1082.
- [21] Khodadadi, M., Seyyed Ali Farshad, Z. Ebrahimpour, and M. Sheikholeslami. "Thermal performance of nanofluid with employing of NEPCM in a PVT-LFR system." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47, 2021, 101340.
- [22] J. Blazek, "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", 3rd Ed., Elsevier, 2015.
- [23] BEJAN, Adrian. *Advanced engineering thermodynamics*. John Wiley & Sons, 2016.
- [24] SAMPATHKUMAR, K.; SENTHILKUMAR, P. Utilization of solar water heater in a single basin solar still—an experimental study. *Desalination*, 2012, 297: 8-19.