Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(1) (2021) 47-50
DOI: 10.22060/mej.2019.16268.6315

Thermal Analysis of a Solar Wall Equipped with Photovoltaic Cells and Phase-Change Materials

N. Azadi, F. Sarhaddi*, F. Sobhnamayan

Department of Mechanical Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT: In this paper, the thermal analysis of a solar wall system equipped with photovoltaic cells and phase-change materials has been numerically investigated. For the thermal modeling of the system, the energy balance for its various components, including photovoltaic cells, air channel, absorber plate, phase-change material, and room are written. The validation of the numerical results is consistent with the experimental data of previous studies. In parametric studies, the effect of phase-change material thickness, inlet air flow rate, collector width, and packing factor have been investigated on the room temperature and system average energy efficiency in four consecutive days. Results show that the optimal phase-change material thickness is 0.05 m. Increasing the phase-change material thickness reduces the room temperature and energy efficiency. Increasing the airflow rate decreases the photovoltaic cell temperature and increases electrical efficiency, thereby increasing energy efficiency. However, it reduces room temperature. Therefore, the optimum flow rate of air was obtained at 0.04 kg/s. Increasing the collector width, despite increasing room temperature, reduces energy efficiency, so the optimum collector width was 0.7 m. The increase of the packing factor increases room temperature and reduces energy efficiency. Therefore, the optimum packing factor was 0.5.

Review History:

Received: 2019-05-04
Revised: 2019-09-13
Accepted: 2019-09-22
Available Online: 2019-10-21

Keywords:

Solar wall
Phase-change materials
Photovoltaic cell
Thermal analysis

1. INTRODUCTION

One of the ways to optimize energy consumption in buildings is to use a solar wall. A solar wall equipped with photovoltaic cells and phase-change materials can provide electricity and heat storage throughout the day and help with space heating during the night [1]. Fig. 1 shows the schematic view of the studied solar wall.

Fig. 1. Schematic view of the studied solar wall [1]

*Corresponding author's email: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir

Many pieces of research [1-4] have been carried out on the performance evaluation of the solar wall system.

Jie et al. [1] investigated the thermal performance of a photovoltaic solar wall. They developed a mathematical model based on two-dimensional transient heat transfer for system various components to predict solar wall performance. Their results show that the solar wall increases the average room temperature by 0.5 °C and decreases the temperature of the photovoltaic cells by 1.28°C. In previous studies [1-4], the conventional solar wall for building heating has been studied. However, the present study analyzes the thermal performance of the solar wall, which is equipped with photovoltaic cells and phase-change material. The solar wall of the present study is capable of storing thermal energy and generating electricity simultaneously.

2. METHODOLOGY

2.1. Governing equations

The governing equations of the solar wall system are obtained by writing energy balance for the various component of the system as follows [1, 2]:

Photovoltaic cells

$$\tau_g \beta_c \alpha_c G A_g = \tau_g \eta_{el} G \beta_c A_g + U_{cond-c,g} \beta_c A_g (T_c - T_g) + h_{rad-c,sky} \beta_c A_g (T_c - T_{sky}) + h_{conv-c,a} \beta_c A_g (T_c - T_a) \quad (1)$$

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Glass cover

$$\alpha_g G(1-\beta_c)A_g + U_{cond-c,g}(T_c - T_g)\beta_c A_g + \\ +h_{rad-p,g}(T_p - T_g)A_p = h_{rad-g,sky}(T_g - T_{sky})(1-\beta_c)A_g + \\ h_{conv-g,a}(T_g - T_a)(1-\beta_c)A_g + h_{conv-g,f}(T_g - T_f)A_g \quad (2)$$

Airflow channel

$$\dot{m}C_p \frac{dT_f}{dx}dx = \left[h_{conv-g,f}(T_g - T_f) + h_{conv-p,f}(T_p - T_f)\right]bdx \quad (3)$$

Absorber plate

$$\tau_g(1-\beta_c)\alpha_p GA_p = h_{rad-p,g}A_p(T_p - T_g) + \\ h_{conv-p,f}A_p(T_p - T_f) + U_{cond-p,pcm}A_p(T_p - T_{pcm}) \quad (4)$$

Phase-Change Material (PCM)

$$U_{cond-p,pcm}(T_p - T_{pcm})A_p - U_{loss-pcm,r}(T_{pcm} - T_r)A_p = \\ M_{pcm}C_{pcm}\frac{dT_{pcm}}{dt} \quad (5)$$

Air of room

$$U_{loss-pcm,r}(T_p - T_r)A_p - \dot{m}C_pT_{f,in} + \dot{m}C_pT_{f,out} - \\ U_{loss-r,a}A_r(T_r - T_a) - U_{loss-r,w}A_w(T_r - T_{wo}) = M_rC_p\frac{dT_r}{dt} \quad (6)$$

The outer surface of the room wall

$$\alpha_w GA_w + U_{loss-r,w}(T_r - T_{wo})A_w = h_{conv,o}(T_{wo} - T_a)A_w - \\ h_{rad-w,sky}(T_{wo} - T_{sky})A_w \quad (7)$$

The electrical efficiency of Photovoltaic (PV) cells is obtained from [5]

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref}\left[1 - 0.0045(T_c - T_{a,ref}) + 0.052\ln(G/G_{ref})\right] \quad (8)$$

The energy efficiency of the solar wall system is defined as follows

$$\eta_{en} = \frac{M_rC_p\frac{T_r - T_a}{\Delta t} + \frac{\eta_{el}GA_c}{0.38}}{GA_g} \quad (9)$$

2.2. Validation

The simulation results of the present study for the solar wall without phase-change material are validated with the experimental data of Jie et al. [1] (see Fig. 2).

Fig. 2. Simulated and experimental values of the various temperature of the solar wall system

Fig. 3. Energy efficiency variations for four consecutive days

Fig. 4. Received heat flux by the room versus to solar radiation intensity and external heat flux

According to Fig. 2, the simulation results of the present study for the various temperature of the solar wall system are in good agreement with the experimental data of Jie et al. [1].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 3 shows the variations of energy efficiency for four

consecutive days.

According to Fig. 3, the energy efficiency of the day has an upward trajectory and reaches about 35% during peak hours of sunshine. At nighttime, as the sun goes down and the ambient air gets colder, the efficiency drops sharply and reaches to near zero.

Fig. 4 shows the received heat flux by the room versus solar radiation intensity and external heat flux. The amount of heat flux received by the room is about 75% of the intensity of solar radiation. At night, the phase change material provides about 30% of the heat needed to warm the room and requires about 100 W/m^2 of external heat flux to fully heat the room.

4. CONCLUSIONS

It is concluded from the simulation results of the present study that the simulation results of this study are in good agreement with the experimental results of previous studies. The use of phase change material in the solar wall can provide up to 30% of the thermal energy needed to heat the room.

5. REFERENCES

[1] J. Jie, Y. Hua, P. Gang, J. Bin, H. Wei, Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, *Building and Environment*, 42(10) (2007) 3529-3539.

[2] J. Jie, Y. Hua, P. Gang, L. Jianping, Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage, *Applied Thermal Engineering*, 27(8) (2007) 1507-1515.

[3] D. Su, Y. Jia, G. Alva, L. Liu, G. Fang, Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors integrated with phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 131 (2017) 79-89.

[4] S. Khanna, S. Newar, V. Sharma, K.S. Reddy, T.K. Mallick, Optimization of fins fitted phase change material equipped solar photovoltaic under various working circumstances, *Energy Conversion and Management*, 180 (2019) 1185-1195.

[5] M.E.A. Slimani, M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, W.B. Chaouch, A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions, *Energy Conversion and Management*, 133 (2017) 458-476.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

N. Azadi, F. Sarhaddi, F. Sobhnamayan, Thermal Analysis of a Solar Wall Equipped with Photovoltaic Cells and Phase-Change Materials, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 47-50.

DOI: 10.22060/mej.2019.16268.6315

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۱، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۷۳ تا ۱۹۰
DOI: 10.22060/mej.2019.16268.6315

تحلیل حرارتی دیوار خورشیدی مجهز به سلول‌های فتوولتائیک و مواد تغییرفازدهنده

ناهید آزادی، فرامرز سرحدی*، فاطمه صبح نمایان

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

خلاصه: در این مقاله تحلیل حرارتی سیستم دیوار خورشیدی دارای سلول‌های فتوولتائیک و مواد تغییرفازدهنده به‌صورت عددی بررسی شده است. برای مدل‌سازی حرارتی سیستم، تعادل انرژی برای اجزاء مختلف آن شامل سلول‌های فتوولتائیک، کانال هوا، صفحه جاذب، ماده تغییرفازدهنده و اتاق نوشته شده است. اعتبارسنجی نتایج عددی در تطابق خوبی با داده‌های تجربی پژوهش‌های پیشین است. در مطالعات پارامتری تأثیر ضخامت مواد تغییرفازدهنده، دبی هوای ورودی به کانال، عرض کلکتور و درصد پوشش سطح بر افزایش دمای اتاق و متوسط بازده انرژی سیستم در چهار روز متوالی بررسی شده‌است. نتایج نشان داد که ضخامت مطلوب مواد تغییرفازدهنده ۰/۰۵ متر است. افزایش بیشتر ضخامت مواد تغییرفازدهنده باعث کاهش دمای اتاق و بازده انرژی می‌شود. افزایش دبی هوای ورودی به کانال باعث کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک و افزایش بازده الکتریکی و در نتیجه افزایش بازده انرژی می‌شود. ولی کاهش دمای اتاق را سبب می‌گردد. بنابراین مقدار دبی مطلوب برای هوای ورودی به کانال ۰/۰۴ kg/s به دست آمد. افزایش عرض کلکتور، علی‌رغم افزایش دمای اتاق باعث کاهش بازده انرژی می‌شود، بنابراین عرض مطلوب برای کلکتور ۰/۷ متر به دست آمد. افزایش مقدار پوشش سطح باعث افزایش دمای اتاق و کاهش بازده انرژی می‌شود. بنابراین مقدار پوشش سطح ۰/۵ به دست آمد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴-۰۲-۱۳۹۸
بازنگری: ۲۲-۰۶-۱۳۹۸
پذیرش: ۲۱-۰۶-۱۳۹۸
ارائه آنلاین: ۲۹-۰۷-۱۳۹۸

کلمات کلیدی:
دیوار خورشیدی
مواد تغییرفازدهنده
سلول فتوولتائیک
تحلیل حرارتی

۱- مقدمه

بحران انرژی در زندگی امروز موضوعی بسیار مهم و حیاتی است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها استفاده از دیوار خورشیدی است که اگر چه زمان زیادی از اختراع و بکارگیری آن در معماری نمی‌گذرد با این وجود این سامانه قدمت زیادی در معماری سنتی ایران دارد. دیوارهای ضخیم بناها که اغلب از جنس مصالح بنایی مانند خشت و آجر با ظرفیت حرارتی بالا بودند، در طول روز گرمای خورشید را در خود ذخیره کرده و شب هنگام گرمای ذخیره شده را به آرامی وارد فضاهای داخلی می‌کردند. این دیوارها مانند یک خازن حرارتی نوسان درجه حرارت در طی شبانه روز را کاهش می‌دادند [۱]. بسیاری از مطالعات تئوری و آزمایشگاهی نشان داده‌اند که دیوارهای خورشیدی آسایش قابل قبولی را برای محیط داخلی ساختمان به ارمغان می‌آورند. با این حال، این فن‌آوری کمتر مورد توجه قرار می‌گیرد که این کار کاربردهای گسترده‌ی آن را محدود کرده‌است. با روی کار آمدن ساختمان‌های فتوولتائیک فرصت‌های قابل توجهی برای کاهش مصرف سوخت ساختمان‌ها، از طریق تولید مستقیم برق و حرارت از تابش خورشیدی به وجود آمده‌است [۲]. یک ساختمان فتوولتائیک مجهز به پنل‌های فتوولتائیک است و همزمان از گرمایش و برق تولیدی بهره می‌برد. سلول‌های فتوولتائیک می‌توانند تابش خورشیدی را به برق تبدیل کنند. کارایی تبدیل یک سلول فتوولتائیک بسیار وابسته به دمای سلول‌ها می‌باشد. افزایش دمای سلول به اندازه ۱ درجه سلسیوس باعث کاهش ۰/۲۵ تا ۰/۵ درصدی در عملکرد بازده سلول‌های خورشیدی می‌شود. برای کنترل دما و

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

افزایش کلی بازده سلول‌های خورشیدی، گرمایی که در پشت آن‌ها ذخیره می‌شود را می‌توان جمع‌آوری کرد و مورد استفاده قرار داد. مواد تغییرفازدهنده، موادی هستند که می‌توانند انرژی را با استفاده از گرمای نهان خود ذخیره کنند یا انتشار دهند [۳]. به این ترتیب که با تغییر فاز بین حالت جامد و مایع مقدار زیادی از حرارت در محدوده دمای تغییر فاز ذخیره می‌شود. از مزایای استفاده از مواد تغییرفازدهنده ظرفیت حرارتی بالا در دمای معین برای کم کردن دمای سلول‌های خورشیدی می‌باشد [۴]. در تحقیق حاضر ماده تغییرفازدهنده تنها برای ذخیره گرما مورد استفاده قرار گرفته است و تاثیری در کاهش دمای سلول‌های فتوولتائیک ندارد. دیوار خورشیدی به‌طورکلی یک سیستم حرارتی است که شامل یک پانل شیشه‌ای شفاف و یک دیوار با حجم حرارتی بالاست که توسط یک کانال هوا از هم جدا شده‌اند. برای به حداکثر رساندن تابش خورشیدی معمولاً جهت‌گیری جنوبی انتخاب می‌شود. هنگامی که کانال در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد، درجه حرارت هوا افزایش پیدا می‌کند، هوای گرم، به دلیل شناوری حرارتی (تهویه طبیعی) و یا دستگاه‌های مکانیکی (تهویه اجباری) به سمت بالا جریان می‌یابد و از طریق حفره‌های ورودی وارد فضای اتاق شده و با از دست دادن گرما از طریق حفره‌های خروجی دوباره وارد کانال می‌شود [۵]. تحقیقات متعددی در خصوص بررسی عملکرد دیوارهای خورشیدی انجام شده است. جی و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۷ عملکرد حرارتی یک دیوار خوشیدی فتوولتائیک را به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. آن‌ها یک مدل ریاضی بر مبنای انتقال حرارت گذرای دوبعدی در اجزاء مختلف سیستم برای پیش‌بینی عملکرد دیوار خورشیدی توسعه دادند. نتایج ایشان نشان می‌دهد که استفاده از دیوار خورشیدی مذکور به طور متوسط باعث افزایش ۰/۵ °C دمای هوای اتاق و کاهش ۱/۲۸ °C دمای سلول‌های فتوولتائیک می‌گردد. حسن و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ به کنترل دما و بررسی کارایی سلول‌های فتوولتائیک مجهز مواد تغییرفازدهنده پرداختند. تجزیه و تحلیل حرارتی و الکتریکی آن‌ها برای اقلیم کشورهای ایرلند و پاکستان صورت گرفت. نتایج ایشان نشان می‌دهد که در ایرلند چنین سیستمی مقرون به صرفه نیست، درحالی که چنین سیستمی در اقلیمی مانند پاکستان مؤثر است. علاوه بر این، بازده تبدیل انرژی حرارتی ذخیره شده در ماده تغییرفازدهنده به انرژی الکتریکی معادل، بسیار کم است که مزایای انرژی حرارتی را محدود می‌کند که می‌توان با طراحی بهتر مبدل‌های حرارتی و استفاده از انرژی حرارتی به طور مستقیم برای گرم کردن مورد استفاده قرار گیرد. سو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۷ یک مطالعه مقایسه‌ای بین سیستم فتولتائیک و کلکتور خورشیدی مجهز به مواد تغییرفازدهنده انجام دادند. پارامترهای الکتریکی و حرارتی شامل دمای سلول خورشیدی، دمای خروجی هوا، قدرت الکتریکی، قدرت حرارتی، کارایی الکتریکی، بازده حرارتی و بازده کلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که موقعیت و ضخامت لایه مواد تغییرفازدهنده در فتوولتائیک بر روی عملکرد فتوولتائیک تأثیر قابل توجهی دارد و ضخامت مناسب آن ۳ سانتی‌متر باشد. همچنین مشخص شد که کارایی کلی فتوولتائیک حرارتی مجهز به مواد تغییرفازدهنده در حدود ۱۰/۷ درصد از حالت بدون تغییرفازدهنده بالاتر است. حسن و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷ ارزیابی عملکرد یک سیستم فتوولتائیک دارای موادتغییرفازدهنده برای اقلیم گرم امارات متحده عربی را انجام دادند. ماده تغییرفازدهنده آن‌ها پارافین با محدوده ذوب۴۳ -۳۸ درجه سلسیوس بود و در پشت صفحه فتوولتائیک جهت خنک‌سازی تعبیه شده‌بود. مدل‌سازی حرارتی آن‌ها بر مبنای فرمول‌بندی آنتالپی بود. این مدل قادر به پیش بینی کسر ذوب و انجماد ماده تغییرفازدهنده در هر ماه از سال بود. آن‌ها نتیجه گرفتند که این سیستم برای بیشتر سال عملکردی پایدار دارد. ماده تغییرفازدهنده به دلیل این که در ماه‌های سرد کمتر ذوب می‌شود عمل خنک‌سازی را کمتر انجام می‌دهد. استفاده از ماده تغییرفازدهنده جهت خنکاری سیستم فتوولتائیک تولید انرژی الکتریکی سالیانه سیستم را در حدود ۵/۹ درصد بهبود می‌بخشد. حسین‌زاده و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۸ به مطالعه تجربی استفاده از نانوسیال آب/اکسید روی به عنوان خنک‌کننده و همچنین موم پارافین آلی به عنوان ماده تغییرفازدهنده بر کارایی انرژی و اکسرژی یک سیستم فتوولتائیک پرداختند. سیستم مورد مطالعه شامل یک پنل فتوولتائیک معمولی، یک سیستم فتوولتائیک مجهز به لوله‌های خنک‌کننده حاوی نانوسیال و یک سیستم فتوولتائیک مجهز موادتغییرفازدهنده بود. آن‌ها اثرات استفاده از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده بر تولید آنتروپی سیستم فتوولتائیک ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده به ترتیب ۷/۱ و ۱۱/۹ درصد باعث افزایش توان الکتریکی خروجی سیستم می‌شود. همچنین توان حرارتی خروجی

شکل ۱. (الف) نمای شماتیکی از دیوار خورشیدی مورد مطالعه[۶]، (ب) مدار انتقال حرارت دیوار خورشیدی
Fig. 1. (a) Schematic view of the studied solar wall, (b) heat transfer circuit of solar wall

سیستم فتوولتائیک مجهز به نانوسیال در حدود ۷۹/۳۶ درصد در مقایسه با سیستم فتوولتائیک بیشتر است. بنابراین، استفاده از ماده تغییرفازدهنده در سیستم فتوولتائیک به طور قابل توجهی اکسرژی حرارتی خروجی سیستم را افزایش می‌دهد. کانا و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۹ به مطالعه و بهینه‌سازی سیستم فتوولتائیک مجهز به محفظه ماده تغییرفازدهنده حاوی پره در شرایط کاری مختلف برای افزایش توان فتوولتائیک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تغییر در سرعت باد از ۰/۲ m/s به ۶ m/s برای فاصله پره‌های متفاوت و شار حرارتی خورشیدی روزانه ۵۰۰۰ Wh/m^2، ضخامت محفظه ماده تغییرفازدهنده در ابتدا کاهش و سپس ثابت می‌ماند. برای تغییر در جهت باد از ۰ درجه تا ۷۵ درجه ضخامت ماده تغییرفازدهنده در ابتدا افزایش و سپس ثابت می‌ماند. با افزایش عرض پره‌ها توان تولیدی فتوولتائیک نیز افزایش می‌یابد.

از مرور پژوهش‌های گذشته همچون مرجع [۶] مشخص شد که برخی تحقیقات صرفاً به مطالعه عملکرد دیوار خورشیدی مجهز به سلول‌های فتوولتائیک پرداخته‌اند. در یکسری از تحقیقات دیگر [۱۱-۷]، صرفاً به بررسی امکان بهبود توان خروجی سیستم‌های فتوولتائیک توسط مواد تغییرفازدهنده پرداخته شده‌است. ولی تحقیق در حاضر به تحلیل عملکرد حرارتی دیوار خورشیدی که توأم مجهز به سلول‌های فتوولتائیک و مواد تغییرفازدهنده است پرداخته‌می‌شود. در واقع هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی امکان بهبود طرح دیوار خورشیدی متداول توسط مجهز کردن آن به سلول‌های فتوولتائیک و مواد تغییرفازدهنده است.

۲- معادلات حاکم بر مسئله

مطابق با شکل ۱ دیوار خورشیدی مورد بررسی شامل سلول‌های فتوولتائیک، محفظه عبور هوا، فن جریان مستقیم، صفحه جاذب و ماده تغییرفازدهنده می‌باشد. همچنین دو دریچه برای جریان هوا در بالا و پایین کانال وجود دارد. برای گرمایش زمستان، دریچه‌های هوا به طور دوره‌ای باز می‌شود در حالی که تابستان دریچه هوا همیشه بسته است. سیستم، هوای سرد را از دریچه پایین وارد کانال می‌کند، هوای گرم‌شده توسط فن جریان مستقیم به سمت بالا حرکت می‌کند و از دریچه بالا وارد فضای اتاق می‌شود. در این شکل مدار جریان انتقال حرارت‌های موجود بین اجزاء سیستم نیز نشان داده‌شده‌است. فرض‌های حاکم بر مسئله شامل انتقال حرارت ظرفیت متمرکز برای سلول‌های فتوولتائیک، شیشه، صفحه جاذب، هوای اتاق و ماده تغییرفازدهنده و انتقال حرارت یک بعدی برای جریان هوای داخل کانال می‌باشد. منظور از فرض ظرفیت متمرکز عدم وابستگی دمای جزء مربوطه به مکان می‌باشد. انتقال حرارت ماده تغییرفازدهنده و هوای درون اتاق گذرا می‌باشد. ولی سایر اجزاء شبه دائم فرض می‌شوند [۶].

در حالت شارژ:

معادله تعادل انرژی برای سلول‌های فتوولتائیک توسط معادله (۱) توسعه داده می‌شود:

$$\tau_g \beta_c \alpha_c G A_g = \begin{bmatrix} \tau_g \eta_{el} G + \\ U_{cond-c,g}(T_c - T_g) + \\ h_{rad-c,sky}(T_c - T_{sky}) + \\ h_{conv-c,a}(T_c - T_a) \end{bmatrix} \beta_c A_g \qquad (۱)$$

در این‌جا پارامترهای T_c، T_a، T_g، T_{sky}، G، A_g، α_c، τ_g، β_c و η_{el} به ترتیب دمای سلول فتوولتائیک، دمای محیط، دمای شیشه، دمای آسمان، شدت تابش خورشیدی، مساحت سطح شیشه، ضریب جذب سلول فتوولتائیک، ضریب عبور شیشه، درصد پوشش سطح با سلول‌های فتولتائیک و بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک می‌باشند. همچنین پارامترهای $U_{cond-c,g}$، $h_{rad-c,sky}$، $h_{conv-c,a}$ به ترتیب ضرایب انتقال حرارت هدایتی بین سلول و شیشه، ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین سلول و آسمان و ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سلول و محیط می‌باشند.

معادله تعادل انرژی برای شیشه به صورت معادله (۲) توسعه داده می‌شود:

$$\begin{aligned}&\alpha_g G(1-\beta_c)A_g + \\ &U_{cond-c,g}(T_c-T_g)\beta_c A_g + \\ &h_{rad-p,g}(T_p-T_g)A_p = \\ &h_{rad-g,sky}(T_g-T_{sky})(1-\beta_c)A_g + \\ &h_{conv-g,a}(T_g-T_a)(1-\beta_c)A_g + \\ &h_{conv-g,f}(T_g-T_f)A_g\end{aligned} \quad (۲)$$

در این‌جا پارامترهای α_g و T_p به ترتیب ضریب جذب شیشه و دمای صفحه جاذب می‌باشند. همچنین پارامترهای $h_{rad-p,g}$، $h_{rad-g,sky}$، $h_{conv-g,a}$ و $h_{conv-g,f}$ به ترتیب ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه و صفحه جاذب، ضریب انتقال حرارت تشعشی بین شیشه و آسمان، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و محیط و ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و سیال داخل کانال می‌باشند.

معادله تعادل انرژی برای جریان هوای درون کانال به صورت معادله (۳) نوشته می‌شود:

$$\dot{m}C_p\frac{dT_f}{dx}dx = \begin{bmatrix} h_{conv-g,f}(T_g-T_f)+ \\ h_{conv-p,f}(T_p-T_f)\end{bmatrix} bdx \quad (۳)$$

در این‌جا پارامترهای $\dot{m}$، C_p، T_f، b و dx به ترتیب دبی جریان هوا در کانال، ظرفیت حرارتی هوا، دمای جریان هوا در کانال، عرض کانال هوا و المان طول از کانال هوا می‌باشند. همچنین پارامتر $h_{conv-p,f}$ ضریب انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جاذب و سیال داخل کانال می‌باشد.

معادله تعادل انرژی برای صفحه جاذب به صورت معادله (۴) تعریف می‌شود:

$$\tau_g(1-\beta_c)\alpha_p GA_p = \begin{bmatrix} h_{rad-p,g}(T_p-T_g)+ \\ h_{conv-p,f}(T_p-T_f)+ \\ U_{cond-p,pcm}(T_p-T_{pcm})\end{bmatrix} A_p \quad (۴)$$

در این‌جا پارامترهای T_{pcm}، A_p و α_p به ترتیب دمای ماده تغییرفازدهنده، مساحت صفحه جاذب و ضریب جذب صفحه جاذب می‌باشند. همچنین پارامتر $U_{cond-p,pcm}$ ضریب انتقال حرارت هدایتی بین صفحه جاذب و ماده تغییرفازدهنده می‌باشد.

معادله تعادل انرژی برای ماده تغییرفازدهنده به شکل معادله (۵) می‌باشد:

$$\begin{aligned}&U_{cond-p,pcm}(T_p-T_{pcm})A_p - \\ &U_{loss-pcm,r}(T_{pcm}-T_r)A_p = M_{pcm}C_{pcm}\frac{dT_{pcm}}{dt}\end{aligned} \quad (۵)$$

در این‌جا پارامترهای T_r، C_{pcm} و M_{pcm} به ترتیب دمای هوای اتاق، ظرفیت حرارتی ماده تغییرفازدهنده و جرم ماده تغییرفازدهنده می‌باشند.

معادله تعادل انرژی برای هوای فضای اتاق به صورت معادله (۶) تعریف می‌شود [۶]:

$$\begin{aligned}&U_{loss-pcm,r}(T_p-T_r)A_p - \dot{m}C_pT_{f,in} + \\ &\dot{m}C_pT_{f,out} - U_{loss-r,a}A_r(T_r-T_a) - \\ &U_{loss-r,w}A_w(T_r-T_{wo}) = M_rC_p\frac{dT_r}{dt}\end{aligned} \quad (۶)$$

در این‌جا پارامتر M_r جرم هوای اتاق می‌باشد و مقدار T_{wo} دمای سطح دیوار بیرونی اتاق می‌باشد و از رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned}&\alpha_w GA_w + U_{loss-r,w}(T_r-T_{wo})A_w = \\ &h_{conv,o}(T_{wo}-T_a)A_w - \\ &h_{rad-w,sky}(T_{wo}-T_{sky})A_w\end{aligned} \quad (۷)$$

در این‌جا پارامترهای α_w و A_w به ترتیب ضریب جذب دیوار و

مساحت دیوار بیرونی می‌باشند. همچنین پارامترهای $U_{loss-r,w}$ ، $h_{conv,o}$ و $h_{rad-w,sky}$ به ترتیب ضریب انتقال حرارت اتلافی بین اتاق و دیوار بیرونی، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین دیوار بیرونی و محیط و ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین دیوار بیرونی و آسمان می‌باشند.

به‌دلیل حضور بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک (η_{el}) در معادله (۱) لذا تحلیل حرارتی دیوار خورشیدی به تحلیل الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک وابسته می‌باشد. جهت محاسبه بازده الکتریکی سلول‌های فتوولتائیک و توان خروجی از آن‌ها از روابط (۸) و (۹) استفاده شده است [۱۲]:

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref}\begin{bmatrix}1-0.0045(T_c - T_{a,ref})+\\ 0.052\ln(G/G_{ref})\end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$W_{el} = \eta_{el} G \beta_c A_g \quad (۹)$$

در این‌جا اندیس ref مربوط به شرایط مرجع می‌باشد.

در حالت تخلیه شارژ:

معادله تعادل انرژی برای ماده تغییرفازدهنده در دو حالت تغییرفاز و بدون تغییرفاز توسط معادلات (۱۰) و (۱۱) معرفی می‌شود [۳]:

$$\begin{aligned}&-U_{cond-pcm,p}(T_{pcm}-T_p)A_p - \\ &U_{loss-pcm,r}(T_{pcm}-T_r)A_p = \\ &\frac{M_{pcm}L_{pcm}}{\Delta t} \quad \text{for } T_m \le T_{pcm} \le T_m+\delta\end{aligned} \quad (۱۰)$$

$$\begin{aligned}&-U_{cond-pcm,p}(T_{pcm}-T_p)A_p - \\ &U_{loss-pcm,r}(T_{pcm}-T_r)A_p = \\ &M_{pcm}C_{pcm}\frac{dT_{pcm}}{dt} \quad \text{for } T_{pcm} \le T_m \ ,T_{pcm} \ge T_m+\delta\end{aligned} \quad (۱۱)$$

در این‌جا پارامتر δ را انحراف دمای فرضی می‌نامند و مقدار آن برابر ۳درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین L_{pcm} گرمای نهان ماده تغییرفازدهنده است. معادله تعادل انرژی برای صفحه جاذب به صورت معادله (۱۲) معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned}&U_{cond-pcm,p}(T_{pcm}-T_p)A_p = \\ &\left[h_{rad-p,g}(T_p-T_g)+h_{conv-p,f}(T_p-T_f)\right]A_p\end{aligned} \quad (۱۲)$$

معادله تعادل انرژی برای شیشه مطابق با رابطه (۱۳) معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned}&h_{rad-p,g}(T_p-T_g)A_p = \\ &h_{conv-g,f}(T_g-T_f)A_g + \\ &h_{conv-g,a}(T_g-T_a)(1-\beta_c)A_g + \\ &h_{rad-g,sky}(T_g-T_{sky})(1-\beta_c)A_g + \\ &U_{cond-g,c}(T_g-T_c)\beta_c A_g\end{aligned} \quad (۱۳)$$

معادله تعادل انرژی برای سلول‌های فتوولتائیک توسط رابطه (۱۴) معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned}&U_{condg,c}(T_g-T_c)\beta_c A_g = \\ &h_{rad-c,sky}(T_c-T_{sky})\beta_c A_g + \\ &h_{conv-c,a}(T_c-T_a)\beta_c A_g\end{aligned} \quad (۱۴)$$

معادله تعادل انرژی برای جریان هوا به صورت معادله (۱۵) معرفی می‌شود:

$$\dot{m}C_p\frac{dT_f}{dx}dx = \begin{bmatrix}h_{conv-g,f}(T_g-T_f)+\\ h_{conv-p,f}(T_p-T_f)\end{bmatrix}bdx \quad (۱۵)$$

معادله تعادل انرژی برای هوای فضای اتاق مطابق معادله (۱۶) معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned}&U_{loss-pcm,r}(T_{pcm}-T_r)A_p + \dot{m}C_pT_{f,out} - \\ &\dot{m}C_pT_{f,in} - U_{loss-r,a}A_r(T_r-T_a) - \\ &U_{loss-r,w}A_w(T_r-T_{wo}) = M_rC_p\frac{dT_r}{dt}\end{aligned} \quad (۱۶)$$

مقدار T_{wo} دمای سطح بیرونی دیوار نیز از معادله (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned}&U_{loss-r,w}(T_r-T_{wo})A_w = \\ &h_{conv-w,a}(T_{wo}-T_a)A_w + \\ &h_{rad-w,sky}(T_{wo}-T_{sky})A_w\end{aligned} \quad (۱۷)$$

ضرایب انتقال حرارت مورد استفاده در معادلات حالت شارژ و حالت تخلیه شارژ به شرح زیر می‌باشد [۱۳].

ضریب انتقال حرارت هدایتی بین سلول‌های فتوولتائیک و شیشه به صورت زیر است.

$$U_{cond-c,g} = (L_c / K_c)^{-1} \quad (۱۸)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی بین سلول فتوولتائیک و آسمان به صورت زیر بیان می‌شود.

$$h_{rad-c,sky} = \varepsilon_c \sigma (T_{sky} + T_c)(T_{sky}{}^2 + T_c{}^2) \quad (۱۹)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین سلول فتوولتائیک و محیط به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$h_{conv-c,a} = 2.8 + 3V_w \quad (۲۰)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی بین شیشه و صفحه جاذب به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$h_{rad-p,g} = \sigma (T_g + T_p)(T_g{}^2 + T_p{}^2) / (1/\varepsilon_g + 1/\varepsilon_p - 1) \quad (۲۱)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی بین شیشه و آسمان به صورت زیر بیان می‌شود.

$$h_{rad-g,sky} = \varepsilon_g \sigma (T_{sky} + T_g)(T_{sky}{}^2 + T_g{}^2) \quad (۲۲)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و محیط به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$h_{conv-g,a} = 2.8 + 3V_w \quad (۲۳)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین شیشه و جریان هوای کانال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$h_{conv-g,f} = 2.8 + 3V_f \quad (۲۴)$$

ضریب انتقال حرارت هدایتی بین صفحه جاذب و ماده تغییرفازدهنده به صورت زیر است.

$$U_{cond-p,pcm} = (L_p / K_p + L_{pcm} / K_{pcm})^{-1} \quad (۲۵)$$

ضریب انتقال حرارت اتلافی از ماده تغییرفازدهنده به محیط به صورت زیر است.

$$U_{loss-r,w} = \frac{1}{1/h_{conv,i} + L_w / K_w} \quad (۲۶)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین دیوار بیرونی اتاق و محیط به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$h_{conv-w,a} = 2.8 + 3V_w \quad (۲۷)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی بین دیوار بیرونی اتاق و آسمان به صورت زیر بیان می‌شود.

$$h_{rad-w,sky} = \varepsilon_w \sigma (T_{sky} + T_{wo})(T_{sky}{}^2 + T_{wo}{}^2) \quad (۲۸)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جاذب و جریان هوای کانال به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$h_{conv-p,f} = 2.8 + 3V_f \quad (۲۹)$$

در این‌جا پارامتر σ ثابت استفان بولتزمن و V_w سرعت باد و V_f سرعت جریان هوا درون کانال است.

محاسبه بازده انرژی برای روز و شب به ترتیب مطابق معادلات (۳۰) تا (۳۲) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{en,day} = \frac{M_r C_p \frac{T_r - T_a}{\Delta t} + \frac{\eta_{el} G A_c}{0.38}}{G A_g} \quad (۳۰)$$

در این‌جا ۰/۳۸یک ضریب تبدیل برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی است چون کیفیت برق و حرارت یکسان نیست. ضریب ۰/۳۸ معادل با بازده حرارتی یک نیروگاه حرارتی می‌باشد. در شب برای زمانی که ماده در تغییر فاز نباشد بازده مطابق معادله (۳۱) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{en,night} = \frac{M_r C_p \frac{T_r - T_a}{\Delta t}}{M_{pcm} C_{pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt}} \quad (۳۱)$$

در شب برای زمانی که ماده در تغییر فاز باشد مطابق معادله (۳۲) محاسبه می‌شود.

شکل۲. تصویر دیوار خورشیدی مورد بررسی در تحلیل تجربی جی و همکاران [۶]
Fig. 2. Picture of solar wall in experimental analysis of Jie et al. [6]

$$\eta_{en,night} = \frac{M_r C_p \dfrac{T_r - T_a}{\Delta t}}{\dfrac{M_{pcm} L_{pcm}}{\Delta t}} \quad (۳۲)$$

مقدار متوسط بازده انرژی برای چهار شبانه روز از معادله (۳۳) به‌دست می‌آید.

$$\eta_{en,ave} = \frac{\sum_n \eta_{en}}{n} \times 10 \quad (۳۳)$$

در این جا n=۱۸۳ تعداد ساعات شبانه روز می‌باشد. در ۴ شبانه روز متوالی فاصله زمانی داده‌ها نیم ساعت می‌باشد.

۳- روش حل عددی و اعتبارسنجی

معادلات حاکم بر مسئله یک دستگاه از معادلات جبری و دیفرانسیل معمولی غیرخطی را تشکیل می‌دهد. جهت حل دستگاه مذکور از روش رانگ گوتا توسط نرم‌افزار متلب استفاده است. جهت بررسی اعتبار و صحت روش عددی به کار گرفته‌شده در تحقیق حاضر، نتایج عددی پژوهش حاضر با داده‌های آزمایشگاهی جی و همکاران [۶] مقایسه شده است. جی و همکاران [۶] یک دیوارخورشیدی فتوولتائیک بدون ماده تغییرفازدهنده را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند. شکل ۲ تصویر دیوار خورشیدی مرجع [۶] را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود اتاق سمت چپ مجهز به دیوار خورشیدی است و دارای ابعاد ۲/۶۶ متر (ارتفاع)، ۳متر (طول) و ۳ متر (عرض) می‌باشد. ضخامت دیوارها ۰/۱ متر می‌باشد. ابعاد پنل فتوولتائیک شیشه‌ای نیز ۲/۶۶ (ارتفاع) و ۰/۸۴ متر (عرض) و ضخامت ۵ میلی‌متر می‌باشد. یک کانال هوا با عمق ۰/۱۸ متر در فاصله بین صفحه جاذب سیاه رنگ و پنل فتوولتائیک قرار دارد. دو دریچه با ابعاد ۰/۴ عرض و ۰/۱ ارتفاع در بالا و پایین کانال و به فاصله ۰/۰۷ از سقف و زمین قرار دارند. داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۶] شامل شدت تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای سلول‌های فتوولتائیک، دمای صفحه جاذب، دمای متوسط هوای درون کانال و دمای هوای اتاق می‌باشد. همچنین سرعت متوسط باد در روز آزمایش ۳ m/s گزارش شده است. پارامترهای طراحی دیوار خورشیدی مورد مطالعه تحقیق حاضر در جدول ۱ داده شده است.

در پژوهش حاضر به دیوار خورشیدی جی و همکاران [۶] یک مخزن ذخیره حرارتی حاوی ماده تغییرفازدهنده اضافه شده است تا امکان ادامه گرمایش اتاق در شب نیز فراهم گردد. ماده تغییرفازدهنده در زیر صفحه جاذب قرار می‌گیرد که در طول روز انرژی حرارتی را ذخیره کند و در شب هنگام آن را جهت گرمایش هوای اتاق پس دهد. ویژگی‌های ماده تغییرفازدهنده مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمودار شدت تابش خورشیدی و دمای محیط بر حسب زمان آزمایش نشان داده شده‌است. مقادیر

جدول ۱. پارامترهای طراحی دیوار خورشیدی مورد مطالعه تحقیق حاضر [۶]
Table 1. Design parameters of the studied solar wall in the present study [6]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ضریب جذب شیشه	α_g=۰/۰۵	مساحت صفحه جاذب	A_p=۲/۱۵۴۴m^۲
ضریب عبور شیشه	τ_g=۰/۹۵	مساحت شیشه	A_g=۲/۲۳۴۴m^۲
ضریب صدور شیشه	ε_g=۰/۲۳	مساحت دیوار بیرونی	A_w=۵/۷۴۵۶m^۲
ضریب جذب سلول	α_c=۰/۹	مساحت سطح اتاق	A_r=۴۱/۹۴m^۲
درصد پوشش سطح	β_c=۰/۵	عرض کانال هوا	b=۰/۸۴m
ضریب صدور سلول	ε_c=۰/۷	عمق کانال هوا	D=۰/۱۸m
ضریب جذب صفحه جاذب	α_p=۰/۹	چگالی هوا	ρ =۱/۱۸kg/m^۳
ضریب صدور صفحه جاذب	ε_p=۰/۹	ظرفیت حرارتی هوا	C_p=۱۰۰۰ kJ/kg.K
ضریب جذب دیوار بیرونی	α_w=۰/۴۸	ویسکوزیته هوا	υ=۱/۵۷×۱۰$^{-۵}$ m^۲/s
ضریب هدایت سلول	K_c=۰/۰۳۹W/m.K	ضریب هدایت دیوار بیرونی	K_w=۰/۰۲۶W/m.K
ضخامت سلول	L_c=۰/۰۰۱m	ضخامت دیوار بیرونی	L_w=۰/۱m
ضخامت شیشه	L_g=۰/۰۰۵m	ضخامت صفحه جاذب	L_p=۰/۰۰۳m
تابش در حالت مرجع	G_{ref}=۱۰۰۰ W/m^۲	راندمان الکتریکی در حالت مرجع	$\eta_{el,ref}$ =۰/۱۳

جدول ۲. ویژگی‌های ماده تغییرفازدهنده مورد استفاده تحقیق حاضر [۱۴]
Table 2. Characteristics of the phase-change material in the present study

پارامتر	مقدار
نوع ماده تغییر فازدهنده	۳۵RT
دمای جامد (محدوده پایین‌تر از تغییر فاز)	۳۴°C
دمای مایع (محدوده بالاتر از تغییر فاز)	۳۶°C
دمای ذوب	۳۵°C
ظرفیت گرمایی ویژه	۲ kJ/kg.K
گرمای نهان ذوب	۱۶۰ kJ/kg
چگالی مایع، ۴۰°C	۰/۷۷ kg/L
چگالی جامد، ۲۵°C	۰/۸۸ kg/L

تابش خورشیدی و دمای محیط شکل‌های ۳ و ۴ در مدل‌سازی کامپیوتری نیز اعمال گردیده‌است.

مطابق با شکل ۴ آزمایش در یک روز سرد انجام شده است به نحوی که دمای محیط بسیار پایین می‌باشد. دماهایی که در تحقیق جی و همکاران [۶] اندازه‌گیری شده است شامل دمای سلول (T_c)، دمای هوا درون کانال (T_f)، دمای صفحه جاذب (T_p) و دمای هوای اتاق (T_r) می‌باشد. در شکل ۵ مقایسه‌ایی بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی برای دماهای مذکور انجام گرفته است. اندیس exp و sim به ترتیب مقدار آزمایشگاهی مرجع [۶] و مدل‌سازی تحقیق حاضر برای دماهای مذکور را نشان می‌دهد. به‌منظور مقایسه نتایج مدل‌سازی با اندازه‌گیری‌های تجربی خطای نسبی متوسط توسط معادلات (۳۴) و (۳۵) مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد.

$$Er = \frac{1}{n}\sum_{n}\left|\frac{X_{exp} - X_{sim}}{X_{exp}}\right| \times 100 \qquad (۳۴)$$

شکل ۳. شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان [۶]
Fig. 3. Solar radiation intensity versus time [6]

شکل ۴. دمای هوای محیط بر حسب زمان [۶]
Fig. 4. Ambient temperature versus time [6]

شکل ۵: مقایسه تغییرات دمای قسمت‌های مختلف دیوار خورشیدی برای داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی
Fig 5. Comparison of temperature variations of various components of solar wall for experimental and modeling data

شکل ۶. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مدل‌سازی توان الکتریکی خروجی الکتریکی از سلول‌های فتوولتائیک

Fig. 6. Comparison of the experimental and modeling values of output electrical power from photovoltaic cells

$$R=\frac{n\left(\sum_{i=1}^{n}X_{exp}X_{sim}\right)-\left(\sum_{i=1}^{n}X_{exp}\right)\left(\sum_{i=1}^{n}X_{sim}\right)}{\sqrt{n\left(\sum_{i=1}^{n}X_{exp}^{2}\right)\left(\sum_{i=1}^{n}X_{exp}\right)^{2}}\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}X_{sim}^{2}\right)\left(\sum_{i=1}^{n}X_{sim}\right)^{2}}} \quad (۳۵)$$

همان‌طور که از شکل ۵ مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین داده‌های آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی برای دمای اجزاء مختلف سیستم وجود دارد. به نحوی که خطای متوسط نسبی کمتر از ۱۰ درصد و ضریب رگرسیون خطی نزدیک در حدود ۰/۹۷ می‌باشد. در شکل ۶ مقایسه‌ایی بین مقادیر آزمایشگاهی [۶] و مدل‌سازی توان الکتریکی خروجی از سلول‌های فتوولتائیک انجام شده است.

در شکل ۶ اندیس exp مقادیر آزمایشگاهی مربوط به مرجع [۶] را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل تطابق خوبی بین مقادیر تجربی و مدل‌سازی توان الکتریکی وجود دارد به نحوی که خطای متوسط نسبی و ضریب رگرسیون خطی به ترتیب ۹/۵ درصد و ۰/۹۹ می‌باشد. از نتایج شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان استدلال کرد که مدل ریاضی ارائه‌شده در تحقیق حاضر با دقت نسبتاً مناسبی می‌تواند پارامترهای عملکردی دیوار خورشیدی را پیش‌بینی نماید. مدل ریاضی ظرفیت متمرکز تحقیق حاضر با خطای در حدود ۱۰ درصد در مقایسه با مدل دینامیک سیالات محاسباتی مرجع [۶] با خطای در حدود ۸ درصد از لحاظ صحت و دقت تا حدودی برابری می‌کند. هر چند مدل ریاضی مرجع [۶] خطای کمتری دارد ولی به طبع حل معادلات دیفرانسیل جزئی مرجع [۶] از حل معادلات دیفرانسیل معمولی تحقیق حاضر پیچیده‌تر و زمان‌بر می‌باشد. از جمله دلایل خطای مشاهده شده می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

-خطای در اندازه‌گیری داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۶]

- خطا در استخراج داده‌ها از نمودارهای مرجع [۶] توسط نرم‌افزارهای استخراج داده از روی شکل

- استفاده از مدل انتقال حرارت ظرفیت متمرکز برای فرمول‌بندی اجزاء سیستم

- ثابت در نظر گرفتن برخی ضرایب انتقال حرارت و برخی ضرایب الکتریکی در فرایند شبیه‌سازی

۴- بررسی نتایج

برای بررسی تغییرات دمای اتاق، پارامتر دمای بی بعد θ معرفی شده است. این پارامتر نشان می‌دهد که در طول شبانه روز، دمای اتاق تا چه میزان به دمای مطلوب اتاق نزدیک می‌باشد. محدوده تغییرات این پارامتر بین صفر و یک می‌باشد. هر چقدر مقدار θ به یک نزدیک‌تر شود دمای اتاق به مقدار مطلوب یا همان دمای آسایش نزدیک‌تر می‌شود.

مقدار θ مطابق معادله (۳۶) محاسبه می‌شود:

شکل ۷. تغییرات شدت تابش خورشید در چهار روز متوالی برای شهر زاهدان [۱۵]
Fig. 7. Variations of solar radiation intensity in four consecutive days for Zahedan [15]

شکل ۸. تغییرات دمای محیط در چهار روز متوالی برای شهر زاهدان [۱۵]
Fig. 8. Variations of ambient temperature in four consecutive days for Zahedan [15]

$$\theta = 1 - \frac{T_{indoor} - T_r}{T_{indoor} - T_a} \tag{۳۶}$$

در معادله (۳۶) پارامتر T_{indoor} دمای آسایش در اتاق می‌باشد. مقدار این دما در استانداردهای طراحی ۲۳ °C در نظر گرفته می‌شود اما چون هدف از دیوار خورشیدی استفاده از انرژی ارزان و پاک خورشید می‌باشد و رسیدن به دمای مذکور در طول شب صرفاً با استفاده از دیوار خورشیدی مقدور نمی‌باشد، این مقدار برای روز °C ۲۵ و برای شب °C ۲۰ در نظر گرفته شده‌است.

مقدار متوسط θ برای چهار شبانه روز به صورت معادله (۳۷) تعریف می‌شود:

$$\theta_{ave} = \frac{1}{n}\sum_{n}\theta \tag{۳۷}$$

در این‌جا n=۱۸۳ تعداد داده‌های شبیه‌سازی می‌باشد. برای یک دیوار خورشیدی، پارامترهای طراحی و عملکردی شامل عرض کلکتور، دبی جرمی هوای ورودی به کانال، درصد پوشش سطح و ضخامت ماده تغییرفازدهنده می‌تواند به عنوان پارامتر مستقل طراحی در نظر گرفته شود. داده‌های جوی شامل دمای محیط و شدت تابش خورشیدی به عنوان ورودی به مسئله داده می‌شوند. با عنایت به

جدول ۳: مقدار مطلوب نهایی پارامترهای طراحی
Table 3. Final desired value of the design parameters

پارامتر	L_{pcm}	$\dot{m}$	b	β_c
مقدار	۰/۰۵ m	۰/۰۴ kg/s	۰/۷ m	۰/۵

شکل ۹. تغییرات دمای قسمت‌های مختلف سیستم برای چهار روز متوالی
Fig. 9. Temperature variations of the various components of the system for four consecutive days

این که طراحی دیوار خورشیدی مربوطه برای شهر زاهدان مد نظر می‌باشد لذا به داده‌های جوی شهر زاهدان نیاز می‌باشد. تغییرات مقادیر دمای محیط و شدت تابش خورشید برای چهار شبانه روز و برای شهر زاهدان به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌است.

در پژوهش حاضر، هدف بررسی عملکرد سیستم برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای یادشده برای حداکثر شدن دمای بی‌بعد (θ) و راندمان انرژی می‌باشد. در این‌جا از مقدار متوسط چهار شبانه‌روز دمای بی‌بعد θ و بازده انرژی به عنوان تابع هدف در بهینه‌سازی استفاده شده‌است. هر یک از توابع مذکور به طور جداگانه بهینه شده‌اند. در ضمن ضخامت ماده تغییرفازدهنده، دبی جرمی هوای ورودی به کانال، عرض کلکتور و ضریب پوشش سطح به ترتیب توسط پارامترهای L_{pcm}، $\dot{m}$، b و β_c معرفی شده‌است. مقادیر سایر پارامترها مطابق جدول ۱ می‌باشند. برای به‌دست آوردن مقادیر بهینه هر یک از پارامترها از روش جستجوی مستقیم استفاده شده‌است. با توجه به مقادیر بهینه پارامترهای به‌دست آمده برای مقدار متوسط دمای بی‌بعد θ و متوسط بازده انرژی، مقدار مطلوب نهایی پارامترهای طراحی مطابق جدول ۳ می‌باشد.

دمای قسمت‌های مختلف سیستم برای چهار شبانه روز به ازای پارامترهای مطلوب نهایی جدول ۳ در شکل ۹ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده‌است دمای صفحه جاذب که دارای بیشترین ضریب جذب می‌باشد از بقیه اجزای سیستم بیشتر می‌باشد. با توجه به مقادیر تابش خورشیدی استفاده شده جهت شبیه‌سازی، ماده تغییرفازدهنده در بازه‌ی کوتاهی از روز وارد تغییرفاز شده و گرما را در خود ذخیره می‌کند. این گرما برای ساعات اولیه شب به اندازه ۵٪ دمای اتاق را بهبود می‌بخشد و برای تأمین بقیه انرژی مورد نیاز اتاق باید از برق استفاده شود که این امر مطلوب نمی‌باشد. برای رفع این مشکل باید از مواد تغییرفازدهنده با دمای ذوب پایین‌تر استفاده شود که چنین ماده‌ای در بیشتر ساعات روز در حالت تغییر فاز قرار داشته و گرمای بیشتری را ذخیره می‌کند، بنابراین در شب هنگام باعث افزایش دمای اتاق تا دمای مطلوب مد نظر می‌شود. دمای سایر اجزای سیستم نیز با اختلاف اندکی از هم تغییر می‌کند. دمای اتاق نیز در ساعات اوج تابش خورشید به بیشتر از ۲۰°C می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است مقدار θ برای چهار روز متوالی در ساعات اوج تابش خورشید به مقدار تقریبی ۰/۹ می‌رسد که این به معنای این می‌باشد که دمای اتاق در این ساعات به دمای ۲۵ °C که دمای طراحی انتخاب شده می‌باشد

شکل ۱۰. تغییرات مقدار برای چهار روز متوالی
Fig. 10. Variations of the value of θ for four consecutive days

شکل ۱۱. تغییرات مقدار بازده انرژی برای چهار روز متوالی
Fig. 11. Variations of energy efficiency value for four consecutive days

نزدیک می‌شود که این امر توانایی این سیستم در بهبود دمای اتاق را در طول روز نشان می‌دهد.

شکل ۱۱ مقدار تغییرات بازده انرژی را برای چهار روز متوالی نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۱ مقدار بازده انرژی در بازه روز سیر صعودی داشته و در ساعاتی با بیشترین تابش مقدار آن به حدود ۳۵٪ نیز می‌رسد. در شب هنگام نیز با پایین رفتن خورشید و سردتر شدن هوای محیط مقدار بازده به شدت افت پیدا کرده و مقادیری نزدیک به صفر خواهد داشت. در شکل ۱۲ مقایسه‌ای بین $\dot{q}$ با $\dot{q}_{external}$ و تابش خورشید انجام شده‌است که $\dot{q}$ شار رسیده به اتاق زمانی که ضلع جنوبی اتاق دارای دیوار خورشیدی باشد و گرمایش اتاق توسط این سیستم تأمین شود، می‌باشد و $\dot{q}_{external}$ شار مورد نیاز اتاق برای رساندن دمای اتاق به دمای آسایش، که در روز ۲۵ °C و در شب ۲۰ °C می‌باشد که توسط سیستم‌های گرمایش دیگر تأمین می‌شود. شار رسیده به اتاق شامل شار ورودی از کانال هوا و شار رسیده از ماده تغییرفازدهنده به صورت هدایتی به اتاق و شار خورشیدی جذب شده توسط سطوح اتاق در بخشی که فاقد دیوار خورشیدی است و شار اتلاف شده از اتاق به دیوار بیرونی می‌باشد و از معادله (۳۸) محاسبه می‌شود.

شکل ۱۲. شار دریافت شده توسط اتاق نسبت به تابش خورشید و شار حرارتی خارجی

Fig. 12. Received heat flux by the room versus to solar radiation intensity and external heat flux

$$\dot{q} = \dot{m}C_p\,(T_{fout} - T_{fin})/A_w + U_{loss-pcm,r}\,(T_{pcm} - T_r)\,A_p/A_w + G\alpha_w - U_{loss-r,w}(T_r - T_{w_o}) \quad (۳۸)$$

مقدار شار گرمایی که توسط سیستم‌های دیگر باید تأمین شود، توسط معادلات (۳۹) و (۴۰) محاسبه می‌شود.

$$\dot{q}_{external-day} = U_{loss-r,a}A_r(25 - T_a)/A_w - G\alpha_w \quad (۳۹)$$

$$\dot{q}_{external-night} = U_{loss-r,a}A_r(20 - T_a)/A_w \quad (۴۰)$$

مطابق شکل ۱۲ تغییرات شار رسیده به اتاق متناسب با تابش تغییر می‌کند، به‌طوری که در طول روز و در ساعات اوج تابش خورشید، مقدار آن به ۴۰۰ W/m۲ می‌رسد. یعنی تقریباً ۷۵٪ از تابش خورشید وارد اتاق شده است. علاوه بر این در ساعات اولیه شب نیز گرمای ذخیره شده توسط ماده تغییرفازدهنده به سیستم داده می‌شود و مقدار گرمای وارد شده به اتاق را در حدود ۵٪ افزایش می‌دهد. نمودار نشان می‌دهد که در بازه روز با افزایش میزان تابش خورشید سیستم گرمای خود را از خورشید تأمین می‌کند و نیازی به استفاده از سیستم‌های گرمایش دیگر نمی‌باشد اما با وارد شدن به بازه شب مقدار گرمای خورشید کاهش می‌یابد و برای رساندن دمای اتاق به مقدار مطلوب باید به میزان تقریبی ۱۰۰ W/m۲ گرما توسط سیستم‌های گرمایش دیگر به اتاق داده شود. شکل ۱۳ شار انتقال یافته به اتاق صرفاً توسط دیوار خورشیدی را در ضخامت‌های مختلف ماده تغییرفازدهنده نشان می‌دهد.

مقدار شار حرارتی مربوطه توسط معادله (۴۱) محاسبه شده‌است.

$$\dot{q} = \dot{m}C_p(T_{fout} - T_{fin})/A_p + U_{loss-pcm,r}(T_{pcm} - T_r) \quad (۴۱)$$

شکل ۱۳ نشان می‌دهد که افزایش ضخامت ماده تغییرفازدهنده باعث افزایش شار رسیده به اتاق و در نتیجه افزایش دمای اتاق خواهد شد. اما از آن‌جایی که هدف از طراحی این سیستم رسیدن دمای اتاق به دمای آسایش می‌باشد بنابراین همواره افزایش شار ورودی به اتاق مطلوب نخواهد بود، بلکه باید آسایش افراد ساکن در ساختمان مورد توجه قرار گیرد. بنابراین با توجه به شرایط آسایش ساکنین ساختمان باید ضخامتی مناسب برای ماده تغییرفازدهنده در نظر گرفته شود. با توجه به شرایط موجود در سیستم حاضر ضخامت مطلوب ۰/۰۵ متر می‌باشد که دمای اتاق را در گرمترین ساعات روز فراتر از ۲۵ °C نخواهد بود. شکل ۱۴ توان الکتریکی تولید شده توسط سلول‌های فتولتائیک را در طول شبانه روز نشان می‌دهد.

مطابق شکل ۱۴ مقدار متوسط توان الکتریکی تولید شده توسط سلول‌های فتوولتائیک در طول یک شبانه روز برابر با ۹۷۶/۲۲۵ وات

شکل ۱۳. مقایسه شار دریافتی اتاق در ضخامت‌های متفاوت PCM
Fig. 13. Comparison of the received heat flux by the room in various thickness of PCM

شکل ۱۴. توان الکتریکی تولید شده توسط سلول‌های فتوولتائیک
Fig. 14. Generated electrical power by photovoltaic cells

بر روز می‌باشد، یعنی مقداری مازاد بر توان مورد نیاز برای فن تولید می‌شود که می‌توان آن را ذخیره یا برای سایر کاربردها استفاده نمود.

۵- نتیجه‌گیری

بر مبنای مطالعه تئوری تحقیق حاضر موارد زیر قابل بیان می‌باشد:

- نتایج حاصل از مدل ریاضی ظرفیت متمرکز استفاده شده در تحقیق حاضر در توافق نسبتاً مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی تحقیقات گذشته می‌باشد.

- استفاده از ماده تغییرفازدهنده در دیوار خورشیدی می‌تواند تا حدود ۳۰ درصد از انرژی حرارتی لازم برای گرمایش فضای اتاق را در اختیار گذارد. مابقی انرژی حرارتی لازم باید توسط سیستم‌های گرمایشی دیگر تأمین گردد.

- با توجه به این که افزایش دبی جرمی جریان هوا در کانال دیوار خورشیدی تأثیر چشمگیری بر دمای اتاق ندارد لذا می‌توان با افزایش دبی جرمی جریان هوا کارایی سلول‌های فتوولتائیک و بازده انرژی سیستم را بهبود بخشید.

- افزایش عرض کلکتور فتوولتائیک حرارتی باعث افزایش دمای هوای اتاق می‌شود ولی کاهش بازده انرژی سیستم را به دنبال دارد.

- افزایش درصد پوشش سطح توسط سلول‌های فتوولتائیک کاهش دمای هوای اتاق را سبب می‌شود. چون مانع از رسیدن انرژی خورشیدی به صفحه جاذب دیوار خورشیدی می‌گردد. ولی افزایش توان الکتریکی و بازده انرژی سیستم را به دنبال دارد.

فهرست علائم

علامت

علامت	نشانه
A	مساحت (m^2)
b	عرض کانال (m)
Cp	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)
d	قطر هیدرولیکی (m)
dx	طول المان (m)
$\dot{E}$	نرخ انرژی (W)
G	شدت تابش خورشید(W/m^2)
g	شتاب گرانش (m/s)
h	ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)
K	ضریب انتقال حرارت هدایت (W/mK)
L	طول (m)
M	جرم (kg)
$\dot{m}$	دبی جرمی (kg/s)
n	تعداد داده‌های آزمایش
P	فشار (Pa)
$\dot{Q}$	نرخ حرارت (W)
$\dot{q}$	شار حرارتی (W/m^2)
Re	عدد رینولدز
R	ضریب رگرسیون خطی
T	دما (K)
t	زمان (s)
U	ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)
V	سرعت (m/s)
$\dot{W}$	نرخ انرژی الکتریکی (W)
f	جریان هوا (سیال)
g	شیشه
m	ذوب
max	ماکزیمم
$night$	شب
$indoor$	داخلی
$loss$	اتلافی
out	خروجی
p	صفحه جاذب
pcm	ماده تغییرفازدهنده
r	فضای اتاق
rad	تابشی
ref	مرجع
Sky	آسمان
$Solar$	خورشید
S	عرضی
St	تغییرات زمانی
sim	شبیه‌سازی
v	دریچه هوا
w	باد و دیوار نرمال

علائم یونانی

علامت	نشانه
α	ضریب جذب
β	ضریب فشردگی
σ	ثابت استفان بولتزمن (J/m^2K^4s)
ε	ضریب صدور
ρ	چگالی (kg/m^3)
Δ	تغییرات
δ	انحراف دمای فرضی (°C)
η	راندمان
τ	ضریب انتقال
θ	دمای بی بعد
ϑ	ویسکوزیته (m^2/s)

زیرنویس‌ها

a	محیط
ave	میانگین
c	سلول‌های خورشیدی
cv	حجم کنترل
$cond$	هدایتی
$conv$	جابجایی
day	روز
el	الکتریکی
exp	آزمایشگاهی
$external$	خارجی
en	انرژی

مراجع

[1] V. Ghobadian, Climatic study of traditional Iranian buildings, University of Tehran, Second edition, 2003 (In Persian).

[2] J. Jie, Y. Hua, P. Gang, L. Jianping, Study of PV-Trombe wall installed in a fenestrated room with heat storage, *Applied Thermal Engineering*, 27(8) (2007) 1507-1515.

[3] X. Yang, L. Sun, Y. Yuan, X. Zhao, X. Cao, Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T system, *Renewable Energy*, 119 (2018) 152-159.

[4] T. Klemm, A. Hassabou, A. Abdallah, O. Andersen, Thermal energy storage with phase change materials to increase the efficiency of solar photovoltaic modules, *Energy Procedia*, 135 (2017) 193-202.

[5] D.I. Kolaitis, M.A. Founti, Solar wall enhanced with phase-change materials: a detailed numerical simulation study, *Advances in Building Energy Research*, 11(1) (2017) 87-103.

[6] J. Jie, Y. Hua, P. Gang, J. Bin, H. Wei, Study of PV-Trombe wall assisted with DC fan, *Building and Environment*, 42(10) (2007) 3529-3539.

[7] A. Hasan, S.J. McCormack, M.J. Huang, B. Norton, Energy and cost saving of a photovoltaic-phase change materials (PV-PCM) system through temperature regulation and performance enhancement of photovoltaics, *Energies*, 7(3) (2014) 1318-1331.

[8] D. Su, Y. Jia, G. Alva, L. Liu, G. Fang, Comparative analyses on dynamic performances of photovoltaic-thermal solar collectors integrated with phase change materials, *Energy Conversion and Management*, 131 (2017) 79-89.

[9] A. Hasan, J. Sarwar, H. Alnoman, S. Abdelbaqi, Yearly energy performance of a photovoltaic-phase change material (PV-PCM) system in hot climate, *Solar Energy*, 146 (2017) 417-429.

[10] M. Hosseinzadeh, M. Sardarabadi, M. Passandideh-Fard, Energy and exergy analysis of nanofluid based Photovoltaic thermal system integrated with phase change material, *Energy*, 147(15) (2018) 636-647.

[11] S. Khanna, S. Newar, V. Sharma, K.S. Reddy, T.K. Mallick, Optimization of fins fitted phase change material equipped solar photovoltaic under various working circumstances, *Energy Conversion and Management*, 180 (2019) 1185-1195.

[12] M.E.A. Slimani, M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, W.B. Chaouch, A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions, *Energy Conversion and Management*, 133 (2017) 458-476.

[13] S. Nayak, A. Tiwari, Performance evaluation of an integrated hybrid photovoltaic thermal (PV/T) greenhouse system, *International of Agricultural Research*, 2 (2007) 211-226.

[14] H. Elarga, A. Dal Monte, R.K. Andersen, E. Benini, PV-PCM integration in glazed building. Co-simulation and genetic optimization study, *Building and Environment*, 126 (2017) 161-175.

[15] M. Irani, F. Sarhaddi, A. Behzadmehr, Thermal analysis of a solar wall equipped to nano phase change material, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2018) Article in press (In Persian).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Azadi, F. Sarhaddi, F. Sobhnamayan, Thermal Analysis of a Solar Wall Equipped with Photovoltaic Cells and Phase-Change Materials, Amirkabir J. Mech Eng., 53(1) (2021) 173-190.

DOI: 10.22060/mej.2019.16268.6315

این صفحه عمداً خالی است