

ارزیابی مقایسه‌ای از الگوهای متفاوت برای یک سیستم خورشیدی با جاذب ماژول فتوولتایی نیمه شفاف

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
hadi.alirezai1995@gmail.com

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
bmziapour@gmail.com

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران،
s_gh9137@yahoo.com

هادی علیرضایی

بهروز میرزایی ضیاپور*

سپیده قرآن نویس

چکیده

قیمت واحد کمتر و بازدهی قابل قبول دو فاکتور مهم در انتخاب گردآور خورشیدی خانگی به‌شمار می‌آیند. سیستم خورشیدی غیر فعال فتوولتایی-گرمایی (PVT) به دلیل سادگی و یکپارچه بودن ساختمان آن، سیستمی بهینه و اقتصادی برای تولید همزمان آب گرم و الکتریسیته در نواحی آب و هوایی مختلف می‌باشد. در این مقاله با هدف کاهش هزینه‌ها و بهبود بازدهی سیستم غیر فعال خورشیدی، طرح جدیدی از این نوع سیستم پیشنهاد شده است. این سیستم شامل ماژول نیمه شفاف خورشیدی a-Si است که علاوه بر تولید الکتریسیته در نقش جاذب خورشیدی نیز عمل می‌کند. دلیل انتخاب ماژول نیمه شفاف a-Si پایین بودن مقدار سیلیکون و مصرف انرژی پایین در تولید آن است؛ این عامل موجب پایین بودن قیمت آن در مقایسه با سایر ماژول‌های خورشیدی می‌باشد. در کار حاضر چهار حالت مختلف از سیستم‌های غیر فعال خورشیدی PVT شبیه‌سازی و مقایسه شده‌اند. براساس نتایج سیستم یک دارای راندمان گرمایی بیشتر نسبت به سیستم ۳ و ۴ و توان تولیدی بیشتری نسبت به ۳ سیستم دیگر می‌باشد. برای سیستم یک راندمان گرمایی ۸۴-۷۶٪ و راندمان الکتریکی ۹۸۷-۸۱۹۴٪ به‌دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: ماژول خورشیدی a-Si؛ سیستم خورشیدی غیر فعال؛ تولید همزمان آب گرم و الکتریسیته.

Comparative evaluation of different patterns for a solar system with a semi-transparent photovoltaic module absorber

H. Alirezai
B. Mirzaei Ziapour
S. Ghorannevis

Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabil, Ardebil, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabil, Ardebil, Iran
Department of Mechanical Engineering, University of Mohaghegh Ardabil, Ardebil, Iran

Abstract

Lower unit cost and acceptable efficiency are two important factors in choosing a domestic solar collector. Due to its simplicity and integrated structure, the passive photovoltaic-thermal (PVT) solar system offers a promising part of the co-generation of water heating and electricity in varied climates. In this paper to the aim of looking at solar costs and improving energy conversion efficiency, a new passive PVT solar system has been proposed. This system includes a semi-transparent a-Si solar module, which in addition to generating electricity acts as a solar absorber. The semi-transparent a-Si solar cell is selected because of its useful features that help reduce module cost such as the relatively small amount of silicon and energy used in their manufactures. In the present work, the four different cases of passive PVT systems have been simulated and compared. The results show that the case number one includes glass cover and semi-transparent a-Si module has simpler design and better performance than other designs. The results show that the case number one, which includes glass cover and semi-transparent a-Si module, has higher thermal efficiency than case number 3 and 4 and higher power output than the other 3 cases. For case number one thermal efficiency and electrical efficiency is achieved as 76-84% and 8.94% -9.87%, respectively.

Keywords: a-Si solar module, The passive solar system, The co-generation of water heating and electricity.

و نقطه ضعف سلول‌های خورشیدی، کاهش کارایی آن‌ها متناسب با افزایش دمای سطح است. جهت کاهش این دما می‌توان از جریان یک سیال استفاده نمود [۲]. به این منظور ادغام فتوولتایی با گردآور گرمایی رویکرد مناسبی جهت افزایش کارایی سلول‌های خورشیدی است. تبدیل همزمان انرژی خورشیدی به الکتریسیته و گرما که به‌عنوان گردآور گرمایی فتوولتایی (PVT) شناخته می‌شود، پیشرفت خوبی در تأمین تقاضای انرژی آینده است [۳].

سیستم‌های PVT با توجه به طراحی، ماژول فتوولتایی، سیال عامل و شدت تابش ورودی انواع مختلفی دارند [۴]. سیستم‌های PVT هیبریدی با سیال عامل آب به‌صورت تحلیلی و تجربی توسط تعدادی از

۱- مقدمه

انرژی یکی از مهم‌ترین عوامل جهت توسعه اقتصادی و پیشرفت صنعتی یک کشور است. انرژی خورشیدی از اصلی‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در دسترس انسان است، که به‌طور مستقیم یا غیر مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. فناوری فتوولتایی (PV) یکی از امیدوارکننده‌ترین فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر است که از نور خورشید به‌صورت مستقیم برق تولید می‌کند. یک ماژول فتوولتایی بسته به نوع سلول‌های خورشیدی و شرایط آب و هوایی، ۲۰-۶٪ از تابش خورشیدی را به برق تبدیل می‌کند. یکی از عوامل محدود کننده

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: bmziapour@gmail.com

محققان مورد بررسی قرار گرفته است [۵]-[۹]. در این سیستم‌ها از یک پمپ برای حفظ جریان آب داخل گردآور استفاده می‌شود. کالوگرو [۱۰] سیستم‌های هیبریدی را تحلیل نموده و بیان کرده است که میانگین راندمان سالانه سیستم خورشیدی فتوولتایی از ۲/۸ درصد به ۷/۷ درصد افزایش می‌یابد. دویی و تای [۱۱] دو نوع مختلف سیستم‌های PVT هیبریدی را آزمایش کرده، و راندمان الکتریکی ماژول PV را همراه با گردآور گرمایی و بدون گردآور گرمایی مورد بررسی قرار داده‌اند، نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که متوسط بازده فتوولتایی همراه با گردآور گرمایی ۰/۴ درصد بیشتر از ماژول PV رایج است. توافک و همکاران [۱۲] گردآور PVT هیبریدی ورق و لوله را بررسی نموده و بیان کرده‌اند که جذب بهتر گرما و کاهش هزینه تولید در مقایسه با سایر گردآورهای هیبریدی از مزایای این سیستم است.

در سال‌های اخیر مدل‌های PVT دیگری توسط محققان طراحی شده است. هزینه واحد پایین و راندمان قابل قبول دو عامل مهم در انتخاب آبرگمکن خورشیدی خانگی است [۱۳]. ترکیب گردآور خورشیدی و مخزن ذخیره‌سازی گرمایی در یک فضای فشرده، سیستم خورشیدی غیرفعال (passive) نامیده می‌شود، که نسبت به سایر دستگاه‌های خورشیدی ارزانتر می‌باشد [۲]. کاوشیک و همکاران [۱۴] یک نوع آبرگمکن خورشیدی غیرفعال با پیکربندی مستطیل ارائه کرده‌اند. اسمیت و همکاران [۱۵] تحلیل‌های تجربی در مورد تاثیر وجود بافل در آبرگمکن خورشیدی غیرفعال انجام داده‌اند. جرتزوس و کاوریس [۱۶] پارامترهای موثر بر عملکرد آبرگمکن خورشیدی غیرفعال صفحه تخت را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار داده و موقعیت و اندازه درگاه‌های چرخش و ترتیب و اندازه پره‌ها را به عنوان عوامل اصلی تاثیر گذار بر کارایی سیستم بهینه‌سازی نموده‌اند. اجویت و همکاران [۱۷] بررسی‌های تجربی بر روی گردآورهای خورشیدی به منظور تولید آب گرم با مخزن ذخیره ساز مثلثی شکل و جاذبی از جنس مس انجام دادند. نتایج نشان داد که به علت انتقال بهتر گرما به سیال، میانگین بازده گرمایی روزانه افزایش داشته است. هی و همکاران [۱۸] مطالعاتی تجربی در مورد سیستم PVT با گردآور صفحه تخت و سیال عامل آب، به منظور تولید همزمان گرما و الکتریسیته انجام دادند. براساس نتایج راندمان گرمایی ۴۰ درصد ثبت شده است. ضیاپور و همکاران [۲] به منظور کاهش اتلافات در شب از بازتابنده در آبرگمکن خورشیدی غیرفعال استفاده کرده‌اند. در شب این بازتابنده‌ها جمع شده و سطح گردآور را می پوشانند. هم‌چنین، این بازتابنده‌ها در طول روز باعث افزایش تابش ورودی به گردآور تا ۳۰/۷ درصد می‌شوند. ماژول‌های فتوولتایی شفاف (TPV) و نیمه شفاف (STPV) خورشیدی در چند سال گذشته توسعه یافته‌اند. محققان در حال تلاش برای بهبود کارایی TPV بدون آسیب رساندن به شفافیت هستند. حسین و همکاران [۱۹] فناوری‌های فتوولتایی شفاف خورشیدی که از سال ۲۰۰۷ به بعد با حداقل شفافیت ۲۰ درصد گزارش شده‌اند، را مورد بررسی قرار داده‌اند. استفاده از ماژول‌های خورشیدی نیمه شفاف در ساختمان‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است [۲۰]-[۲۲].

در پژوهش‌های قبلی رویکرد جدید استفاده از ماژول‌های نیمه شفاف خورشیدی در سیستم‌های PVT مورد مطالعه قرار نگرفته است. در این مقاله یک سیستم PVT غیرفعال با ماژول نیمه شفاف a-Si که سیستم STPV/T غیرفعال نامیده شده، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به

این منظور ابتدا این سیستم مدل‌سازی شده، سپس تاثیر جرم سیال داخل مخزن و مساحت سطح گردآور بر عملکرد این سیستم بررسی می‌شود. در نهایت عملکرد این سیستم جدید در چهار حالت مختلف مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- پیکربندی سیستم STPV/T غیرفعال

شکل ۱ نمای جانبی سیستم STPV/T غیر فعال مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مدل حاضر شامل یک پوشش شیشه‌ای، ماژول‌های a-Si، دو بازتابنده قابل جابجایی، جعبه عایق و مخزن آب با دو حجم جانبی V_A و V_B می‌باشد. حجم مخزن بالا (V_A)، ۴ برابر حجم مخزن پایین (V_B) است. بازتابنده‌ها هنگام تابش خورشید، پرتوهای خورشید را روی سطح گردآور منعکس می‌کنند، و هنگامی که تابش خورشید وجود ندارد، جمع شده و سطح گردآور را مانند عایق می‌پوشانند. با تابش خورشید، ماژول‌های a-Si مقداری از تابش ورودی را به الکتریسیته و گرما تبدیل می‌کند، و مقدار دیگر از آن عبور کرده و به آب داخل مخزن می‌رسد. گرمای تولیدی ماژول‌های a-Si از طریق انتقال گرما (جابجایی و رسانش) نیز به آب داخل مخزن منتقل می‌شود. دمای آب داخل مخزن به دلیل جذب تابش خورشید و گرمای تولیدی ماژول‌های a-Si افزایش می‌یابد. با افزایش دمای آب در نزدیکی ماژول‌های a-Si، چگالی آب کاهش یافته، و موجب اختلاف فشار بین قسمت‌های بالا و پایین آب و چرخش طبیعی آن می‌شود.

۳- مدل‌سازی سیستم STPV/T غیرفعال

در مدل‌سازی و تحلیل سیستم STPV/T غیرفعال که در شکل ۱ آورده شده، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است: ۱- تغییرات دمایی در عرض هر المان وجود ندارد؛ ۲- سرعت باد در بالا و پایین گردآور یکنواخت است؛ ۳- جابجایی آزاد آب در داخل گردآور صورت می‌گیرد؛ ۴- در طول روز از مخزن آب هیچ مصرفی وجود ندارد، و تنها در هنگام شب از آب داخل مخزن استفاده می‌شود [۱]-[۳]؛ ۵- تمام پرتوهای منعکس شده توسط بازتابنده‌ها، می‌توانند به طور کامل سطح گردآور را بپوشانند؛ ۶- تابش ورودی یک بعدی (در جهت z، عمود بر پوشش شیشه‌ای) و اتلافات گرما سه بعدی می‌باشد؛ ۷- تحلیل سیستم به روش ظرفیت کلی می‌باشد [۲]، [۱۱]، [۲۳]، [۲۴]؛ ۸- فرض دیگر شرایط شبه پایا برای عملکرد سیستم می‌باشد [۱]، [۳]، [۲۵]. به منظور محاسبه ضریب انتقال گرمای کلی بخش‌های مختلف سیستم، شبکه مقاومت گرمایی سیستم حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است، شدت پرتوهای منعکس شده توسط بازتابنده‌ها به صورت زیر به دست می‌آید [۲۶]:

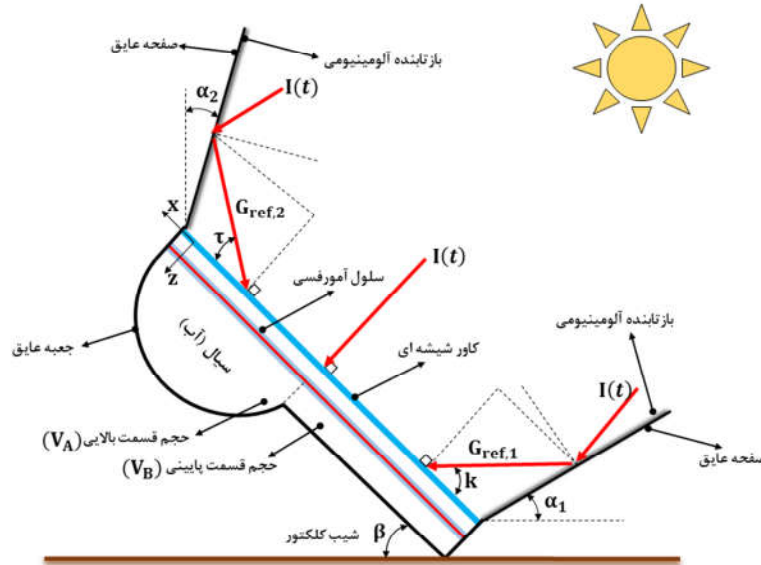
$$G_{ref,1} = \rho_{al} I(t) \sin(k) \sin[\pi/2 - (\beta + \alpha_1)] \quad (1)$$

$$k = 2(\beta + \alpha_1) - \pi/2$$

$$G_{ref,2} = \rho_{al} I(t) \sin(\tau) \cos[\pi/2 + (\alpha_2 - \beta)] \quad (2)$$

$$\tau = \pi/2 + 2(\alpha_2 - \beta)$$

که در روابط بالا k : زاویه بین پرتوهای بازتاب شده از بازتابنده پایینی و پوشش شیشه‌ای و τ : زاویه بین پرتوهای بازتاب شده از بازتابنده بالایی و پوشش شیشه‌ای می‌باشد.



شکل ۱- نمای جانبی سیستم STPV/T غیر فعال

$$U_{\text{loss}} = \left[\frac{L_{\text{ins}}}{k_{\text{ins}}} + \frac{1}{h_{\text{g,amb}}} \right]^{-1} \quad (10)$$

که در آن [۲۵]:

$$h_{\text{g,amb}} = 3.9U_{\text{wind}} + 5.62 \quad (11)$$

ضریب انتقال گرمای تابشی بین پوشش شیشه‌ای و آسمان ($h_{\text{rg,sky}}$) از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۵]:

$$h_{\text{rg,sky}} = \varepsilon_{\text{g}} \sigma \left[(T_{\text{g}} + 273)^2 + (T_{\text{sky}} + 273)^2 \right] \times \left[(T_{\text{g}} + 273) + (T_{\text{sky}} + 273) \right] \quad (12)$$

ضریب انتقال گرمای تابشی بین پوشش شیشه‌ای و ماژول a-Si ($h_{\text{r,a-Si}}$) از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$h_{\text{r,a-Si}} = \frac{\sigma}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{a-Si}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{g}}} \right)^{-1}} \left[(T_{\text{a-Si}} + 273) + (T_{\text{g}} + 273) \right] \times \left[(T_{\text{a-Si}} + 273)^2 + (T_{\text{g}} + 273)^2 \right] \quad (13)$$

ضریب انتقال گرمای جابجایی آب داخل مخزن به صورت زیر به دست می‌آید [۲۸]:

$$Nu_{\text{xf}} = \frac{h_{\text{xx}} x}{k_{\text{f}}} = 0.6 \left(Gr_{\text{x}}^* Pr_{\text{f}} \right)^{1/5} \quad (14)$$

که در رابطه فوق Gr_{x}^* عدد گراشوف اصلاح شده انتقال گرمای همرفت آزاد برای جریان آب بر روی صفحه افقی شیبدار می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Gr_{\text{x}}^* = Gr_{\text{x}} Nu_{\text{x}} = \frac{g \sin(\beta) G_{\text{t}}(t) \beta_{\text{f}} X^4}{k_{\text{f}} \nu_{\text{f}}^2} \quad (15)$$

در رابطه فوق x طول صفحه افقی شیبدار می‌باشد که در کار حاضر با طول گردآور برابر است ($x=1$)،

$$h_{\text{f}} = \bar{h} = \frac{5}{4} h_{(x=1)} \quad (16)$$

بنابراین $G_{\text{t}}(t)$ مجموع تابش خورشیدی عمود بر روی سطح گردآور با زاویه β می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید [26]:

$$G_{\text{t}}(t) = I(t) + G_{\text{ref},1} + G_{\text{ref},2} \quad (3)$$

با استفاده از منابع [۱۱]، [۲۳]، [۲۴] روابط برای کار حاضر بازنویسی شده است. معادله های پایستگی انرژی در ماژول های a-Si و آب داخل مخزن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau_{\text{g}} \alpha_{\text{a-Si}} G_{\text{t}}(t) w l = U_{\text{a-Si}} (T_{\text{a-Si}} - T_{\text{amb}}) w l + h_{\text{f}} (T_{\text{a-Si}} - T_{\text{f}}) w l + \eta_{\text{a-Si}} \tau_{\text{g}} \alpha_{\text{a-Si}} G_{\text{t}}(t) w l \quad (4)$$

با توجه به شرایط اولیه ($t=0$ and $T_{\text{f}} = T_{\text{fi}}$) از حل معادلات فوق دمای آب داخل مخزن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\tau_{\text{g}} \tau_{\text{a-Si}} G_{\text{t}}(t) A_{\text{c}} + h_{\text{f}} (T_{\text{a-Si}} - T_{\text{f}}) A_{\text{c}} = U_{\text{loss}} A_{\text{ins}} (T_{\text{f}} - T_{\text{amb}}) + M_{\text{f}} C_{\text{f}} \frac{dT_{\text{f}}}{dt} \quad (5)$$

$$T_{\text{f}} = \frac{f(t)}{a} [1 - \exp(-at)] + T_{\text{fi}} \exp(-at) \quad (6)$$

در رابطه فوق a و $f(t)$ برابر هستند با:

$$a = \frac{1}{M_{\text{f}} C_{\text{f}}} \left(U_{\text{loss}} A_{\text{ins}} + h_{\text{f}} A_{\text{c}} - \frac{h_{\text{f}}^2 A_{\text{c}}}{U_{\text{a-Si}} + h_{\text{f}}} \right) \quad (7)$$

$$f(t) = \frac{1}{M_{\text{f}} C_{\text{f}}} \left[\tau_{\text{g}} \tau_{\text{a-Si}} G_{\text{t}}(t) A_{\text{c}} + U_{\text{loss}} A_{\text{ins}} T_{\text{amb}} + \frac{h_{\text{f}} A_{\text{c}}}{U_{\text{a-Si}} + h_{\text{f}}} (1 - \eta_{\text{a-Si}}) \tau_{\text{g}} \alpha_{\text{a-Si}} G_{\text{t}}(t) + U_{\text{a-Si}} T_{\text{amb}} \right] \quad (8)$$

در معادلات بالا، با استفاده از شبکه مقاومت گرمایی سیستم (شکل ۲) داریم:

$$U_{\text{a-Si}} = \left[\frac{L_{\text{a-Si}}}{k_{\text{a-Si}}} + \frac{1}{(h_{\text{c,a-Si}} + h_{\text{r,a-Si}})} + \frac{L_{\text{g}}}{k_{\text{g}}} + \frac{1}{(h_{\text{g,amb}} + h_{\text{rg,sky}})} \right]^{-1} \quad (9)$$

است. گردآور مورد مطالعه‌ی آن‌ها از جاذب ۱mm مس ساخته شده بود. هم‌چنین دارای مخزنی به حجم ۱۲۷ لیتر با سطح گردآور ۱m² و زاویه شیب $\beta = 45^\circ$ بوده است. سپس در حالتی دیگر که آبگرمکن خورشیدی دارای ماژول خورشیدی است، دمای سیال داخل مخزن با نتایج هی و همکاران [۱۸] در شکل ۵ مقایسه شده است. آن‌ها در سیستم خود از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی پلی کریستالی با بازده تبدیل ۱۴/۵٪ و جاذب با جنس آلیاژ آلومینیوم استفاده کردند. هم‌چنین ظرفیت مخزن آب و سطح گردآور برای سیستم مورد مطالعه آن‌ها به ترتیب ۹۵kg و ۱/۶۴m² بوده است. به‌منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از برنامه EES برای مدل حاضر، با یکسان‌سازی شرایط و پارامتر دو پژوهش بالا در کد رایانه‌ای سیستم حاضر نتایج حاصل برای دمای سیال داخل مخزن را به‌دست آورده، و با نتایج پژوهش آن‌ها مقایسه کرده‌ایم، که نتایج در شکل‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به یکسان بودن روند تغییرات دمای سیال داخل مخزن در طول روز و هم‌چنین نزدیک بودن داده‌های حاصل از کد رایانه‌ای با نتایج دو پژوهش بالا می‌توان نتیجه گرفت کد رایانه‌ای نوشته شده برای سیستم حاضر نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد.

۵- نتایج و بحث

مشخصات و داده‌های مورد نیاز شبیه‌سازی سیستم STPV/T غیرفعال مورد مطالعه، در جدول ۱ ارائه شده است. به‌کمک این جدول و حل معادلات بخش ۳، می‌توان دمای سیال داخل مخزن، دمای ماژول a-Si، راندمان گرمایی و راندمان الکتریکی سیستم را محاسبه نمود. با در نظر گرفتن پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ و مقدار ثابت ۱/۵m² برای سطح مقطع گردآور، پنج مقدار متفاوت ۱۲۰، ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ کیلوگرم برای جرم سیال داخل مخزن (M_f) تاثیر این پارامتر بر عملکرد سیستم STPV/T غیرفعال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. در شکل ۶ تغییرات دمای سیال و راندمان متوسط گرمایی گردآور بر حسب زمان و در شکل ۷ تغییرات دما و راندمان لحظه‌ای الکتریکی ماژول a-Si بر حسب زمان، به ازای جرم‌های مختلف سیال داخل مخزن نشان داده شده است. با توجه به ثابت بودن سطح گردآور، تابش ورودی به گردآور نیز ثابت می‌باشد. به‌همین دلیل با افزایش جرم سیال داخل مخزن ظرفیت گرمایی سیال در سیستم افزایش و دمای سیال کاهش می‌یابد. با توجه به رابطه ۱۸، با افزایش جرم سیال راندمان گرمایی افزایش پیدا خواهد کرد، که در شکل ۶ قابل مشاهده است. با افزایش جرم سیال دمای آن کاهش می‌یابد. بنابراین دمای ماژول a-Si نیز با افزایش جرم سیال داخل مخزن کاهش و راندمان لحظه‌ای الکتریکی آن افزایش می‌یابد، که در شکل ۷ قابل مشاهده است. در مصارف خانگی دمای سیال ۶۰ تا ۶۵ درجه سلسیوس کافی می‌باشد. راندمان گرمایی و الکتریکی سیستم در جرم ۲۰۰ کیلوگرم دارای بیشترین مقدار است.

مقدار $h_{c,a-Si}$ هم همانند h_f از روابط بالا به‌دست می‌آید. بازه لحظه‌ای الکتریکی ماژول a-Si وابسته به دما از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۹]:

$$\eta_{a-Si} = \eta_0 [1 - \beta_0 (T_{a-Si} - 25)] \quad (17)$$

در این رابطه، η_0 بازده ماژول a-Si در شرایط استاندارد $I(t) = 1000 \text{ W/m}^2$ و دمای $T_{a-Si} = 25^\circ \text{C}$ و β_0 ضریب گرمایی ماژول a-Si است. بازه متوسط گرمایی گردآور وابسته به دما از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۲۵]:

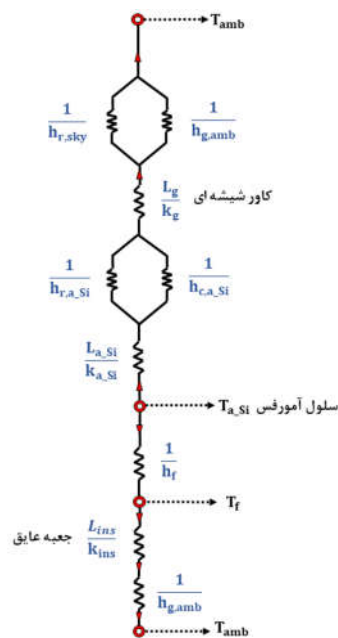
$$\eta_{th} = \frac{M_f C_f (T_f^t - T_f^0)}{A_c \int_0^t G_t(t) dt} \quad (18)$$

که در آن T_f^t دمای سیال مخزن در زمان t و T_f^0 مقدار اولیه دمای سیال مخزن در زمان $t=0$ می‌باشد. راندمان متوسط الکتریکی ماژول a-Si از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳]:

$$\eta_{a-Si} = \frac{\int_0^t \eta_{a-Si} dt}{t} \quad (19)$$

توان تولیدی لحظه‌ای ماژول a-Si (W) را از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$P_{a-Si} = \tau_g \alpha_{a-Si} \eta_{a-Si} G_t(t) w l \quad (20)$$



شکل ۲- شبکه مقاومت گرمایی سیستم حاضر

۴- روش حل و اعتبار سنجی

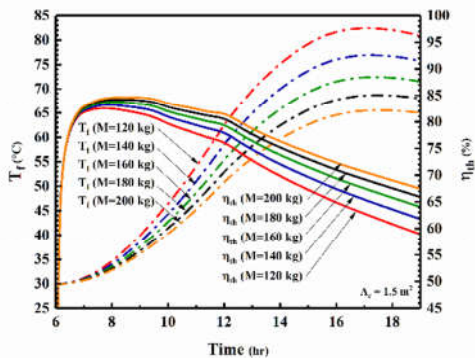
جهت تحلیل سیستم حاضر یک کد رایانه‌ای در نرم افزار EES نوشته شده است. اطلاعات ورودی سیستم شامل تابش خورشید و دمای محیط از مرجع [۲] اقتباس شده، که برای یک روز بدون ابر در شکل ۳ آمده است. به‌منظور اعتبار سنجی مدل حاضر، ابتدا در حالتی که آبگرمکن خورشیدی بدون ماژول خورشیدی است، دمای سیال داخل مخزن با نتایج اجویی و همکاران [۱۷] در شکل ۴ مقایسه شده

L_{a-Si}	۰/۰۱۵ m	ρ_{al}	۰/۸۵
$L_{ins,ref}$	۰/۰۵ m	τ_g	۰/۹۶
M_f	۲۰۰ kg	τ_{a-Si}	۰/۲۳۵

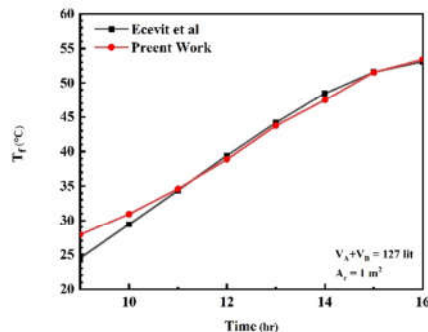
تأثیر مساحت سطح گردآور (A_c) بر عملکرد سیستم STPV/T غیرفعال با در نظر گرفتن پارامترهای ارائه شده در جدول ۱ و مقدار ثابت 200 kg برای جرم سیال داخل مخزن، سه مساحت 1.075 و 1.5 متر مربع در شکل‌های ۸ و ۹ مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۸ تغییرات دمای سیال و راندمان متوسط گرمایی بر حسب زمان ارائه شده است. تغییرات ساعتی توان تولیدی لحظه‌ای و راندمان لحظه‌ای الکتریکی ماژول a-Si نیز در شکل ۹ آورده شده است. با افزایش سطح مقدار تابش ورودی به گردآور افزایش یافته و از آنجایی که جرم سیال ثابت است، دمای سیال نیز افزایش می‌یابد. افزایش مقدار انرژی گرمایی در دسترس، حاصل از بزرگتر شدن سطح در معرض تابش خورشیدی، علت افزایش دما می‌باشد.

با توجه به رابطه (۱۸) با افزایش سطح گردآور راندمان گرمایی کاهش می‌یابد، که در شکل ۸ نیز ارائه شده است. با افزایش سطح، مقدار تابش جذب شده توسط ماژول a-Si نیز افزایش می‌یابد، در نتیجه همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده، توان تولیدی نیز افزایش خواهد یافت. با توجه به افزایش دمای ماژول a-Si راندمان آن کاهش خواهد یافت. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹، در دو سطح 1.075 و 1 دمای سیال و توان تولیدی بسیار کاهش می‌یابد.

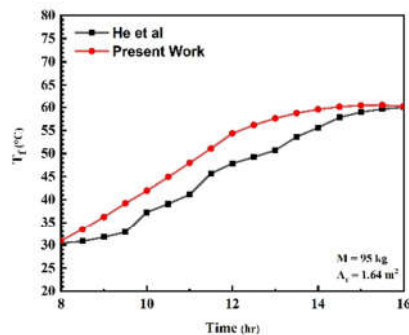
با توجه به بررسی‌های انجام شده و نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ۶-۹، سطح مقطع گردآور و جرم سیال داخل مخزن به‌ترتیب مقادیر 1.5 متر مربع و 200 کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود. حال عملکرد ۴ حالت مختلف سیستم STPV/T غیرفعال به‌شرح زیر که در شکل ۱۰ ارائه شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد:



شکل ۳- نمودار ساعتی تابش خورشیدی و دمای محیط [۲]



شکل ۴- دمای سیال داخل مخزن در کار حاضر و نتایج اجویت و همکاران [۱۷]



شکل ۵- دمای سیال داخل مخزن در کار حاضر و نتایج هی و همکاران [۱۸]

شکل ۶- نمودار تغییرات ساعتی دمای سیال و راندمان گرمایی به ازای جرم‌های مختلف سیال داخل مخزن

جدول ۱- پارامترهای طراحی سیستم STPV/T غیرفعال [۱]-[۳]، [۲۲]

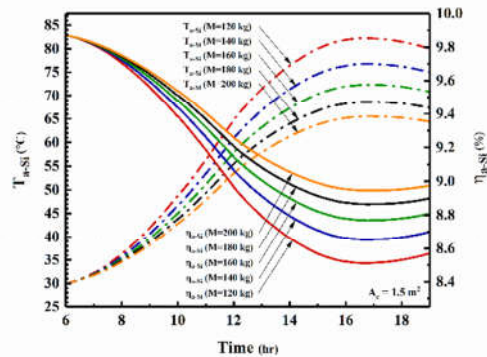
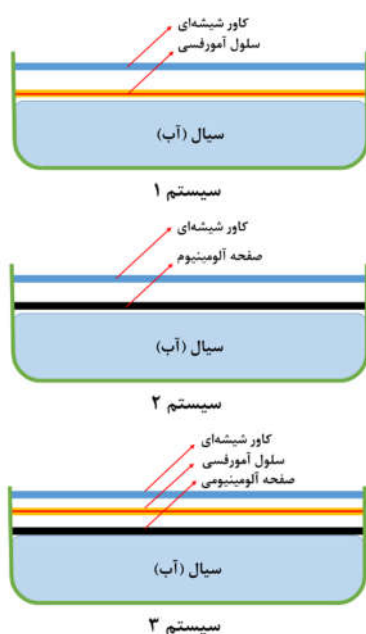
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
K_{a-Si}	۰/۲۵ W/mK	W	۱ m
K_g	۱ W/mK	α_1	° ۲۱
$K_{al,ref}$	۲۵۰ W/mK	α_2	° ۱۵
$K_{ins,ref}$	۰/۰۳۸ W/mK	α_{a-Si}	۰/۶۷
K_{ins}	۰/۰۳۸ W/mK	β	۴۵°
L_g	۰/۰۰۳ m	β_0	۰/۰۰۲۶ 1/K
L_{ins}	۰/۰۵ m	η_0	۰/۱

در شکل ۱۱ راندمان متوسط گرمایی و توان تولیدی لحظه‌ای بر حسب زمان حالت‌های مختلف سیستم STPV/T غیرفعال مقایسه شده‌اند. شکل ۱۲(الف) راندمان متوسط گرمایی و دمای سیال حالت‌های مختلف سیستم STPV/T غیرفعال در طول روز نشان می‌دهد. شکل ۱۲(ب) این تغییرات را در طی ۲۴ ساعت شبانه روز نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ (الف) مشاهده می‌شود، به دلیل نبود تبادل گرما با سیال در حالت‌های ۳ و ۴ راندمان گرمایی و دمای سیال نسبت به حالت‌های ۱ و ۲ کمتر است. با توجه به شکل ۱۲ (ب) و از آنجایی که سیستم در حالت ۲ تولید توان الکتریکی ندارد، راندمان سیستم در حالت ۱ از سایر حالت‌ها بیشتر است.

در شکل ۱۳ دما و راندمان لحظه‌ای الکتریکی ماژول a-Si بر حسب زمان در حالت‌های ۱، ۳ و ۴ که سیستم دارای ماژول a-Si می‌باشد، مقایسه شده است. از آنجایی که ماژول a-Si در حالت‌های ۳ و ۴ با سیال تبادل گرما وجود ندارد، راندمان الکتریکی افت نموده و توان کمتری تولید می‌شود.

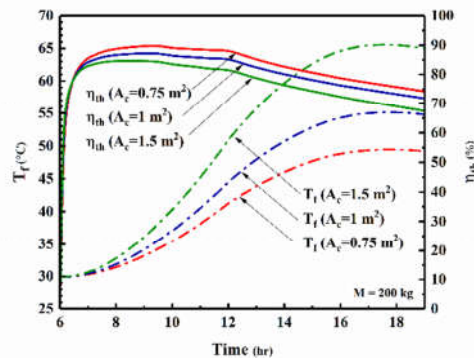
در شکل ۱۴ انرژی ذخیره شده توسط سیال داخل مخزن و کار تولید شده برحسب زمان حالت‌های مختلف سیستم STPV/T غیرفعال ارائه شده است.

از آنجا که انتقال گرما به داخل مخزن از طریق همرفت (در اینجا طبیعی) اتفاق می‌افتد؛ آب داخل مخزن الزاماً چرخشی خواهد بود. وقتی تابش خورشیدی بنابه دلایلی کمتر از اتلافات گرمایی سیستم خورشیدی گردد چرخش آب مخزن معکوس شده و جهت انتقال گرما از آب گرم ذخیره شده به سمت جاذب گردآور و به‌صورت اتلافی خواهد بود که یک عیب برای گردآورهای غیر فعال خورشیدی محسوب می‌شود. برای رفع مشکل این طرح صفحات بازتابنده علاوه بر نقش افزایش شدت تابش خورشیدی بر روی جاذب به‌عنوان درب گردآور نیز عمل خواهند کرد. به این‌گونه که در ساعات تابش کمتر و به‌ویژه در هنگام شب بر روی شیشه افتاده و امکان اتلافات را به حداقل می‌رسانند [۳۰].

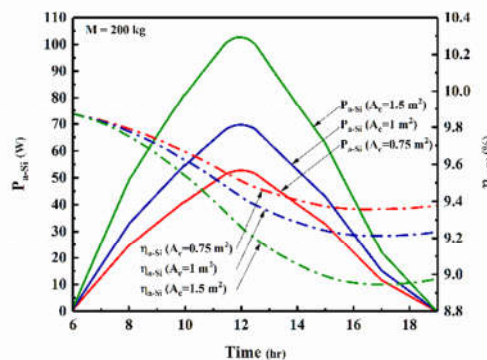


شکل ۷- نمودار تغییرات ساعتی دمای و راندمان ماژول a-Si به ازای جرم های مختلف سیال داخل مخزن

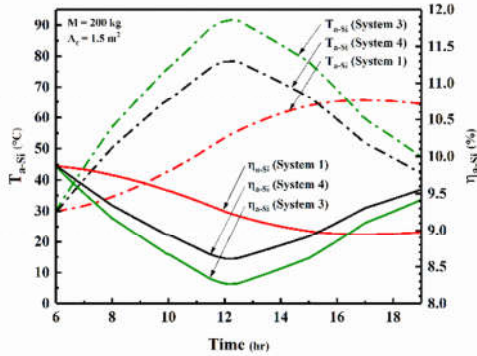
در حالت ۱ سیستم شامل پوشش شیشه‌ای، ماژول a-Si و مخزن عایق است. در حالت ۲ سیستم شامل پوشش شیشه‌ای، صفحه جاذب، فین و مخزن عایق است. در حالت ۳ سیستم شامل پوشش شیشه‌ای، ماژول a-Si، صفحه جاذب، فین و مخزن عایق است. در حالت ۴ سیستم شامل ماژول a-Si، صفحه جاذب، فین و مخزن عایق است.



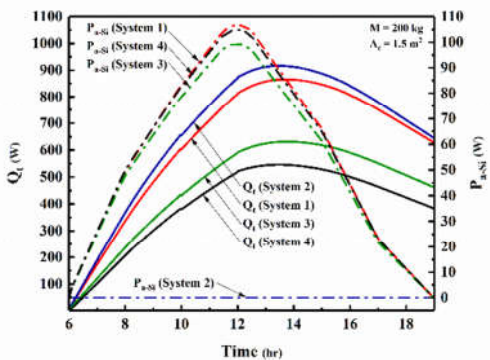
شکل ۸- نمودار تغییرات ساعتی دمای سیال و راندمان گرمایی به ازای مقادیر مختلف سطح گردآور



شکل ۹- نمودار تغییرات ساعتی توان تولیدی و راندمان ماژول a-Si به ازای مقادیر مختلف سطح گردآور



شکل ۱۳- نمودار مقایسه‌ای دما و راندمان ماژول a-Si در حالت‌های مختلف



شکل ۱۴- نمودار مقایسه‌ای انرژی ذخیره شده داخل سیال و توان تولیدی برای سیستم‌های مختلف

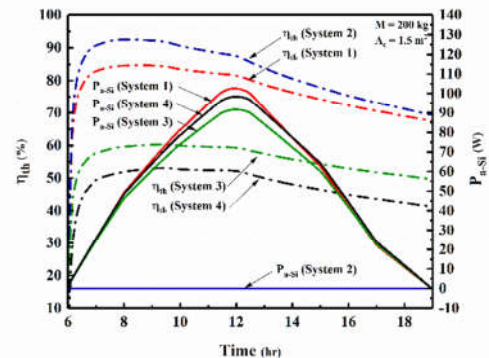
۶- نتیجه‌گیری

هدف عمده از این مقاله تحلیل عملکرد گردآور خورشیدی جدیدی است که به جای استفاده از سلول خورشیدی رایج از سلول خورشیدی نیمه شفاف استفاده شده است، و اتلافات گرمایی، توان تولیدی الکتریکی و گرمایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که:

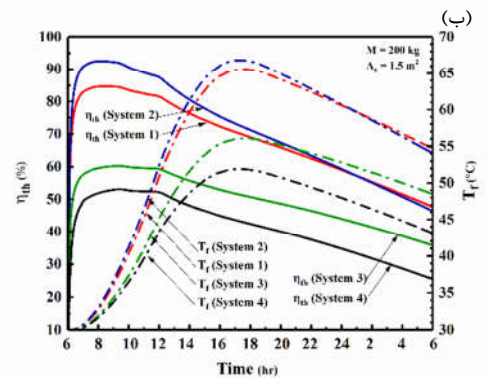
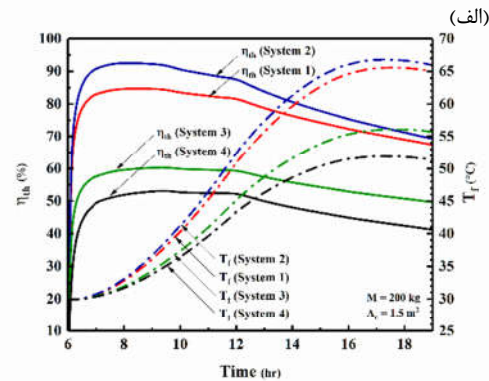
- افزایش جرم سیال داخل مخزن (M_f)، منجر به افزایش راندمان گرمایی و راندمان لحظه‌ای الکتریکی ماژول a-Si شده است.
- افزایش سطح مقطع (A_c)، منجر به کاهش راندمان گرمایی و افزایش توان تولیدی شده است.
- استفاده از سلول خورشیدی نیمه شفاف باعث کاهش اتلافات گرمایی در زمان نبود تابش می‌شود.
- در حالت ۱ سیستم به این علت که ماژول a-Si با سیال در ارتباط می‌باشد، دارای بازده الکتریکی بالاتری است.
- راندمان الکتریکی و توان تولیدی سیستم ۱ از سیستم ۳ و ۴ بیشتر است.



شکل ۱۰- انواع مختلف سیستم STPV/T مورد مطالعه



شکل ۱۱- نمودار مقایسه‌ای راندمان گرمایی و توان تولیدی برای سیستم STPV/T غیرفعال



شکل ۱۲- نمودار مقایسه‌ای راندمان گرمایی و دمای سیال حالت‌های مختلف سیستم STPV/T غیرفعال (الف) Time=6-19 (ب) Time=6-6

۷- نماد

α_1	زاویه بین صفحه افقی و بازتابنده پایینی (°)	A_c	سطح گردآور (m^2)
α_2	زاویه بین صفحه عمودی و بازتابنده بالایی (°)	A_{ins}	سطح جانبی عایق گردآور (m^2)
α_{a-Si}	ضریب جذب سلول آمورفس	C_f	گرمای ویژه سیال (J/KgK)
β	زاویه شیب گردآور خورشیدی (°)	G_t	مجموع تابش ورودی عمود بر سطح گردآور (W/m^2)
β_0	ضریب دمایی راندمان سلول آمورفس (1/K)	$G_{ref,1}$	تابش بازتاب شده از بازتابنده پایینی (W/m^2)
β_f	ضریب انبساط حجمی سیال (1/K)	$G_{ref,2}$	تابش بازتاب شده از بازتابنده بالایی (W/m^2)
ϵ_g	ضریب تابش پوشش شیشه‌ای	Gr	عدد بی بعد گراشهف
ϵ_{a-Si}	ضریب تابش سلول آمورفس	h_f	ضریب انتقال گرمای جابجایی بین سلول آمورفس و جریان سیال ($W/m^2 K$)
η_{a-Si}	راندمان الکتریکی لحظه‌ای سلول آمورفس	$h_{c,a-Si}$	ضریب انتقال گرمای جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و سلول آمورفس ($W/m^2 K$)
$\bar{\eta}_{a-Si}$	راندمان الکتریکی متوسط سلول آمورفس	$h_{r,a-Si}$	ضریب انتقال گرمای تابشی بین پوشش شیشه‌ای و سلول آمورفس ($W/m^2 K$)
η_0	راندمان سلول آمورفس در شرایط استاندارد $T_{a-Si} = 25^\circ C$ و $I(t) = 1000 \frac{W}{m^2}$	$h_{g,amb}$	ضریب انتقال گرمای جابجایی بین پوشش شیشه‌ای و محیط ($W/m^2 K$)
$\bar{\eta}_{th}$	راندمان متوسط گرمایی گردآور	$h_{rg,sky}$	ضریب انتقال گرمای تابشی بین پوشش شیشه‌ای و آسمان ($W/m^2 K$)
ρ_{al}	ضریب انعکاس از صفحه باز تابنده	I	تابش خورشیدی عمود بر گردآور با زاویه β ثبت شده با پیرانومتر (W/m^2)
σ	ثابت بولتزمن	K_{a-Si}	رسانایی گرمایی سلول آمورفس (W/mK)
τ_g	ضریب تابش عبوری از پوشش شیشه‌ای	K_g	رسانایی گرمایی پوشش شیشه‌ای (W/mK)
τ_{a-Si}	ضریب تابش عبوری از سلول آمورفس	K_{ins}	رسانایی گرمایی عایق (W/mK)
ν_f	لزجت سینماتیکی سیال (m^2/s)	K_f	رسانایی گرمایی سیال (W/mK)

۸- مراجع

- [1] Ziapour B.M., Palideh V., and Baygan M., Performance comparison of four passive types of photovoltaic-thermal systems, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 88, pp. 732-738, 2014.
- [2] Ziapour B.M., Palideh V., and Mokhtari F., Performance improvement of the finned passive PVT system using reflectors like removable insulation covers, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 94, pp. 341-349, 2016.
- [3] Ziapour B.M., Palideh V., and Mohammadnia A., Study of an improved integrated collector-storage solar water heater combined with the photovoltaic cells, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 86, pp. 587-594, 2014.
- [4] Tyagi V.V., Kaushik S.C., and Tyagi S.K., Advancement in solar photovoltaic/thermal (PVT) hybrid collector technology, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 16, no. 3, pp. 1383-1398, 2012.
- [5] Fudholi A., Sopian K., Yazdi M.H., Ruslan M.H., Ibrahim A., and Kazem H.A., Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 78, pp. 641-651, 2014.
- [6] Rommel M., Zenhäusern D., Baggenstos A., Türk O., and Brunold S., Application of unglazed PVT collectors for domestic hot water pre-heating in a development and testing system, *Energy Procedia*, Vol. 48, pp. 638-644, 2014.
- [7] Rossi C., Tagliafico L.A., Scarpa F., and Bianco V., Experimental and numerical results from hybrid retrofitted photovoltaic panels, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 76, pp. 634-644, 2013.
- [8] Agrawal S. and Tiwari G.N., Overall energy, exergy and carbon credit analysis by different type of hybrid photovoltaic thermal air collectors, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 65, pp. 628-636, 2013.
- [9] Aste N., Del Pero C., and Leonforte F., Optimization of solar thermal fraction in PVT systems, *Energy Procedia*, Vol. 30, pp. 8-18, 2012.
- [10] Kalogirou S.A., Use a TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid pv-thermal solar system for

L	طول گردآور (m)	Nu_{xf}	عدد بی بعد ناسلت سیال داخل مخزن
L_g	ضخامت پوشش شیشه‌ای (m)	Pr_f	عدد بی بعد پرانتل سیال داخل مخزن
L_{ins}	ضخامت عایق (m)	P	توان تولید شده لحظه‌ای (W)
L_{a-Si}	ضخامت سلول آمورفس (m)	Q_t	انرژی ذخیره شده روزانه داخل مخزن (W)
M_f	جرم سیال (kg)	t	زمان (hr)
Nu_{xf}	عدد بی بعد ناسلت سیال داخل مخزن	T_{a-Si}	دمای سلول آمورفس (°C)
Pr_f	عدد بی بعد پرانتل سیال داخل مخزن	T_{amb}	دمای محیط (°C)
P	توان تولید شده لحظه‌ای (W)	T_f	دمای سیال داخل مخزن (°C)
Q_t	انرژی ذخیره شده روزانه داخل مخزن (W)	T_g	دمای پوشش شیشه‌ای (°C)
t	زمان (hr)	T_{sky}	دمای آسمان (°C)
T_{a-Si}	دمای سلول آمورفس (°C)	U_{a-Si}	ضریب انتقال گرمای کل از سلول آمورفس به محیط از میان پوشش شیشه‌ای ($W/m^2 K$)
T_{amb}	دمای محیط (°C)	U_{loss}	حرارت اتلافی از میان عایق مخزن ($W/m^2 K$)
T_f	دمای سیال داخل مخزن (°C)	u_{wind}	سرعت باد (m/s)
T_g	دمای پوشش شیشه‌ای (°C)	W	عرض گردآور (m)
T_{sky}	دمای آسمان (°C)	P_{a-Si}	توان تولیدی (W)

- [30] Ziapour B.M., Palideh V., Finned passive PVT system with adjustable angle insulating reflectors, *US Patent App*, 15/299, 360.
- Cyprus, *Renew. Energy*, Vol. 23, no. 2, pp. 247–260, 2001.
- [11] Dubey S. and Tay A.A.O., Testing of two different types of photovoltaic-thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions, *Energy Sustain. Dev.*, Vol. 17, no. 1, pp. 1–12, 2013.
- [12] Touafek K., Khelifa A., and Adouane M., Theoretical and experimental study of sheet and tubes hybrid PVT collector, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 80, pp. 71–77, Apr. 2014.
- [13] Sakhrieh A. and Al-Ghandoor A., Experimental investigation of the performance of five types of solar collectors, *Energy Convers. Manag.*, 2013.
- [14] Kaushik S.C., Kumar R., Garg H.P., and Prakash J., Transient analysis of a triangular built-in-storage solar water heater under winter conditions, *Heat Recover. Syst. CHP*, Vol. 14, no. 4, pp. 337–341, 1994.
- [15] Smyth M., Eames P.C., and Norton B., Heat retaining integrated collector/storage solar water heaters, *Sol. Energy*, Vol. 75, no. 1, pp. 27–34, 2003.
- [16] Gertzos K.P. and Caouris Y.G., Optimal arrangement of structural and functional parts in a flat plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH), *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol. 32, no. 5, pp. 1105–1117, 2008.
- [17] Ecevit A., Al-Shariah A. M., and Apaydin E. D., Triangular built-in-storage solar water heater,” *Sol. Energy*, Vol. 42, No. 3, pp. 253–265, 1989.
- [18] He W., Chow T.T., Ji J., Lu J., Pei G., and Chan L.S., Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water, *Appl. Energy*, Vol. 83, no. 3, pp. 199–210, 2006.
- [19] Husain A.A.F., Hasan W.Z.W., Shafie S., Hamidon M.N., and Pandey S.S., A review of transparent solar photovoltaic technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 94, no. January 2017, pp. 779–791, 2018.
- [20] Chow T.T., Fong K.F., He W., Lin Z., and Chan A.L.S., Performance evaluation of a PV ventilated window applying to office building of Hong Kong, *Energy Build.*, Vol. 39, no. 6, pp. 643–650, 2007.
- [21] Leite Didoné E. and Wagner A., Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil, *Energy Build.*, Vol. 67, pp. 136–142, 2013.
- [22] Skandalos N. and Karamanis D., Investigation of thermal performance of semi-transparent PV technologies, *Energy Build.*, Vol. 124, pp. 19–34, 2016.
- [23] Dubey S. and Tiwari G.N., Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater, *Sol. Energy*, Vol. 82, no. 7, pp. 602–612, 2008.
- [24] Tiwari A., Sodha M.S., Chandra A., and Joshi J.C., Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 90, no. 2, pp. 175–189, 2006.
- [25] Ziapour B.M. and Aghamiri A., Simulation of an enhanced integrated collector-storage solar water heater, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 78, pp. 193–203, 2014.
- [26] Kostić L.T. and Pavlović Z.T., Optimal position of flat plate reflectors of solar thermal collector, *Energy Build.*, Vol. 45, pp. 161–168, 2012.
- [27] William A.B. John A. Duffie, *Solar Engineering of Thermal Processes.*, 1974.
- [28] Holman J.P., *Heat transfer.* McGraw Hill Higher Education, 2010.
- [29] Dubey S., Sarvaiya J.N., and Seshadri B., Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review, *Energy Procedia*, Vol. 33, pp. 311–321, 2013.