

مدلسازی عملکرد سامانه های فتوولتائیک حرارتی هواخنک یکپارچه با ساختمان

چکیده: در تحقیق حاضر روابط ساده و صریح جهت محاسبه پارامترهای حرارتی سامانه های فتوولتائیک حرارتی هواخنک یکپارچه با ساختمان ارائه می شوند. این معادلات بر مبنای اصول بقاء برای سامانه فتوولتائیک حرارتی به دست آمده اند. رابطه هایی ساده و صریح برای محاسبه دمای پانل فتوولتائیک و حرارت منتقل شده به اتاق ارائه شده است. این روابط برای بررسی عملکرد انواع سامانه های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان با انواع شفافیت از کدر تا شفاف قابل استفاده هستند. روابط تحقیق حاضر در روش های مختلف قرارگیری سامانه با سیال هوا قابل استفاده هستند. با استفاده از این روابط نیازی به استفاده از معادلات بقای مجموعه پانل فتوولتائیک همراه با ساختمان نخواهد بود و تنها با داشتن η راندمان الکتریکی پانل و τ ضریب عبور پانل و شرایط محیطی دو پارامتر اصلی مدنظر در عملکرد سامانه، "دمای پانل فتوولتائیک" و "گرمای منتقل شده به ساختمان" محاسبه می شوند.

واژه های راهنما: سامانه های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان، مدلسازی، دمای پانل فتوولتائیک، گرمای منتقل شده

علی قهرمانی
کارشناسی ارشد

مهدی معرفت*

استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه تربیت مدرس، تهران

مقاله علمی ترویجی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸

Ali Ghahremani
MSc

Mehdi Maerefat*
Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
Tarbiat Modares University,
Tehran

Performance modeling of air cooled building integrated photovoltaic thermal systems

Abstract: In the present study, simple and explicit relationships are proposed for calculating the thermal parameters of building-Integrated Photovoltaic-Thermal (BIPV/T) systems. These equations are derived based on conservation principles for PVT systems. Simple and explicit equations are presented for determining the photovoltaic panel temperature and the heat transferred to the room. These relations can be applied to assess the performance of various BIPV/T systems with different transparency levels, ranging from opaque to fully transparent. The present research's relationships are applicable for systems with different installation configurations using air as the working fluid. By using these equations, there is no need to solve the full set of energy balance equations for the combined panel-building system. Instead, with only the electrical efficiency (η) and the transmittance coefficient (τ) of the panel, along with environmental conditions, the two key performance parameters—the photovoltaic panel temperature and the heat transferred to the building—can be determined.

Keywords: Building Integrated Photovoltaic/Thermal system, Modeling, Photovoltaic panel temperature, Heat transferred

۱- مقدمه

و همکاران ارائه شده است، دمای سلول خورشیدی، دمای سطح زیرین و دمای هوای خروجی کانال را محاسبه می‌کنند. برای تعیین شفافیت پانل فتوولتائیک از خواص ۳ لایه تشکیل‌دهنده پانل خورشیدی استفاده کرده‌اند [۵]. سرحدی و همکاران یک مدل‌سازی کامل‌تر نسبت به تحقیقات گذشته برای سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی نصب شده روی کانال را ارائه کردند. در این مدل‌سازی، انتقال حرارت تابشی پانل فتوولتائیک به آسمان را به کمک یک ضریب انتقال حرارت در نظر گرفتند [۶].

سلیمانی و همکاران چهار سامانه‌ی فتوولتائیک حرارتی کدر را با روش‌های قرارگیری متفاوت روی پوسته‌ی ساختمان مدل‌سازی کردند. سلیمانی در تحقیق خود، انتقال حرارت تابشی کلکتور به آسمان را به صورت ترم جدا در نظر گرفته است. همچنین روابط پیچیده و متعدد برای محاسبه دمای هوای خروجی کانال، کارایی سامانه‌ی فتوولتائیک حرارتی و دمای لایه‌های مختلف پانل ارائه کردند [۷].

زوهری و همکاران یک سامانه فتوولتائیک حرارتی کدر با کلکتور شیاردار را مدل‌سازی کردند. در مدل‌سازی خود ضمن ساده‌سازی‌های ارزنده، پنج لایه و پنج معادله در نظر گرفتند و موفق نشدند معادلات صریح برای دما و حرارت منتقل شده ارائه کنند [۸].

تیواری و همکاران یک سامانه فتوولتائیک حرارتی نیمه شفاف نصب شده روی اتاق را برای کاربرد گلخانه بررسی و روابط ساده‌ای ارائه و راستی آزمایی کردند. روابط پیشنهادی این تحقیق، دمای سلول خورشیدی و دمای اتاق را برای سامانه نیمه شفاف محاسبه می‌کنند [۹].

دون و همکاران یک سامانه فتوولتائیک حرارتی کدر نصب شده روی کانال و اتاق را مدل‌سازی و نتایج خود را با آزمایش جاشی و همکاران مقایسه کردند. در این مدل‌سازی انتقال حرارت سلول خورشیدی به سیال کانال، محیط اطراف و فضای اتاق را در نظر گرفتند و نتایج خود را با حل عددی محاسبه کردند [۱۰].

تیواری و اگرال در کتاب سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان بسیار مفصل به مسائل مختلف در این زمینه پرداختند. تحقیق حاضر برای کامل‌تر کردن مدل‌سازی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی از این کتاب الهام گرفته است [۱۱].

در تحقیق حاضر، به کمک اصول بقاء، یک سری رابطه صریح و ساده برای محاسبه دمای پانل فتوولتائیک و گرمای منتقل شده به اتاق ارائه می‌شوند. روابط صریح ارائه شده برای بررسی عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی با هر میزان شفافیت قابل استفاده و با کاربرد هستند نیازی به تحلیل کامل ساختمان و یا انجام محاسبات عددی نخواهد بود.

امروزه استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی هواخنک یکپارچه با ساختمان در حال گسترش روزافزون است و با افزایش استفاده از آن‌ها، بررسی ساده، سریع و دقیق کارایی این سامانه‌ها، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی هواخنک متداول به دو روش روی ساختمان نصب می‌شوند: مستقیماً روی فضای داخلی ساختمان و یا روی کانالی در سقف فضای داخلی ساختمان. این سامانه‌ها بخشی از انرژی خورشید دریافتی را به برق تبدیل کرده و بخش دیگری از آن را به صورت انرژی حرارتی وارد ساختمان می‌نمایند. حرارت وارد شده به ساختمان می‌تواند برای ایجاد شرایط آسایش حرارتی بکار رود و بارهای گرمایش دستگاه‌های تهویه مطبوع را کاهش دهد.

سیرین و همکاران سامانه‌ها را دسته‌بندی کردند و نحوه عملکرد آن‌ها را توضیح دادند. همچنین روش‌هایی برای بهبود راندمان این سامانه‌ها را بررسی کردند و تحقیقات موجود در مورد کاربردهای مختلف این سامانه‌ها در ساختمان‌های سبز و انرژی صفر را مرور کرده‌اند [۱].

تیواری و همکاران تحقیقات اخیر روی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی با سیال هوا و آب را بررسی کردند. همچنین تأثیر عوامل مختلف را بر راندمان این سامانه‌ها، مثل استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، نانو سیال و یا جنس مواد سازنده سلول‌های خورشیدی را مرور کردند [۲]. دبارما و همکاران [۳] مدل‌سازی حرارتی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی را مرور کردند. روابطی برای بررسی عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک و فتوولتائیک حرارتی با سیال هوا و آب را مرور کردند. همچنین نرم افزارهای متداول شبیه‌سازی این سامانه‌ها را معرفی نمودند. در ادامه چند مورد سامانه فتوولتائیک و فتوولتائیک حرارتی که در سراسر دنیا اجرا شده‌اند را از نظر راندمان حرارتی و الکتریکی مقایسه کردند.

تاریخچه معرفی و مدل‌سازی سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی به دهه‌ی ۷۰ میلادی برمی‌گردد. فلورشوتز سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی رابه کمک اصل بقای انرژی مدل‌سازی کرد. برای مدل‌سازی، مدل کلکتورهای حرارتی صفحه‌ای را تعمیم داد و در مدل‌سازی خود تولید هم‌زمان برق و حرارت در سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی را در نظر گرفت [۴].

جاشی و همکاران سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی نصب شده روی کانال را برای دو حالت نیمه شفاف و کدر مدل‌سازی کردند. در این مدل‌سازی انتقال حرارت سلول خورشیدی به سیال کانال و محیط اطراف را در نظر گرفتند. روابطی که در تحقیق جاشی

۲- سامانه فتوولتائیک حرارتی بررسی شده

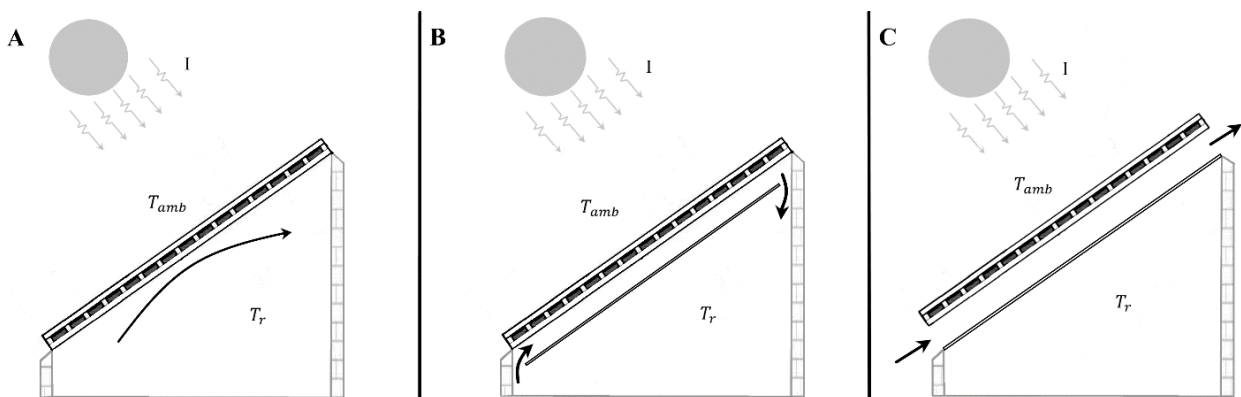
در تحقیق حاضر عملکرد یک پانل فتوولتائیک خنک شونده توسط هوا بررسی شده است. شکل (۱) روش‌های مختلف قرارگیری پانل فتوولتائیک روی پوسته ساختمان را نشان می‌دهد و روابط کاربردی تحقیق حاضر برای هر سه روش قرارگیری قابل استفاده می‌باشند. شکل A_۱ پانل فتوولتائیک نصب شده روی اتاق را نشان می‌دهد که گرمای تولیدی مستقیماً وارد اتاق می‌شود. شکل B_۱ پانل نصب شده روی کانال هوای داخل اتاق را نشان می‌دهد که گرما به هوای کانال منتقل می‌شود و هوای گرم کانال وارد فضای اتاق می‌شود. شکل C_۱ پانل نصب شده روی کانال خارج از اتاق را نشان می‌دهد که در آن جریان هوای داخل کانال باعث خنک شدن پانل می‌شود و از گرمای تولیدی استفاده نمی‌شود.

شکل (۲) شماتیک نمای جانبی پانل فتوولتائیک حرارتی متداول را نشان می‌دهد. این پانل تابش خورشیدی با شدت I را

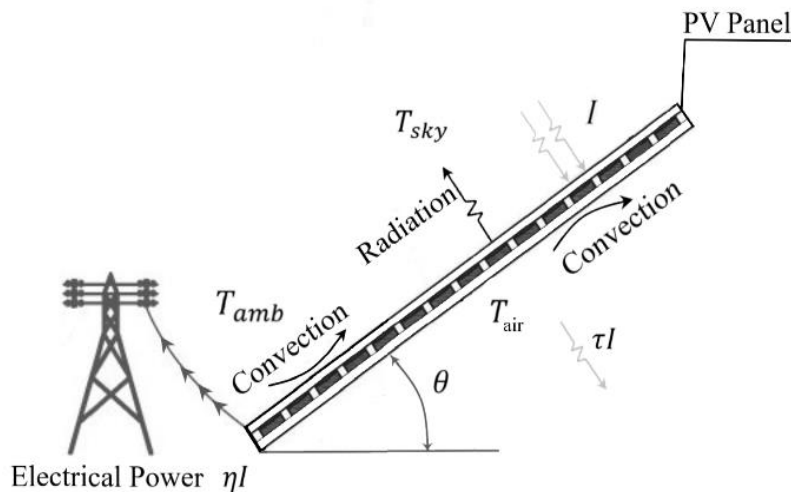
دریافت می‌کند. شدت تابش دریافتی I به ساعت شبانه روز و شرایط اقلیمی بستگی دارد.

تابش دریافتی با نسبت η به الکتریسیته تبدیل می‌شود و به اندازه τ از پانل خورشیدی عبور کرده و مابقی به صورت حرارت در پانل جذب می‌شود. η راندمان الکتریکی است که بر حسب نوع و ساختار سلول‌های خورشیدی تعیین می‌شود. τ ضریب عبور پانل فتوولتائیک است. حرارت جذب شده باعث افزایش دمای پانل شده و این حرارت توسط جابجایی به محیط بالا و پایین پانل و همچنین تابش به آسمان منتقل می‌شود.

دو پارامتر مهم در بررسی کارایی این سامانه‌های فتوولتائیک عبارتند از: دمای پانل فتوولتائیک یا T_{PV} ، و گرمای منتقل شده به اتاق یا Q . دمای بالای T_{PV} به سلول‌ها آسیب می‌زند و راندمان الکتریکی کاهش می‌یابد و Q جهت محاسبات تهویه مطبوع مورد نیاز است. به علاوه این دو پارامتر جهت انجام محاسبات آسایش حرارتی و ارزیابی مصرف انرژی در ساختمان کاربرد دارند.



شکل ۱ روش‌های مختلف نصب پانل‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه در ساختمان؛ (A) نصب شده روی اتاق، (B) نصب شده روی کانال هوای داخل اتاق و (C) نصب شده روی کانال هوای خارجی



شکل ۲ شماتیک پانل فتوولتائیک

۳- مدل سازی

۳-۱- دمای پانل

مدل سازی سامانه های فتوولتائیک حرارتی با توجه به اصل بقای انرژی برای سامانه های فتوولتائیک حرارتی نشان داده شده در شکل (۲) انجام شده است. با توجه به تغییرات نسبتاً کند در شرایط محیطی و حرارتی، سیستم در شرایط پایا و میانگین ساعتی پارامترها به صورت ثابت منظور شده است. سامانه تابش خورشیدی را با شدت I دریافت می کند. با نوشتن بالانس انرژی برای پانل رابطه (۱) به دست می آید.

$$IA = \eta IA + h_{amb}(T_{pv} - T_{amb})A + h_{air}(T_{pv} - T_{air})A + h_{rad}(T_{pv} - T_{sky})A + \tau IA \quad (1)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت و T دما و A سطح پانل است. زیر نویس های amb محیط، pv پانل فتوولتائیک، air هوا، rad تشعشع، sky آسمان می باشند.

رابطه (۱) نشان می دهد که تابش دریافتی با نسبت η به الکتریسیته تبدیل می شود و به اندازه τ از پانل خورشیدی عبور می کند و مابقی به صورت حرارت در پانل جذب شده و دمای آن را به T_{pv} می رساند. حرارت جذب شده با جابجایی و تشعشع به محیط های بالا و پایین منتقل می شود. با ساده کردن رابطه (۱) دمای پانل فتوولتائیک به دست می آید.

$$T_{pv} = \frac{h_{air}T_{air} + h_{amb}T_{amb} + h_{rad}T_{sky} + (1 - \tau - \eta)I}{h_{amb} + h_{air} + h_{rad}} \quad (2)$$

طبق رابطه (۲) با داشتن خصوصیات تابشی τ و η پانل و ضرایب انتقال حرارت مرتبط و دمای محیط و دمای آسمان، دمای پانل فتوولتائیک به دست می آید.

رابطه (۲) شبیه رابطه پیشنهادی مرجع برای دمای سلول می باشد؛ با این تفاوت که اثر "تشعشع پانل به آسمان" در تحقیق حاضر در نظر گرفته شده است و عبور تابش خورشید از پانل به τ "ضریب عبور کلی پانل" بستگی دارد. به علاوه، در مدل سازی های گذشته برای لایه های مختلف پانل فتوولتائیک دماهای متفاوتی در نظر گرفته شده بود. به دلیل نازک بودن لایه ها و برای ساده تر شدن مدل سازی، در تحقیق حاضر فقط یک دمای پانل برای همه لایه های پانل فتوولتائیک یعنی T_{pv} در نظر گرفته شده است. طبق نتایج آزمایش و محاسبات مرجع [۵] و محاسبات مرجع [۷] اختلاف دمای لایه های پانل و سلول خورشیدی بسیار کم بوده است.

۳-۲- گرمای منتقل شده

محاسبه حرارت منتقل شده به فضای زیرین پانل فتوولتائیک برای محاسبات کارایی، محاسبات تهویه مطبوع و آسایش حرارتی اهمیت دارد. حرارت منتقل شده Q ، جمع حرارت بدست آمده از انتقال حرارت سطح زیرین پانل فتوولتائیک با دمای T_{pv} و بخشی از تابش خورشید است که از پانل عبور کرده است.

$$Q = Ah_{air}(T_{pv} - T_r) + A\tau I \quad (3-الف)$$

(۳-الف) حرارت منتقل شده به فضای زیرین را برای حالت A نشان داده شده در شکل A_۱ به دست می دهد. در حالت B انتقال حرارت می تواند مساوی یا اندکی کمتر از حالت A باشد. رابطه (۳-ب) حرارت منتقل شده در حالت B را به دست می دهد. با توجه به تفاوت اندک می توان از رابطه (۳-الف) برای هر دو حالت A و B استفاده کرد.

$$Q = Ah_{air}(T_{pv} - T_{air}) + A\tau I = Ah_{air}(T_{pv} - T_r) + A\tau I \quad (3-ب)$$

در حالت C بخش اول رابطه بالا با $(T_{air} - T_{roof})$ جایگزین می شود و ترم $A\tau I$ نیز وارد فضای اتاق نشده و بخشی از آن جذب سقف می شود. حرارت منتقل شده به فضای اتاق در حالت C عبارت است از:

$$Q = Ah_{air}(T_{air} - T_{roof}) + \alpha_{roof}A\tau I \quad (3-ج)$$

که α ضریب جذب و زیر نویس $roof$ سقف می باشد. قابل ذکر است که در منابع و مراجع مطالعه شده روابط صریحی برای محاسبه Q گزارش نشده است و بیان صریح معادله حرارت منتقل شده از دستاوردهای تحقیق حاضر هست.

۳-۳- محاسبه ضرایب انتقال حرارت

برای انجام محاسبات معادله (۲) دما و معادله (۳) گرمای منتقل شده، مقادیر ضرایب انتقال حرارت h لازم است. برای ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری پانل با هوای محیط روابط گوناگونی پیشنهاد شده اند.

یکی از پرکاربردترین روابط تجربی برای تخمین h_{amb} رابطه (۴) است که برای سرعت های $1/35$ m/s تا $4/5$ m/s استفاده می شود [۱۲].

$$h_{amb} = 1.8 + 3.8V_{amb} \quad (4)$$

و برای جریان مغشوش اجباری داخل کانال از رابطه (۱۰) استفاده می‌شود [۱۲].

$$h_{air} = \frac{\kappa_{air}}{D_H} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

عدد رینولدز در رابطه (۱۰) با توجه به قطر هیدرولیکی کانال D_H در رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$Re = \frac{VD_H}{\nu} \quad (11)$$

و ضریب انتقال حرارت تابشی پانل به آسمان از رابطه (۱۲) استفاده می‌شود [۱۴].

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_{pv} + T_{sky})(T_{pv}^2 + T_{sky}^2) \quad (12)$$

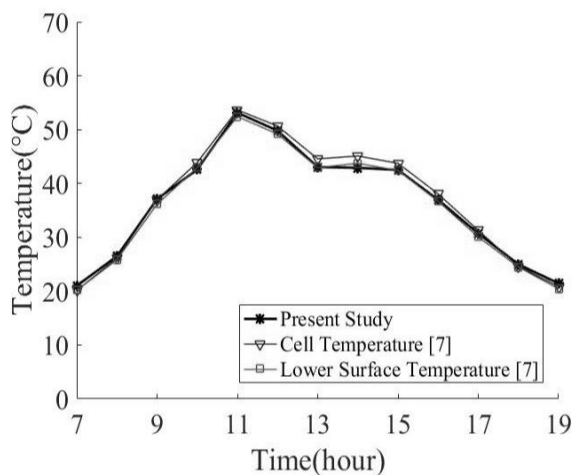
که در آن دمای آسمان T_{sky} طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$T_{sky} = T_{amb} - 6 \quad (13)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- دمای پانل فتوولتائیک

برای پانل نصب شده طبق حالت شکل A_۱ نتایج محاسبات حاضر با نتایج گزارش شده در مراجع [۷] و [۹] مقایسه می‌شوند. در مرجع [۷] پانل کدر به کار رفته است و تغییرات دمای سلول فتوولتائیک و سطح زیرین آن از اجزای مختلف یک سامانه فتوولتائیک بر مبنای روابط تحلیلی نسبتاً پیچیده گزارش شده است. این نتایج همراه با دمای پانل فتوولتائیک T_{pv} محاسبه شده بر مبنای رابطه (۲) تحقیق حاضر در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ مقایسه دمای پانل فتوولتائیک کدر محاسبه شده طبق مدل سازی حاضر و با نتایج مدل سازی مرجع [۷]

که V_{amb} سرعت هوای محیط می‌باشد. در صورت نیاز به h_{amb} در شرایط دیگر، می‌توان از روابط ذکر شده در منابع علمی معتبر بهره گرفت.

$$h_{amb} = 1.8 + 3.8V_{amb} \quad (4)$$

در شرایطی که سرعت جریان هوا پایین باشد و اثرات جابجایی طبیعی غالب باشد، رابطه (۵) برای h_{amb} پیشنهاد شده است [۱۲].

$$h_{amb} = \frac{\kappa_{air}}{L} \left(0.68 + \frac{0.67 Ra^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{4/9}} \right) \quad (5)$$

که در آن κ_{air} ضریب انتقال حرارت هدایتی هوا، L طول پانل، Pr عدد پرانتل و Ra عدد رابلی می‌باشند. عدد رابلی طبق رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha} \cos\theta L^3 (T_{pv} - T_{air}) \quad (6)$$

که θ زاویه پانل با افق، ν ویسکوزیته سینماتیکی، g شتاب جاذبه، α ضریب نفوذ و β ضریب انبساط حرارتی می‌باشند.

در صورتی که پانل مطابق شکل A_۱ نصب شده باشد، ضریب انتقال حرارت جابجایی طبیعی زیر پانل یا h_{air} هم به کمک رابطه (۵) محاسبه می‌شود [۱۲].

در صورتی که پانل مطابق شکل B_۱ یا شکل C_۱ نصب شده باشد، برای جریان داخل کانال، ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به اجباری یا طبیعی بودن جریان و با توجه به اعداد بی‌بعد، رینولدز و رابلی محاسبه می‌شود. برای جریان طبیعی در کانال از رابطه (۷) استفاده می‌شود [۱۳].

$$h_{air} = \frac{\kappa_{air}}{D_H} 0.0965 Ra^{0.29} \quad (7)$$

در رابطه (۷) D_H قطر هیدرولیکی کانال است. عدد رابلی Ra طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$Ra = \frac{g\beta(T_{pv} - T_r)(D)^3}{\nu\alpha} \quad (8)$$

و در صورت بکار بردن فن برای جریان آرام اجباری داخل کانال برای h_{air} از رابطه (۹) استفاده می‌شود [۱۲].

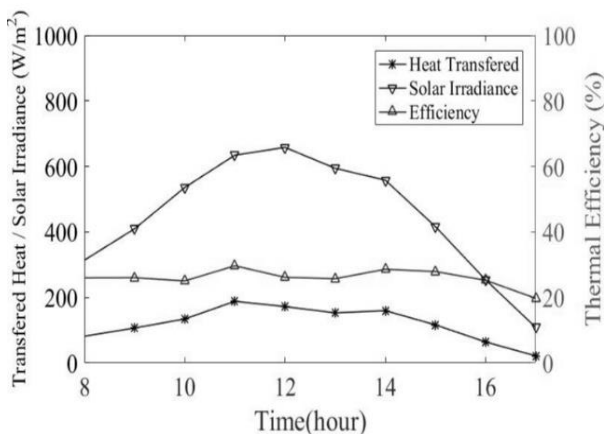
$$h_{air} = 2.98 \frac{\kappa_{air}}{D_H} \quad (9)$$

در شکل (۵) نتایج مدل‌سازی و تجربی دماهای لایه مختلف تشکیل دهنده پانل خورشیدی گزارش شده است. همانگونه که در شکل ملاحظه می‌شود نتایج دمای پانل فتوولتائیک T_{pv} مدل‌سازی تحقیق حاضر با نتایج تجربی دمای لایه سلول خورشیدی گزارش شده در مرجع [۵] انطباق بسیار خوبی دارد. علاوه بر آن نتایج محاسباتی دمای لایه سلول خورشیدی گزارش شده در مراجع [۷] و [۱۰] مطابقت قابل قبولی با نتایج محاسباتی تحقیق حاضر دارد.

این مقایسه‌ها نشان می‌دهند که تحقیق حاضر مدل‌سازی را بهتر از تحقیقات گذشته انجام داده و نتایج آن قابل استفاده در محاسبات طراحی است.

۴-۲- گرمای منتقل شده

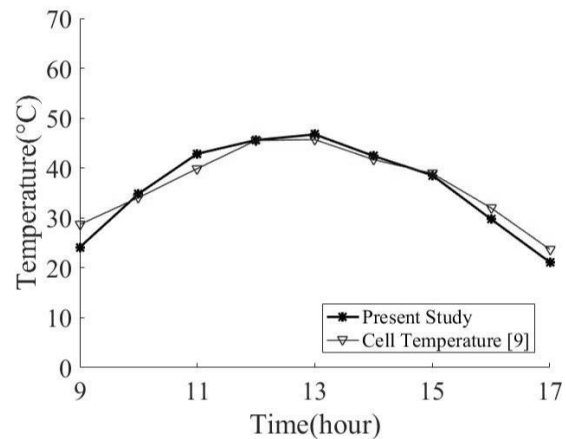
در مراجع و مقاله‌های بررسی شده گرمای منتقل شده به اتاق به عنوان پارامترهای مستقل گزارش نشده است. لذا امکان مقایسه مقادیر محاسبه شده طبق رابطه (۳) با نتایج دیگر وجود ندارد. به هر حال نظر به اهمیت داشتن مقدار Q در محاسبات انرژی در ساختمان و تهویه مطبوع و آسایش حرارتی، مقدار آن برای شرایط تجربی مرجع محاسبه شده و در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶ تغییرات گرمای منتقل شده، راندمان حرارتی و شدت تابش خورشید برای پانل مطالعه شده در مرجع [۵]

در شکل (۶) علاوه بر تغییرات Q ، تغییرات راندمان حرارتی و شدت تابش خورشید I نیز نشان داده شده‌اند. مقدار گرمای منتقل شده طبق رابطه (۳) تحقیق حاضر محاسبه شده و به سادگی برای محاسبه راندمان حرارتی به کار گرفته شده است. گرمای منتقل شده، به کاهش بار گرمایشی در ساختمان کمک می‌کند.

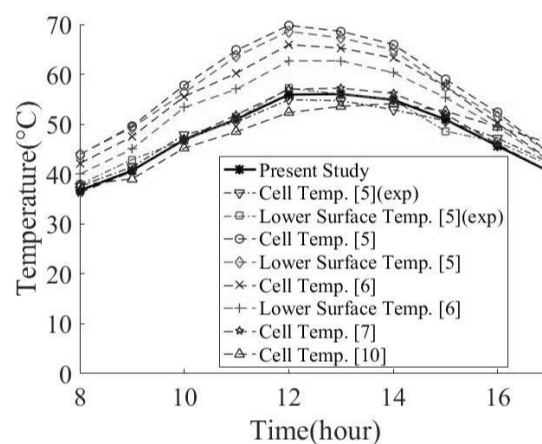
تطابق بسیار خوبی بین نتایج محاسبات دیده می‌شود و همانگونه که در شکل پیداست تفاوت دمای سلول فتوولتائیک و سطح زیرین آن قابل توجه نبوده و فرض مساوی بودن آن‌ها به کار گرفته شده در تحقیق حاضر قابل قبول است.



شکل ۴. مقایسه دمای پانل فتوولتائیک شفاف محاسبه شده طبق مدل‌سازی حاضر و نتایج آزمایش مرجع [۹]

تفاوت در نتایج (مثلاً در ساعت‌های ۹ صبح و ۱۱ صبح شکل (۴)) می‌تواند ناشی از تغییرات ناگهانی سرعت باد یا دیگر شرایط محیطی باشد. این مقایسه‌ها نشان می‌دهند که تحقیق حاضر مدل‌سازی پانل کدر و شفاف را به خوبی انجام داده است.

در ادامه پانل نصب شده روی ساختمان مطابق شکل B_1 و نتایج در مرجع [۵] بررسی می‌شوند. در تحقیق حاضر، دمای پانل فتوولتائیک محاسبه شده است و با نتایج گزارش شده در آزمایش و مدل‌سازی جاشی [۵] و در تحقیقات سرحدی [۶]، سلیمانی [۷] و دون [۱۰] مورد استناد و مقایسه قرار گرفته است. مرجع [۵] نتایج آزمایش و شبیه‌سازی خود را ارائه کرده است و مراجع دیگر نتایج این مرجع را مورد استناد قرار داده‌اند.



شکل ۵ مقایسه دمای پانل فتوولتائیک کدر محاسبه شده طبق مدل‌سازی حاضر و نتایج مراجع مختلف

۵- جمع بندی

τ ضریب عبور کلی پانل فتوولتائیک
 ν ویسکوزیته سینماتیکی m^2/s

زیر نویس ها

air هوای زیر پانل فتوولتائیک
 amb هوای محیط
 pv پانل فتوولتائیک
 rad تابشی
 r اتاق
 roof سقف
 sky آسمان

۷- مراجع

- [1] C. Şirin, J. Goggins, and M. Hajdukiewicz, "A review on building-integrated photovoltaic/thermal systems for green buildings," *Appl Therm Eng*, vol. 229, p. 120607, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120607.
- [2] A. K. Tiwari, K. Chatterjee, S. Agrawal, and G. K. Singh, "A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance evaluation and contemporary development," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2655–2679, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.09.043.
- [3] M. Debbarma, K. Sudhakar, and P. Baredar, "Thermal modeling, exergy analysis, performance of BIPV and BIPVT: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 1276–1288, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.035.
- [4] L. W. Florschuetz, "Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors," *Solar Energy*, vol. 22, no. 4, pp. 361–366, 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90190-7.
- [5] A. S. Joshi, A. Tiwari, G. N. Tiwari, I. Dincer, and B. V. Reddy, "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T) (glass-to-glass) system," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, no. 1, pp. 154–164, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2008.05.001.
- [6] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. Mahdavi Adeli, "An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector," *Appl Energy*, vol. 87, no. 7, pp. 2328–2339, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.01.001.
- [7] M. E. A. Slimani, M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, and W. B. Chaouch, "A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors

در تحقیق حاضر، معادلات صریح و ساده برای تحلیل عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی یکپارچه با ساختمان توسعه داده شد. این معادلات برای انواع سامانه‌های فتوولتائیک حرارتی هواخنک کاربرد دارد. در این روابط عواملی مانند دمای آسمان و انتقال حرارت تابشی از کلکتور به آسمان و انتقال حرارت جابجایی در نظر گرفته می‌شود. این رابطه‌های ساده و صریح برای محاسبه دمای پانل فتوولتائیک و حرارت منتقل شده به اتاق با در نظر گرفتن راندمان الکتریکی η و ضریب عبور پانل τ ارائه شدند. نتایج این مدل سازی در مقایسه با داده‌های تجربی و مدل سازی‌های پیچیده گذشته دقت خوبی را دارد.

معادلات به دست آمده در این تحقیق، ابزار ارزشمندی برای انجام محاسبات کارایی آن‌ها، بهینه‌سازی آن‌ها، محاسبات تهویه مطبوع و آسایش حرارتی می‌باشد. به طوری که می‌توان با اطلاعات ساده از خواص فیزیکی پانل‌ها و شرایط محیط محاسبات مربوط را انجام داد و نیازی به حل سیستم معادلات مجموعه پانل فتوولتائیک همراه با ساختمان نمی‌باشد.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

A سطح m^2
 D قطر کانال m
 D_H قطر هیدرولیکی کانال m
 h ضریب انتقال حرارت W/m^2K
 I تابش دریافتی مؤثر خورشید روی پانل W/m^2
 L طول پانل m
 Ra عدد بی بعد رایلی
 Re عدد بی بعد رینولدز
 Pr عدد بی بعد پرنتل
 T دما K
 V سرعت m/s

علائم یونانی

α ضریب نفوذ m^2/s
 β ضریب انبساط حرارتی $1/k$
 ε ضریب انتشار
 η راندمان الکتریکی پانل فتوولتائیک
 θ شیب پانل
 κ ضریب انتقال حرارت هدایتی W/mK
 σ ضریب استفان بولتزمن W/m^2k^4

- [13] K. R. Randall, J. W. Mitchell, and M. M. El-Wakil, "Natural Convection Heat Transfer Characteristics of Flat Plate Enclosures," *J Heat Transfer*, vol. 101, no. 1, pp. 120–125, Feb. 1979, doi: 10.1115/1.3450901.
- [14] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions," *Energy Convers Manag*, vol. 133, pp. 458–476, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.10.066.
- [8] M. Zohri, A. Fudholi, M. H. Ruslan, and K. Sopian, "Mathematical modeling of photovoltaic thermal PV/T system with v-groove collector," 2017, p. 030063. doi: 10.1063/1.4991167.
- [9] S. Tiwari and G. N. Tiwari, "Thermal analysis of photovoltaic-thermal (PVT) single slope roof integrated greenhouse solar dryer," *Solar Energy*, vol. 138, pp. 128–136, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.09.014.
- [10] N. A. Dunne, P. Liu, A. F. A. Elbarghthi, Y. Yang, V. Dvorak, and C. Wen, "Performance evaluation of a solar photovoltaic-thermal (PV/T) air collector system," *Energy Conversion and Management: X*, vol. 20, p. 100466, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100466.
- [11] B. Agrawal and G. N. Tiwari, *Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems For Sustainable Developments*, 1st ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2010.
- [12] A. Bejan, *Convection heat transfer*, 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2013, ISBN: 9781118330081.