



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

تاریخچه داوری:

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

کلمات کلیدی:

دیوار خورشیدی
مواد تغییرفازدهنده
سلول فتوولتائیک
تحلیل حرارتی

خلاصه: در این مقاله تحلیل حرارتی سیستم دیوار خورشیدی دارای سلول‌های فتوولتائیک و مواد تغییرفازدهنده به صورت 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 شده است. 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.

۱- مقدمه

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 کرده است. 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 آمده است [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

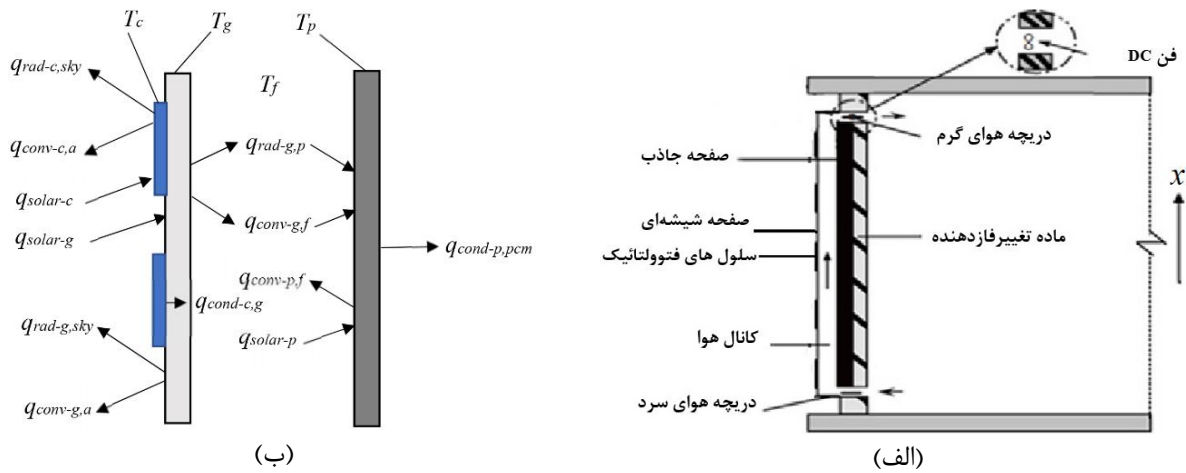
بحران انرژی در زندگی امروز موضوعی بسیار مهم و حیاتی است. یکی از روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها استفاده از دیوار خورشیدی است که اگر چه زمان زیادی از اختراع و بکارگیری آن در معماری نمی‌گذرد با این وجود این سامانه قدمت زیادی در معماری سنتی ایران دارد. دیوارهای ضخیم بناها که اغلب از جنس مصالح 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

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



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 به‌طور کلی 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 خورشیدی 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 به‌طور متوسط باعث افزایش 0.5°C دمای هوای اتاق و کاهش $1/28^{\circ}\text{C}$ 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 به‌طور مستقیم برای گرم کردن مورد استفاده قرار گیرد. سو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۷ یک مطالعه مقایسه‌ای بین سیستم فتوولتائیک 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 $10/7\%$ درصد از حالت بدون تغییرفازدهنده بالاتر است. حسن و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷ ارزیابی عملکرد یک سیستم فتوولتائیک دارای مواد تغییرفازدهنده برای اقلیم گرم امارات متحده عربی را انجام دادند. ماده تغییرفازدهنده آن‌ها پارافین با محدوده ذوب $43-38^{\circ}\text{C}$ درجه سلسیوس بود و در پشت صفحه فتوولتائیک جهت خنک‌سازی تعبیه شده بود. مدل‌سازی حرارتی آن‌ها بر مبنای فرمول‌بندی آنتالپی بود. این مدل قادر به پیش‌بینی 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 خنک‌کاری سیستم فتوولتائیک تولید انرژی الکتریکی سالیانه سیستم را در حدود $5/9\%$ 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 مواد تغییرفازدهنده بود. آن‌ها اثرات استفاده از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده بر تولید انرژی سیستم فتوولتائیک ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از نانوسیال و ماده تغییرفازدهنده به ترتیب $7/1\%$ و $11/9\%$ درصد باعث افزایش توان الکتریکی خروجی سیستم می‌شود. همچنین توان حرارتی خروجی



شکل ۱. (الف) نمای شماتیک 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

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 داده شده است. 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:

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

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 0.2 m/s به 6 m/s برای فاصله پره‌های متفاوت و شار حرارتی خورشیدی روزانه 5000 Wh/m^2 ، ضخامت محفظه ماده تغییرفازدهنده در ابتدا کاهش و سپس ثابت می‌ماند. برای تغییر جهت باد از 0 درجه تا 75 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 شده است. ولی تحقیق در حاضر به تحلیل عملکرد حرارتی دیوار خورشیدی که توأم مجهز به سلول‌های فتوولتائیک و مواد تغییرفازدهنده است پرداخته می‌شود. در واقع هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی امکان بهبود طرح دیوار خورشیدی متداول توسط مجهز کردن آن به سلول‌های فتوولتائیک و مواد تغییرفازدهنده است.

سیال داخل کانال می‌باشد.

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

$$\tau_g (1 - \beta_c) \alpha_p GA_p = \left[\begin{array}{l} h_{rad-p,g} (T_p - T_g) + \\ h_{conv-p,f} (T_p - T_f) + \\ U_{cond-p,pcm} (T_p - T_{pcm}) \end{array} \right] A_p \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

در این جا پارامترهای α_w و A_w به ترتیب ضریب جذب دیوار و

در این جا 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 فتوولتائیک 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 تشعشی 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:

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

در این جا پارامترهای α_g و T_p به ترتیب ضریب جذب شیشه و دمای صفحه جاذب می‌باشند. همچنین پارامترهای $h_{rad-p,g}$ ، $h_{conv-g,a}$ ، $h_{rad-g,sky}$ و $h_{conv-g,f}$ به ترتیب ضریب انتقال حرارت تشعشی 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:

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

در این جا 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

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

می‌شود:

$$\begin{aligned} h_{rad-p,g}(T_p - T_g)A_p = \\ h_{conv-g,f}(T_g - T_f)A_g + \\ h_{conv-g,a}(T_g - T_a)(1 - \beta_c)A_g + \\ h_{rad-g,sky}(T_g - T_{sky})(1 - \beta_c)A_g + \\ U_{cond-g,c}(T_g - T_c)\beta_c A_g \end{aligned} \quad (13)$$

معادله تعادل انرژی برای سلول‌های فتوولتائیک توسط رابطه

(۱۴) معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned} U_{condg,c}(T_g - T_c)\beta_c A_g = \\ h_{rad-c,sky}(T_c - T_{sky})\beta_c A_g + \\ h_{conv-c,a}(T_c - T_a)\beta_c A_g \end{aligned} \quad (14)$$

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

می‌شود:

$$\dot{m}C_p \frac{dT_f}{dx} dx = \left[\begin{aligned} h_{conv-g,f}(T_g - T_f) + \\ h_{conv-p,f}(T_p - T_f) \end{aligned} \right] b dx \quad (15)$$

معادله تعادل انرژی برای فضای اتاق مطابق معادله (۱۶)

معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned} U_{loss-pcm,r}(T_{pcm} - T_r)A_p + \dot{m}C_p T_{f,out} - \\ \dot{m}C_p T_{f,in} - U_{loss-r,a}A_r(T_r - T_a) - \\ U_{loss-r,w}A_w(T_r - T_{wo}) = M_r C_p \frac{dT_r}{dt} \end{aligned} \quad (16)$$

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

می‌شود.

$$\begin{aligned} U_{loss-r,w}(T_r - T_{wo})A_w = \\ h_{conv-w,a}(T_{wo} - T_a)A_w + \\ h_{rad-w,sky}(T_{wo} - T_{sky})A_w \end{aligned} \quad (17)$$

ضرایب انتقال حرارت مورد استفاده در معادلات حالت شارژ و

حالت تخلیه شارژ به شرح زیر می‌باشد [۱۳].

مساحت دیوار بیرونی می‌باشند. همچنین پارامترهای $U_{loss-r,w}$

، $h_{rad-w,sky}$ و $h_{conv,o}$ 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.

به دلیل 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]:

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

$$W_{el} = \eta_{el} G \beta_c A_g \quad (9)$$

در این جا اندیس ref مربوط به شرایط مرجع می‌باشد.

در حالت تخلیه شارژ:

معادله تعادل انرژی برای ماده تغییر فاز دهنده در دو حالت تغییر فاز

و بدون تغییر فاز توسط معادلات (۱۰) و (۱۱) معرفی می‌شود [۳]:

$$\begin{aligned} -U_{cond-pcm,p}(T_{pcm} - T_p)A_p - \\ U_{loss-pcm,r}(T_{pcm} - T_r)A_p = \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{M_{pcm} L_{pcm}}{\Delta t} \text{ for } T_m \leq T_{pcm} \leq T_m + \delta$$

$$\begin{aligned} -U_{cond-pcm,p}(T_{pcm} - T_p)A_p - \\ U_{loss-pcm,r}(T_{pcm} - T_r)A_p = \end{aligned} \quad (11)$$

$$M_{pcm} C_{pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt} \text{ for } T_{pcm} \leq T_m, T_{pcm} \geq T_m + \delta$$

در این جا پارامتر δ را انحراف دمای فرضی می‌نامند و مقدار آن

برابر ۳ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین L_{pcm} گرمای نهان ماده

تغییر فاز دهنده است. معادله تعادل انرژی برای صفحه جاذب به صورت

معادله (۱۲) معرفی می‌شود:

$$\begin{aligned} U_{cond-pcm,p}(T_{pcm} - T_p)A_p = \\ \left[h_{rad-p,g}(T_p - T_g) + h_{conv-p,f}(T_p - T_f) \right] A_p \end{aligned} \quad (12)$$

صورت زیر است.

$$U_{loss-r,w} = \frac{1}{1/h_{conv,i} + L_w/K_w} \quad (26)$$

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

$$h_{conv-w,a} = 2.8 + 3V_w \quad (27)$$

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

$$h_{rad-w,sky} = \varepsilon_w \sigma (T_{sky} + T_{wo}) (T_{sky}^2 + T_{wo}^2) \quad (28)$$

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

$$h_{conv-p,f} = 2.8 + 3V_f \quad (29)$$

در این جا 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.

$$\eta_{en,day} = \frac{M_r C_p \frac{T_r - T_a}{\Delta t} + \frac{\eta_{el} G A_c}{0.38}}{G A_g} \quad (30)$$

در این جا $0.38/38$ یک ضریب تبدیل برای تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی است چون کیفیت برق و حرارت یکسان نیست. ضریب 0.38 معادل با بازده حرارتی یک نیروگاه حرارتی می‌باشد. در شب برای زمانی که ماده در تغییر فاز نباشد بازده مطابق معادله (۳۱) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{en,night} = \frac{M_r C_p \frac{T_r - T_a}{\Delta t}}{M_{pcm} C_{pcm} \frac{dT_{pcm}}{dt}} \quad (31)$$

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

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

$$U_{cond-c,g} = (L_c/K_c)^{-1} \quad (18)$$

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

$$h_{rad-c,sky} = \varepsilon_c \sigma (T_{sky} + T_c) (T_{sky}^2 + T_c^2) \quad (19)$$

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

$$h_{conv-c,a} = 2.8 + 3V_w \quad (20)$$

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

$$h_{rad-p,g} = \sigma (T_g + T_p) (T_g^2 + T_p^2) / (1/\varepsilon_g + 1/\varepsilon_p - 1) \quad (21)$$

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

$$h_{rad-g,sky} = \varepsilon_g \sigma (T_{sky} + T_g) (T_{sky}^2 + T_g^2) \quad (22)$$

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

$$h_{conv-g,a} = 2.8 + 3V_w \quad (23)$$

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

$$h_{conv-g,f} = 2.8 + 3V_f \quad (24)$$

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

$$U_{cond-p,pcm} = (L_p/K_p + L_{pcm}/K_{pcm})^{-1} \quad (25)$$

ضریب انتقال حرارت اتلافی از ماده تغییرفازدهنده به محیط به



شکل ۲. 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]

همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود اتاق سمت چپ مجهز به دیوار خورشیدی است و دارای ابعاد ۲/۶۶ متر (ارتفاع)، ۳ متر (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 شده است. مقادیر

$$\eta_{en,night} = \frac{M_r C_p \frac{T_r - T_a}{\Delta t}}{M_{pcm} L_{pcm}} \Delta t \quad (32)$$

مقدار متوسط بازده انرژی برای چهار شبانه روز از معادله (۳۲) به دست می‌آید.

$$\eta_{en,ave} = \frac{\sum \eta_{en}}{n} \times 10 \quad (33)$$

در این جا $n=183$ 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 گرفته شده در تحقیق حاضر، نتایج عددی پژوهش حاضر با داده‌های آزمایشگاهی جی و همکاران [۶] مقایسه شده است. جی و همکاران [۶] یک دیوار خورشیدی فتوولتائیک بدون ماده تغییرفازدهنده را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار داده‌اند. شکل ۲ تصویر دیوار خورشیدی مرجع [۶] را نشان می‌دهد.

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]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$A_p=2/1544m^2$	مساحت صفحه جاذب	$\alpha_g=0/05$	ضریب جذب شیشه
$A_g=2/2344m^2$	مساحت شیشه	$\tau_g=0/95$	ضریب عبور شیشه
$A_w=5/7456m^2$	مساحت دیوار بیرونی	$\varepsilon_g=0/23$	ضریب صدور شیشه
$A_r=4/194m^2$	مساحت سطح اتاق	$\alpha_c=0/9$	ضریب جذب سلول
$b=0/184m$	عرض کانال هوا	$\beta_c=0/5$	درصد پوشش سطح
$D=0/118m$	عمق کانال هوا	$\varepsilon_c=0/7$	ضریب صدور سلول
$\rho=1/18kg/m^3$	چگالی هوا	$\alpha_p=0/9$	ضریب جذب صفحه جاذب
$C_p=1000 kJ/kg.K$	ظرفیت حرارتی هوا	$\varepsilon_p=0/9$	ضریب صدور صفحه جاذب
$v=1/57 \times 10^{-5} m^2/s$	ویسکوزیته هوا	$\alpha_w=0/48$	ضریب جذب دیوار بیرونی
$K_w=0/26W/m.K$	ضریب هدایت دیوار بیرونی	$K_c=0/39W/m.K$	ضریب هدایت سلول
$L_w=0/11m$	ضخامت دیوار بیرونی	$L_c=0/001m$	ضخامت سلول
$L_p=0/003m$	ضخامت صفحه جاذب	$L_g=0/005m$	ضخامت شیشه
$\eta_{el,ref}=0/13$	راندمان الکتریکی در حالت مرجع	$G_{ref}=1000 W/m^2$	تابش در حالت مرجع

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

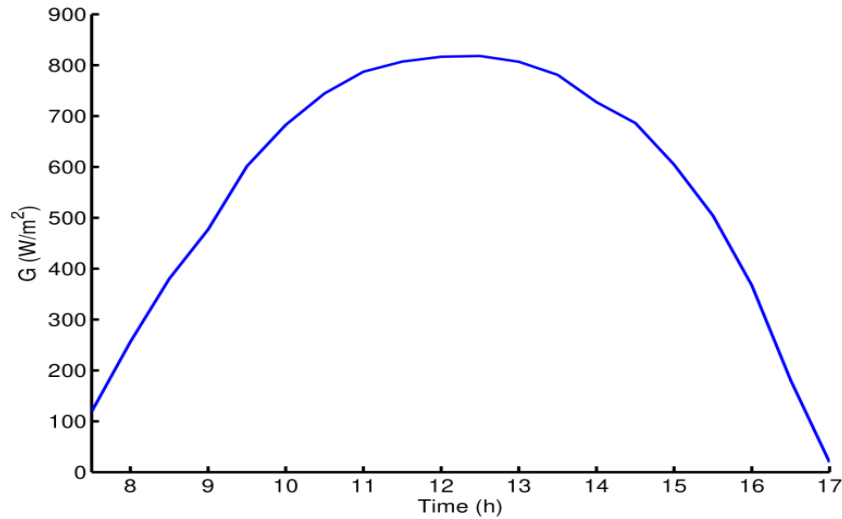
مقدار	پارامتر
$35RT$	نوع ماده تغییر فاز دهنده
$34^\circ C$	دمای جامد (محدوده پایین تر از تغییر فاز)
$36^\circ C$	دمای مایع (محدوده بالاتر از تغییر فاز)
$35^\circ C$	دمای ذوب
$2 kJ/kg.K$	ظرفیت گرمایی ویژه
$160 kJ/kg$	گرمای نهان ذوب
$0/77 kg/L$	چگالی مایع، $40^\circ C$
$0/88 kg/L$	چگالی جامد، $25^\circ C$

است. اندیس exp و sim به ترتیب مقدار آزمایشگاهی مرجع [۶] و مدل سازی تحقیق حاضر برای دماهای مذکور را نشان می‌دهد. به منظور مقایسه نتایج مدل سازی با اندازه گیری‌های تجربی خطای نسبی متوسط توسط معادلات (۳۴) و (۳۵) مورد سنجش و ارزیابی قرار می‌گیرد.

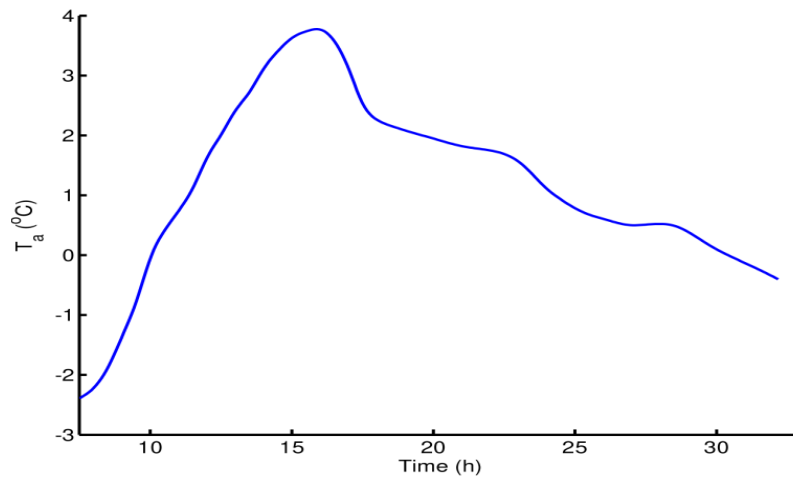
$$Er = \frac{1}{n} \sum_n \left| \frac{X_{exp} - X_{sim}}{X_{exp}} \right| \times 100 \quad (34)$$

تابش خورشیدی و دمای محیط شکل‌های ۳ و ۴ در مدل سازی کامپیوتری نیز اعمال گردیده است.

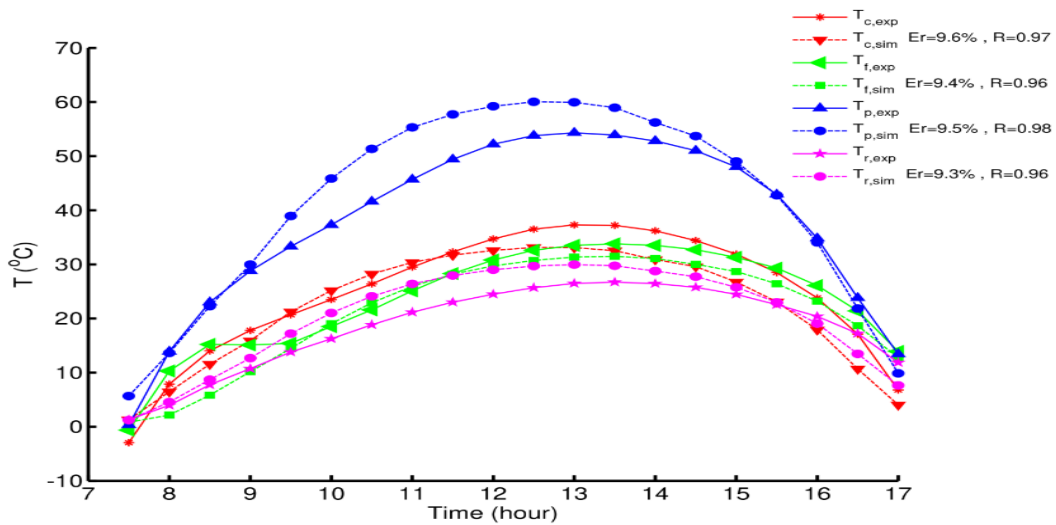
مطابق با شکل ۴ آزمایش در یک روز سرد انجام شده است به نحوی که دمای محیط بسیار پایین می‌باشد. دماهایی که در تحقیق جی و همکاران [۶] اندازه گیری شده است شامل دمای سلول (T_c)، دمای هوا درون کانال (T_f)، دمای صفحه جاذب (T_p) و دمای هوای اتاق (T_r) می‌باشد. در شکل ۵ مقایسه‌ای بین داده‌های آزمایشگاهی و مدل سازی برای دماهای مذکور انجام گرفته



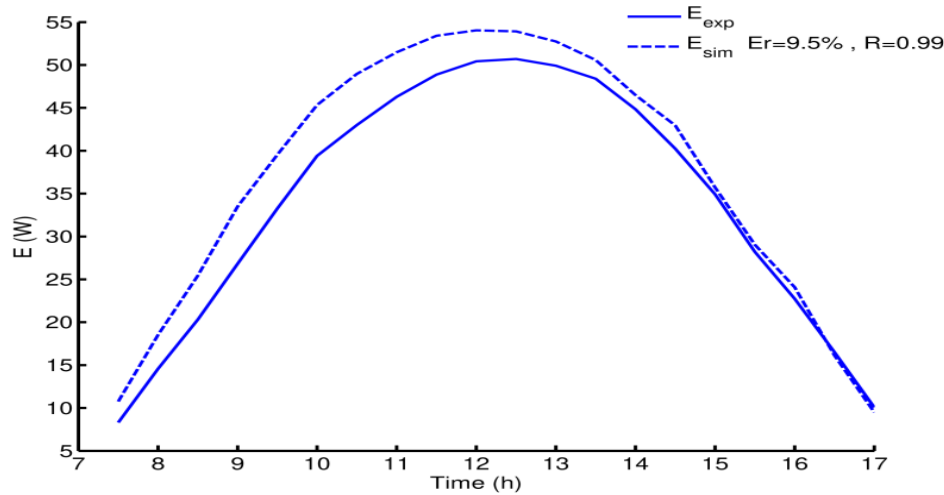
شکل ۳. شدت تابش خورشیدی بر حسب زمان [۶]
Fig. 3. Solar radiation intensity versus time [6]



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 مدل سازی توان الکتریکی خروجی الکتریکی از سلول های فتوولتائیک
 Fig. 6. Comparison of the experimental and modeling values of output electrical power from photovoltaic cells

لحاظ صحت و دقت تا حدودی برابری می کند. 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 پیچیده تر و زمان بر می باشد. از جمله دلایل خطای مشاهده شده می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- خطای در اندازه گیری داده های آزمایشگاهی مرجع [۶]
- خطا در استخراج داده ها از نمودارهای مرجع [۶] توسط نرم افزارهای استخراج داده از روی شکل
- استفاده از مدل انتقال حرارت ظرفیت متمرکز برای فرمول بندی اجزاء سیستم
- ثابت در نظر گرفتن برخی ضرایب انتقال حرارت و برخی ضرایب الکتریکی در فرایند شبیه سازی

۴- بررسی نتایج

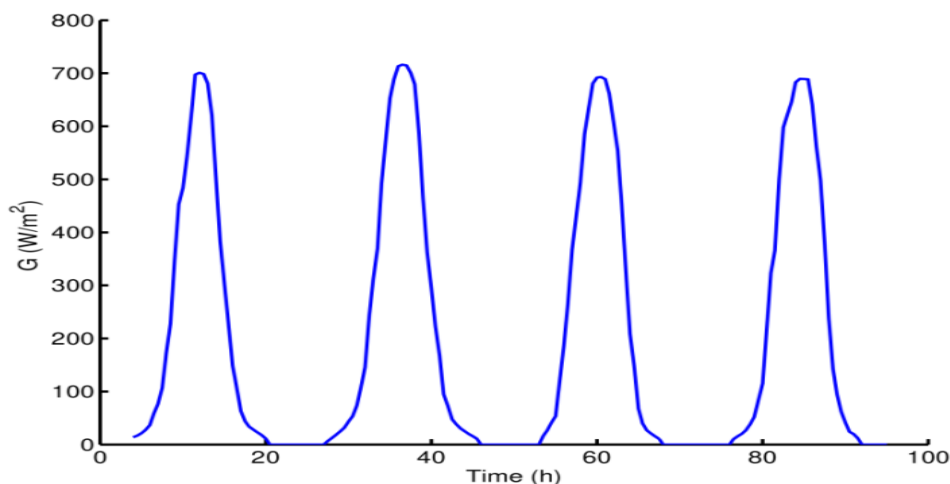
برای بررسی تغییرات دمای اتاق، پارامتر دمای بی بعد θ معرفی شده است. این پارامتر نشان می دهد که در طول شبانه روز، دمای اتاق تا چه میزان به دمای مطلوب اتاق نزدیک می باشد. محدوده تغییرات این پارامتر بین صفر و یک می باشد. هر چقدر مقدار θ به یک نزدیک تر شود دمای اتاق به مقدار مطلوب یا همان دمای آسایش نزدیک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

مقدار θ مطابق معادله (۳۶) محاسبه می شود:

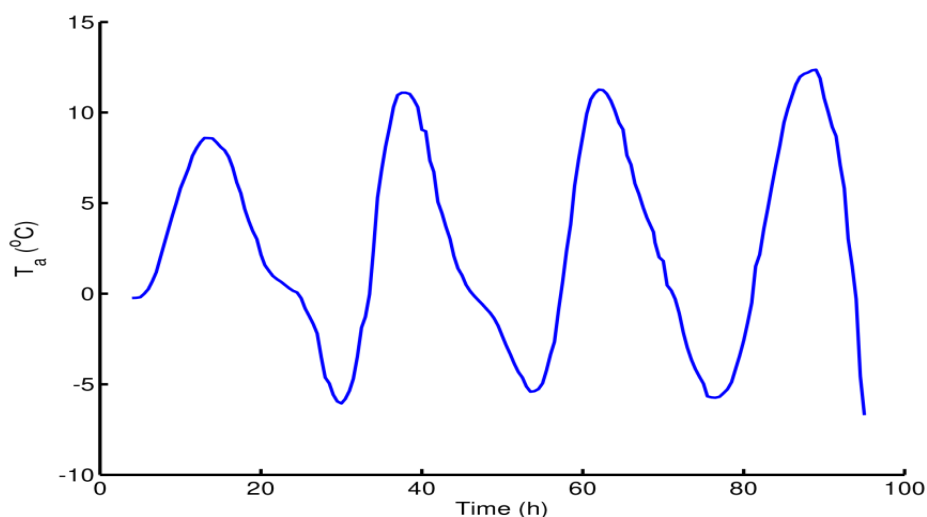
$$R = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n X_{exp} X_{sim} \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_{exp} \right) \left(\sum_{i=1}^n X_{sim} \right)}{\sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n X_{exp}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n X_{exp} \right)^2} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n X_{sim}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n X_{sim} \right)^2}} \quad (35)$$

همان طور که از شکل ۵ مشاهده می شود، تطابق خوبی بین داده های آزمایشگاهی با نتایج مدل سازی 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 می باشد. در شکل ۶ مقایسه ای بین مقادیر آزمایشگاهی [۶] و مدل سازی توان الکتریکی خروجی از سلول های فتوولتائیک انجام شده است.

در شکل ۶ اندیس exp مقادیر آزمایشگاهی مربوط به مرجع [۶] را نشان می دهد. مطابق با این شکل تطابق خوبی بین مقادیر تجربی و مدل سازی توان الکتریکی وجود دارد به نحوی که خطای متوسط نسبی و ضریب رگرسیون خطی به ترتیب ۹/۵ درصد و ۰/۹۹ می باشد. از نتایج شکل های ۵ و ۶ می توان استدلال کرد که مدل ریاضی ارائه شده در تحقیق حاضر با دقت نسبتاً مناسبی می تواند پارامترهای عملکردی دیوار خورشیدی را پیش بینی 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



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]

تعریف می‌شود:

$$\theta_{ave} = \frac{1}{n} \sum_n \theta \quad (37)$$

در این جا $n=183$ 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

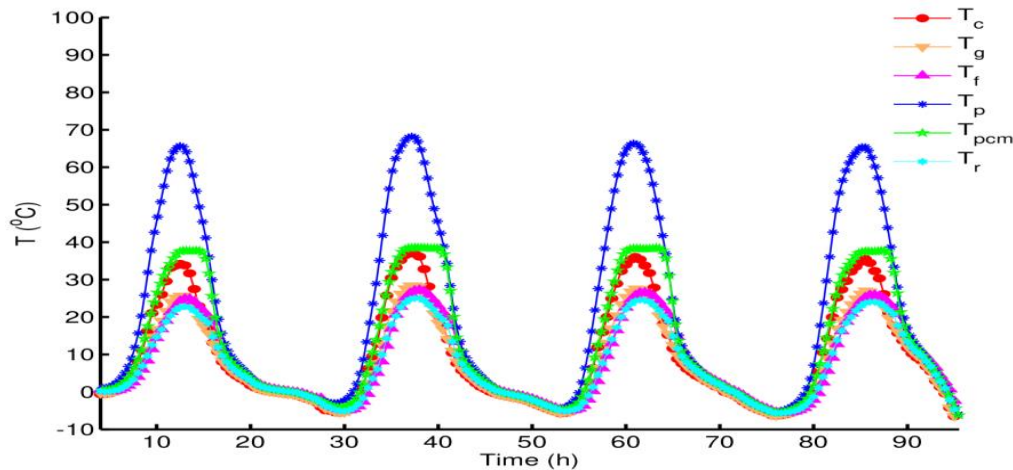
$$\theta = 1 - \frac{T_{indoor} - T_r}{T_{indoor} - T_a} \quad (36)$$

در معادله (۳۶) پارامتر T_{indoor} دمای آسایش در اتاق می‌باشد. مقدار این دما در استانداردهای طراحی 23°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 25°C و برای شب 20°C در نظر گرفته شده‌است.

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

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

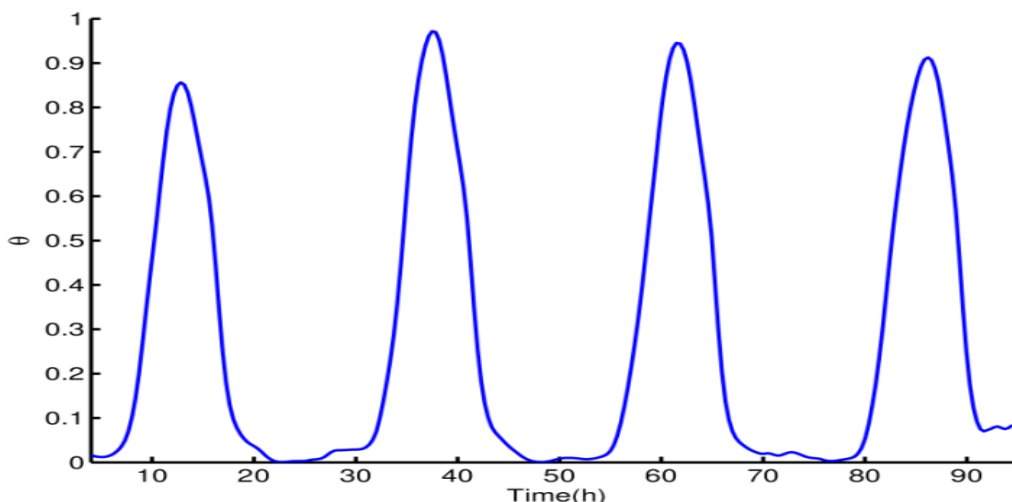


شکل ۹. تغییرات دمای قسمت‌های مختلف سیستم برای چهار روز متوالی
Fig. 9. Temperature variations of the various components of the system for four consecutive days

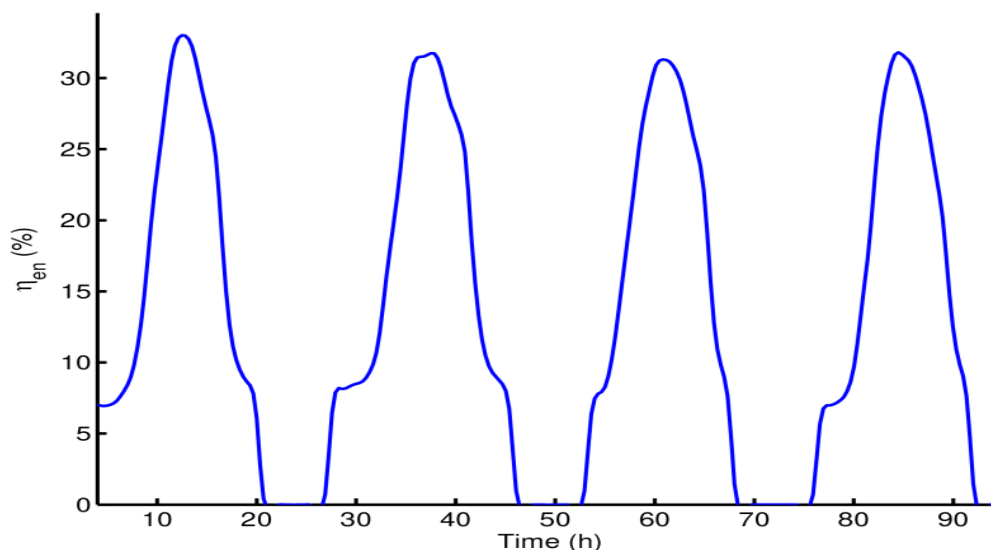
پارامترهای مطلوب نهایی جدول ۳ در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است دمای صفحه جاذب که دارای بیشترین ضریب جذب می‌باشد از بقیه اجزای سیستم بیشتر می‌باشد. با توجه به مقادیر تابش خورشیدی استفاده شده جهت شبیه‌سازی، ماده تغییرفازدهنده در بازه‌ی کوتاهی از روز وارد تغییرفاز شده و 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 20°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 25°C که دمای طراحی انتخاب شده می‌باشد

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 شده است. 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 شده است. 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 شده است. مقادیر سایر پارامترها مطابق جدول ۱ می‌باشند. برای به‌دست آوردن مقادیر بهینه هر یک از پارامترها از روش جستجوی مستقیم استفاده شده است. 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



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



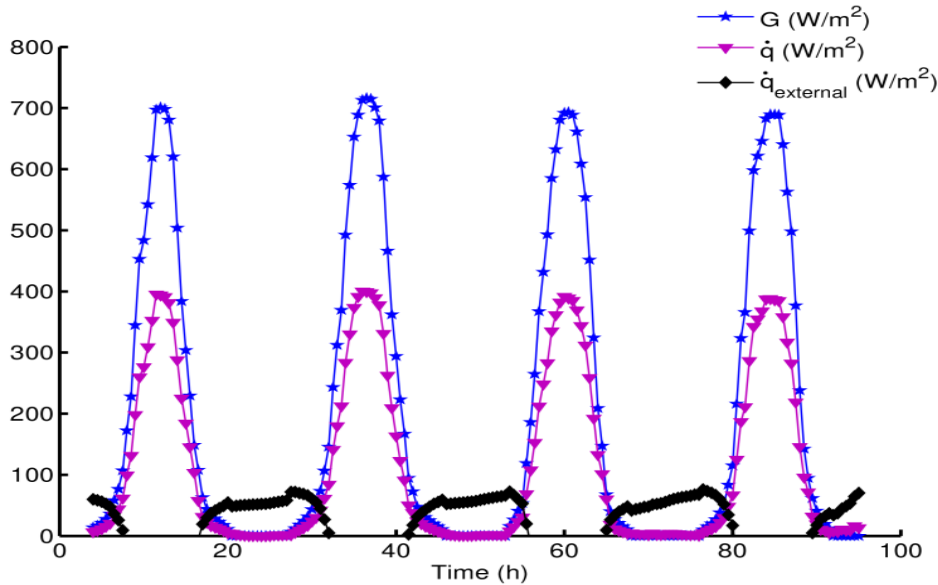
شکل ۱۱. تغییرات مقدار بازده انرژی برای چهار روز متوالی
 Fig. 11. Variations of energy efficiency value for four consecutive days

انجام شده است که \dot{q} شار رسیده به اتاق زمانی که ضلع جنوبی اتاق دارای دیوار خورشیدی باشد و گرمایش اتاق توسط این سیستم تأمین شود، می باشد و $\dot{q}_{external}$ شار مورد نیاز اتاق برای رساندن دمای اتاق به دمای آسایش، که در روز 25°C و در شب 20°C می باشد که توسط سیستم های گرمایش دیگر تأمین می شود. 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 می باشد و از معادله (۳۸) محاسبه می شود.

نزدیک می شود که این امر توانایی این سیستم در بهبود دمای اتاق را در طول روز نشان می دهد.

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

مطابق شکل ۱۱ مقدار بازده انرژی در بازه روز سیر صعودی داشته و در ساعاتی با بیشترین تابش مقدار آن به حدود ۳۵٪ نیز می رسد. 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 مقایسه ای بین \dot{q} با $\dot{q}_{external}$ و تابش خورشید



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

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.

$$\dot{q} = \dot{m}C_p(T_{fout} - T_{fin})/A_p + U_{loss-pcm,r}(T_{pcm} - T_r) \quad (41)$$

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 آن جایی 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 فتولتائیک در طول یک شبانه روز برابر با ۹۷۶/۲۲۵ وات

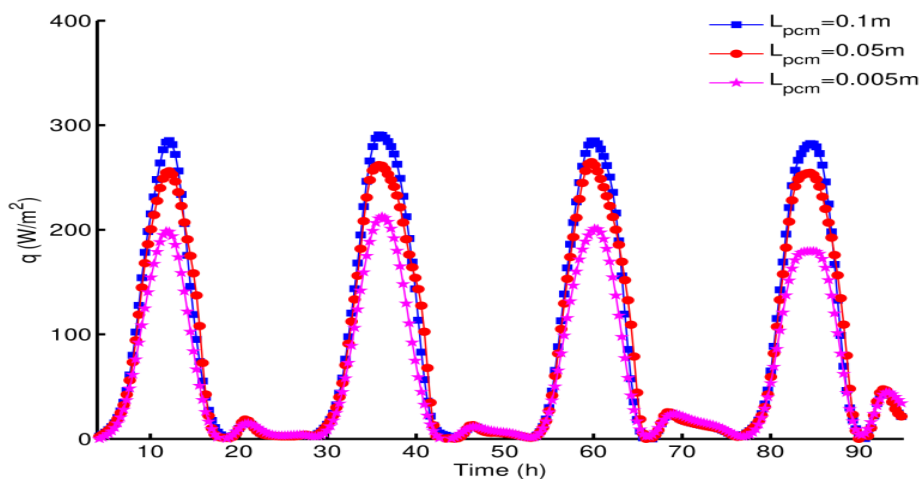
$$\dot{q} = \dot{m}C_p(T_{fout} - T_{fin})/A_w + U_{loss-pcm,r}(T_{pcm} - T_r)A_p/A_w + G\alpha_w - U_{loss-r,w}(T_r - T_{w_o}) \quad (38)$$

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

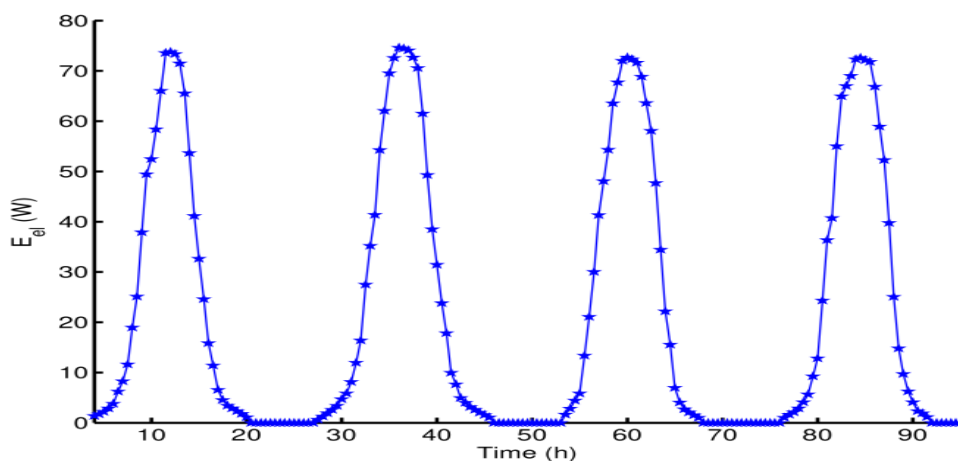
$$\dot{q}_{external-day} = U_{loss-r,a}A_r(25 - T_a)/A_w - G\alpha_w \quad (39)$$

$$\dot{q}_{external-night} = U_{loss-r,a}A_r(20 - T_a)/A_w \quad (40)$$

مطابق شکل ۱۲ تغییرات شار رسیده به اتاق متناسب با تابش تغییر می‌کند، به طوری که در طول روز و در ساعات اوج تابش خورشید، مقدار آن به ۴۰۰ W/m² 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/m² گرما توسط



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

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.

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

فهرست علائم	علامت	نشانه	مرجع
A	مساحت (m^2)	$Solar$	آسمان
b	عرض کانال (m)	S	عرضی
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)	St	تغییرات زمانی
d	قطر هیدرولیکی (m)	sim	شبیه‌سازی
dx	طول المان (m)	v	دریچه هوا
\dot{E}	نرخ انرژی (W)	w	باد و دیوار نرمال
G	شدت تابش خورشید (W/m^2)	علائم یونانی	
g	شتاب گرانش (m/s)	α	ضریب جذب
h	ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)	β	ضریب فشردگی
K	ضریب انتقال حرارت هدایت (W/mK)	σ	ثابت استفان بولتزمن (J/m^2K^4s)
L	طول (m)	ε	ضریب صدور
M	جرم (kg)	ρ	چگالی (kg/m^3)
\dot{m}	دبی جرمی (kg/s)	Δ	تغییرات
n	تعداد داده‌های آزمایش	δ	انحراف دمای فرضی ($^{\circ}C$)
P	فشار (Pa)	η	راندمان
\dot{Q}	نرخ حرارت (W)	τ	ضریب انتقال
\dot{q}	شار حرارتی (W/m^2)	θ	دمای بی بعد
Re	عدد رینولدز	ϑ	ویسکوزیته (m^2/s)
R	ضریب رگرسیون خطی	زیرنویس‌ها	
T	دما (K)	a	محیط
t	زمان (s)	ave	میانگین
U	ضریب انتقال حرارت (W/m^2K)	c	سلول‌های خورشیدی
V	سرعت (m/s)	cv	حجم کنترل
\dot{W}	نرخ انرژی الکتریکی (W)	$cond$	هدایتی
f	جریان هوا (سیال)	$conv$	جابجایی
g	شیشه	day	روز
m	ذوب	el	الکتریکی
max	ماکزیمم	exp	آزمایشگاهی
$night$	شب	$external$	خارجی
$indoor$	داخلی	en	انرژی
$loss$	اتلافی	مراجع	
out	خروجی	[1] V. Ghabadian, Climatic study of traditional Iranian buildings, University of Tehran, Second edition, 2003 (In Persian).	
P	صفحه جاذب		
pcm	ماده تغییر فاز دهنده		
r	فضای اتاق		
rad	تابشی		

- 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).
- [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

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](https://doi.org/10.22060/mej.2019.16268.6315)



