

شبیه‌سازی و آزمایش سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی هوایی در حالت جابجایی آزاد

امین شهبسوار^۱; مهران عامری^{۲*}; محمد مهدی محمودآبادی^۳

چکیده

در این مقاله شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی در حالت جابجایی آزاد برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون آن آورده شده و نتایج بدست آمده با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که شبیه‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی همخوانی بسیار خوبی دارند. اثرات قرار دادن سرپوش شیشه‌ای بر روی عوامل مختلف سیستم نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که قرار دادن سرپوش شیشه‌ای در سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی باعث افزایش راندمان حرارتی و کاهش راندمان الکتریکی این سیستم‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی: جابجایی آزاد، سرپوش شیشه‌ای، شبیه‌سازی، فتوولتائیک، فتوولتائیک/حرارتی.

Simulation and Test of PV/T Air Systems with Natural Air Flow Operation

A. Shahsavar; M. Ameri; M.M. Mahmoudabadi

ABSTRACT

This paper discusses the simulation of the PV/T air systems with natural airflow operation for both glazed and unglazed types. Comparisons are made between the theoretical and experimental results and good agreement between these two values are obtained. Additionally, the influence of the glass cover on the different system parameters has been evaluated. Results show that setting glass cover on photovoltaic panels leads to an increase in thermal efficiency and decrease in electrical efficiency of these systems.

KEYWORDS: Natural convection, Simulation, Photovoltaic, Photovoltaic/thermal.

۱- مقدمه

یعنی پانل فتوولتائیک بخش کمی از تشعشع جذب شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و باقی آن به صورت حرارت تلف می‌شود. در عین حال افزایش دمای پانل موجب کاهش راندمان الکتریکی آن می‌شود. با دفع حرارت از پانل‌ها می‌توان این اثر نامطلوب را کاهش داد، به این صورت که با جاری ساختن یک سیال بر روی پانل‌های فتوولتائیک، به واسطه انتقال حرارت جابجایی، می‌توان بخش زیادی از این حرارت را از پانل جذب کرده و دمای سطح پانل فتوولتائیک را کاهش و در نتیجه

امروزه در اثر افزایش بهای سوخت‌های فسیلی و محدودیت منابع و همچنین مشکلات زیست محیطی و تغییرات اقلیمی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از منابع قابل دسترس و فراوان، انرژی خورشیدی است. از جمله کاربردهای انرژی خورشیدی تبدیل مستقیم پرتوهای خورشید به الکتریسیته بوسیله پانل‌های فتوولتائیک است. سیستم‌های فتوولتائیک توانایی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته را با راندمانی در حدود ۵ الی ۲۰ درصد دارند.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۱

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۴/۷

^۱ کارشناس ارشد؛ دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک: amin.shahsavar@yahoo.com

^{۲*} نویسنده مسئول و دانشیار؛ دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک:

ameri_mm@mail.uk.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد؛ دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک: m.mahmoudabadi@gmail.com

سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی، باعث افزایش مشخصات حرارتی و الکتریکی می‌شود. در سال ۲۰۰۷، جوشی و تیواری [۶]، راندمان سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی را به دو صورت انرژی و انرژی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها راندمان انرژی را حدود ۵۵ الی ۵۶ درصد و راندمان انرژی را حدود ۱۲ الی ۱۵ درصد بیان نموده‌اند.

در این مقاله یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی هوایی با جمع‌کننده حرارتی در حالت جابجایی آزاد برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون سرپوش شیشه‌ای شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمده با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. اثرات قرار دادن سرپوش شیشه‌ای بر روی عوامل مختلف سیستم نیز بررسی شده است.

۲- شبیه‌سازی

نمونه‌ای از سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی در دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شده و در محیط آزاد مورد آزمایش قرار گرفته است. این سیستم شامل بدنه‌ی اصلی (قاب)، جمع‌کننده حرارتی، پانل فتوولتائیک، تکیه‌گاه و سرپوش شیشه‌ای است. بدنه‌ی اصلی با ابعاد $۱۹۶ \times ۵۴ \times ۳۵$ سانتی‌متر از جنس چوب ساخته شده و وجوه آن به‌وسیله پشم شیشه به ضخامت $۲/۵$ سانتی‌متر عایق‌بندی شده است تا اتلاف حرارت کاهش یابد. جمع‌کننده حرارتی از جنس آلومینیوم تجاری (با ضخامت ۱ میلی‌متر) بوده و در وسط کانال عبور هوا قرار گرفته است. در این سیستم از دو پانل فتوولتائیک نوع سیلیکونی پلی‌کریستالی ساخت کارخانه‌ی شهید قندی یزد که هر کدام دارای توان اسمی برابر با ۴۵ وات هستند، استفاده شده است. مشخصات این پانل‌ها که از طرف کارخانه‌ی سازنده اعلام شده است، در جدول (۱) آورده شده است. این پانل‌ها بخشی از تشعشع رسیده را جذب می‌کنند که صرف تولید الکتریسیته و بالا رفتن دمای آن‌ها می‌شود. تشعشع عبوری از پانل‌ها به‌وسیله جمع‌کننده حرارتی جذب می‌شود. عبور سیال از داخل کانال بین پانل فتوولتائیک و جمع‌کننده حرارتی از بالا رفتن دمای پانل‌ها جلوگیری نموده و باعث بالا رفتن راندمان الکتریکی پانل‌ها می‌شود. دمای هوای عبوری از کانال‌های سیستم در اثر جذب حرارت پانل‌های فتوولتائیک و جمع‌کننده حرارتی، به دلیل انتقال حرارت جابجایی، افزایش می‌یابد. افزایش دمای هوا به افزایش راندمان حرارتی منجر می‌شود. در نتیجه با این شیوه طراحی می‌توان انرژی بر واحد سطح بیشتری بدست آورد.

راندمان الکتریکی را افزایش داد. دمای سیال عبوری از روی پانل در اثر جذب حرارت افزایش می‌یابد و در نتیجه می‌توان از آن برای مصارف مختلف مانند خشک‌کن خورشیدی و تهویه مطبوع استفاده نمود. همه این فرآیندها را می‌توان در یک مجموعه جای داد که این مجموعه را سیستم فتوولتائیک/حرارتی خورشیدی می‌نامند. در این تکنولوژی خنک‌کاری پانل فتوولتائیک و افزایش راندمان هم‌زمان شده است. استفاده از آب و هوا برای خنک‌کاری پانل‌های فتوولتائیک معمول است. سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی مورد توجه قرار گرفته و به‌وسیله بسیاری از محققین از نظر تئوری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۱۹۷۸، کرن و راسل [۱] اولین کسانی بودند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مفهوم اصلی سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی را که به‌وسیله دو سیال عامل آب و هوا عمل می‌کردند، ارائه نمودند. پراکاش [۲] با تحقیق بر روی سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی با سیال عامل هوا و آب به این نتیجه رسید که راندمان این سیستم‌ها با سیال عامل آب بالاتر از هوا است، زیرا خواص ترموفیزیکی آب از هوا بالاتر است. ولی استفاده از هوا به دلیل هزینه‌های ساختاری کمتر رایج است. سوپیان و همکارانش [۳] بر روی سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی هوایی از نوع تک کاناله و دو کاناله تحلیل حرارتی انجام دادند. در سیستم تک کاناله‌ی مورد بررسی آن‌ها، هوا از طریق کانال میان سرپوش شیشه‌ای و پانل فتوولتائیک عبور کرده و باعث خنک‌کاری پانل‌ها می‌شد در حالی که در سیستم دو کاناله، هوا ابتدا از طریق کانال رفت که میان سرپوش شیشه‌ای و پانل فتوولتائیک بود، از روی پانل‌ها عبور کرده و سپس از طریق کانال برگشت که میان پانل‌ها و یک جداره‌ی عایق بود، از زیر پانل‌ها عبور می‌کرد. آن‌ها نشان دادند که سیستم با آرایش دو کاناله مشخصه‌های بهتری نسبت به نوع تک کاناله دارد. بازلیان و پراساد [۴] یک مدل عددی برای سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی در حالت جابجایی آزاد ارائه نمودند. با وجود اینکه راندمان سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی در مقایسه با سیستم‌های فتوولتائیک بسیار بیشتر است ولی برای افزایش راندمان سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی نیز روش‌هایی وجود دارد که معمول‌ترین آن‌ها عبارت است از قرار دادن پره در طول کانال عبور هوا و قرار دادن جمع‌کننده حرارتی در وسط کانال عبور هوا. تونوی و تریپاناگوستوپولوس [۵] عملکرد این سیستم‌ها را بررسی نموده و با سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی ساده مقایسه کردند. نتایج نشان دادند که استفاده از پره و یا جمع‌کننده حرارتی در کانال هوای



شکل (۲): نمایی کلی از سیستم مورد بررسی

۲-۱- وسایل اندازه‌گیری

مهم‌ترین بخش هر آزمایش، ثبت صحیح و دقیق عوامل مهم در طی آزمایش است. در آزمایش‌های انجام گرفته بر روی سیستم، کمیت‌های دمایی، سرعت هوا در داخل کانال‌ها و شدت تابش خورشید بسیار مهم و اثرگذار هستند. برای اندازه‌گیری دمای هوای محیط، از یک دماسنج دیجیتالی مدل Testo405-v1 که مجهز به تکنولوژی سیم داغ است، استفاده شده است. چون این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری سرعت را نیز دارد، برای اندازه‌گیری سرعت هوا در داخل کانال‌های بالا و پایین نیز مورد استفاده قرار گرفته است. برای اندازه‌گیری دمای پانل فتوولتائیک، دمای جمع‌کننده حرارتی و دمای هوای خروجی از کانال‌های بالا و پایین سیستم، از چهار عدد ترمومتر دیجیتالی مدل AM 200P-Pt100 استفاده شده است. در پایان تشعشع-سنج کپ، زونن آمدل CB7 برای تعیین شدت تشعشع خورشید مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- محاسبه‌ی دبی جرمی

برای بدست آوردن رابطه‌ای برای محاسبه‌ی دبی جرمی در حالت جابجایی آزاد، با توجه به شکل (۳)، معادله‌ی برنولی برای نقاط ۱ و ۲ یعنی به ترتیب ورودی و خروجی هوا به داخل کانال به صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود.

$$p_1 + \frac{\rho_1 v_1^2}{2} + \rho_1 g z_1 - \frac{fL}{D_H} \frac{\rho v^2}{2} - k_1 \frac{\rho_1 v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \rho_2 g z_2 + k_2 \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \quad (1)$$

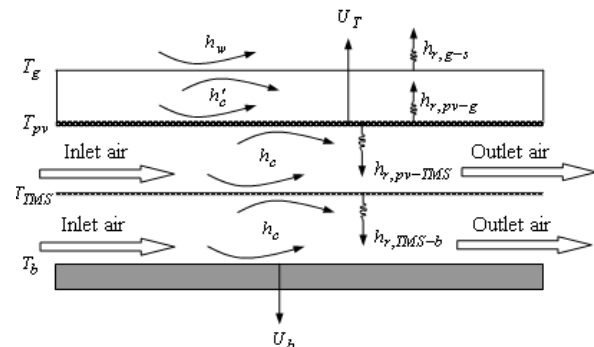
در رابطه (۱) ρ_1 ، ρ_2 و ρ به ترتیب عبارتند از چگالی هوای ورودی، چگالی هوای خروجی و چگالی متوسط هوا و v_1 ، v_2 و v به ترتیب عبارتند از سرعت هوای ورودی، سرعت هوای خروجی و سرعت متوسط هوا در داخل کانال. k_1 و k_2 به ترتیب ضریب اتلافات جزئی ناشی از ورود هوا به داخل کانال و ضریب اتلافات جزئی ناشی از خروج هوا از کانال که مقادیر آن‌ها با توجه به مرجع [۷] برابر با ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته شده

جدول (۱): مشخصات فنی پانل‌های به کار گرفته شده در سیستم

مورد بررسی

تعداد سلول‌های خورشیدی	۳۶
جریان اتصال کوتاه	۲/۹۸ آمپر
ولتاژ مدار باز	۲۰/۵ ولت
جریان بیشترین توان	۲/۷۶ آمپر
ولتاژ بیشترین توان	۱۶/۳ ولت
بیشترین توان	۴۵ وات

در پایان مرحله ساخت، در بالای بدنه‌ی اصلی و روی پانل‌های فتوولتائیک، سرپوشی از جنس شیشه قرار داده شده است. در اثر قرار دادن سرپوش شیشه‌ای بر روی پانل فتوولتائیک یک کانال هوا تشکیل می‌شود که برای جلوگیری از تماس پانل‌ها با هوای محیط، دو سر این کانال بسته می‌شود. در نهایت کل مجموعه روی یک تکیه گاه قابل حمل قرار می‌گیرد. گفتنی است که در سیستم مورد بررسی از سیستم تعقیب خورشید استفاده نشده است. اجزای مختلف سیستم و ضرایب انتقال حرارت در مقطع عرضی ارائه شده در شکل (۱) نشان داده شده است. در شکل (۲) نیز نمایی کلی از این سیستم ارائه شده است.



شکل (۱): اجزای مختلف سیستم مورد بررسی و ضرایب انتقال حرارت

چگونگی جریان یافتن هوا در داخل کانال‌ها را می‌توان به این صورت شرح داد که هوای محیط اطراف که وارد کانال‌های سیستم شده است، در اثر دریافت حرارت از پانل فتوولتائیک و جمع‌کننده حرارتی دچار افزایش دما و در نتیجه کاهش چگالی می‌شود. در اثر کاهش چگالی، هوا در داخل کانال‌ها به سمت بالا حرکت کرده و هوای محیط که چگالی بیشتری دارد جایگزین آن در ورودی کانال می‌شود. هوای عبوری از کانال‌های زیر پانل باعث کاهش دما و در نتیجه افزایش راندمان الکتریکی پانل‌ها می‌شود.

می‌شود:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (8)$$

با استفاده از معادلات (۵) تا (۸) در معادله‌ی (۴)، معادله‌ی (۹) برای محاسبه‌ی سرعت هوای عبوری از کانال بدست می‌آید:

$$v^2 = \frac{g\beta^2 L \sin \theta (T_{out} - T_{in}) T_{in}}{\frac{fL}{D_H} + \frac{2}{\beta T_{out}}} \quad (9)$$

با استفاده از معادلات (۶) و (۹)، معادله‌ی (۱۰) برای محاسبه‌ی دبی جرمی بدست می‌آید:

$$\dot{m}^2 = \frac{g\beta^2 L \sin \theta (A\rho)^2 (T_{out} - T_{in}) T_{in}}{\frac{fL}{D_H} + \frac{2}{\beta T_{out}}} \quad (10)$$

گرمای جذب شده به وسیله هوای عبوری از کانال با استفاده از رابطه‌ی (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (11)$$

در این رابطه C_p گرمای ویژه‌ی هوا است که برابر با 1000 J / Kg K در نظر گرفته شده است. اگر عبارت $(T_{out} - T_{in})$ را از معادله‌ی (۱۱) بدست آورده و در معادله (۱۰) قرار دهیم، رابطه‌ی نهایی برای محاسبه‌ی دبی جرمی هوای داخل کانال بدست می‌آید:

$$\dot{m} = \left(\frac{g\beta^2 L \sin \theta (A\rho)^2 T_{in} Q_u}{C_p \left[\frac{fL}{D_H} + \frac{2}{\beta T_{out}} \right]} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

در صورتی که از اختلاف ارتفاع کانال‌های بالا و پایین چشم-پوشی کنیم، از رابطه‌ی (۱۲) می‌توان برای محاسبه‌ی دبی جرمی هر دو کانال استفاده نمود.

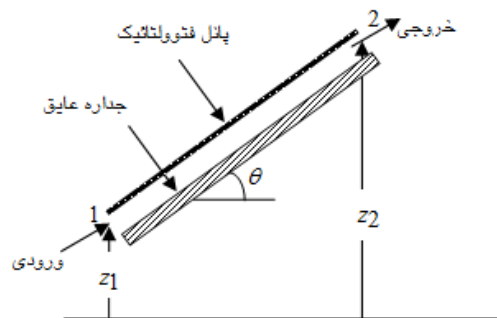
۳-۲- معادلات بقای انرژی

برای نوشتن معادلات بقای انرژی اجزای مختلف سیستم، المانی دیفرانسیلی، به طول dx و عرض w و به فاصله‌ی x از طول ورودی در نظر می‌گیریم. فرضیات مورد استفاده برای نوشتن معادلات انرژی عبارتند از: انتقال حرارت دائم و یک بعدی، صرف نظر کردن از گرمای ویژه‌ی همه‌ی اجزا به جز هوای داخل کانال‌ها، یکسان در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت جابجایی میان هوای داخل کانال‌ها با پانل فتوولتائیک، جمع‌کننده حرارتی و جداره‌ی عایق و یکنواخت در نظر گرفتن دمای پانل فتوولتائیک، جمع‌کننده حرارتی، شیشه و جداره‌ی عایق. اکنون به ارائه‌ی روابط بقای انرژی برای اجزای مختلف

است. D_H نشان دهنده‌ی قطر هیدرولیکی است و با استفاده از رابطه‌ی $D_H = \frac{4A}{P}$ محاسبه می‌شود. در این رابطه A سطح مقطع کانال و P محیط کانال است. همچنین در رابطه‌ی فوق f ضریب اصطکاک بوده و با استفاده از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود [۵]:

$$f = 1.906(Gr / Pr)^{1/12} \quad (2)$$

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \sin \theta \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (3)$$



شکل (۳): مقطع عرضی سیستم فتوولتائیک/حرارتی

برای ساده‌تر شدن معادله‌ی (۱)، فرض‌های ساده کننده‌ای در نظر گرفته می‌شود که عبارتند از:

- ۱- با توجه به این نکته که نقاط ۱ و ۲ هر دو با هوای محیط در ارتباط هستند، می‌توان فشار این نقاط را یکسان در نظر گرفت یعنی می‌توان فرض کرد: $p_1 = p_2$
- ۲- از سرعت هوای ورودی به داخل کانال می‌توان صرف نظر نمود یعنی: $v_1 = 0$

با در نظر گرفتن فرضیات معادله‌ی (۴) بدست می‌آید:

$$\rho_1 g z_1 - \rho_2 g z_2 = \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \frac{fL}{D_H} \frac{\rho v^2}{2} + k_2 \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \quad (4)$$

عبارت سمت چپ تساوی در معادله‌ی (۴) نشان دهنده‌ی نیروی شناوری است. ابراهیم و همکارانش [۸] نشان دادند که این عبارت برابر است با:

$$\rho_1 g z_1 - \rho_2 g z_2 = gL \sin \theta (\rho_1 - \rho) \quad (5)$$

معادله‌ی بقای جرم و رابطه‌ی میان چگالی هوا و دمای آن به ترتیب عبارتند از:

$$\dot{m} = \rho A v = \rho_2 A_2 v_2 \quad (6)$$

$$\rho_T = \rho \beta T \quad (7)$$

در رابطه‌ی فوق ρ_T چگالی هوا در دمای مفروض T است. β ضریب انبساط حرارتی هوا بوده و به صورت رابطه (۸) تعریف

سیستم می‌پردازیم. گفتنی است که در روابط ارائه شده، اندیس‌های g, pv, TMS و b به ترتیب نشان‌دهنده‌ی شیشه، پانل فتوولتائیک، جمع‌کننده حرارتی و جداره‌ی عایق هستند. هوای عبوری از کانال‌های بالا و پایین نیز به ترتیب با اندیس‌های $f1$ و $f2$ نشان داده شده‌اند. ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین دو سطح ۱ و ۲ با $h_{r,1-2}$ و ضریب انتقال حرارت جابجایی با h_c نشان داده شده است.

• سرپوش شیشه‌ای

۲-۴- محاسبه‌ی ضرایب انتقال حرارت

۲-۴-۱ ضرایب انتقال حرارت جابجایی

ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد بین شیشه و سطح رویی پانل فتوولتائیک از رابطه‌ی (۲۳) محاسبه می‌شود [۸]:

$$h'_c = \frac{k}{s \left\{ \frac{1 + 1.44[1 - R]^* (1 - R(\sin 1.8\theta)^{1.6})}{[0.66416R^{-1/3} - 1]^*} \right\}} \quad (23)$$

در رابطه‌ی فوق $R = 1708 / Ra_s \cos \theta$ ، Ra_s عدد رایلی برای فاصله‌ی هوایی میان شیشه و پانل فتوولتائیک، θ زاویه‌ی قرارگیری جمع‌کننده نسبت به افق (۳۰ درجه برای کرمان) و s فاصله هوایی بین شیشه و پانل فتوولتائیک است که برای سیستم مورد بررسی برابر با ۲/۵ سانتی‌متر است. منظور از علامت * در رابطه، این است که اگر جمله‌های اشاره شده منفی شوند باید با صفر جایگزین شوند. همچنین همه خواص به کار گرفته شده در این رابطه باید در دمای میانگین فاصله‌ی هوایی یعنی $\frac{(T_{pv} + T_g)}{2}$ محاسبه شوند.

ضریب انتقال حرارت جابجایی شیشه با هوای آزاد برای حالت با شیشه و سطح رویی جمع‌کننده با هوای آزاد برای حالت بدون شیشه از رابطه‌ی (۲۴) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$h_w = 2.8 + 3V_w \quad (24)$$

V_w نشان دهنده‌ی سرعت باد است.

برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد میان هوای داخل کانال‌های بالا و پایین سیستم با پانل فتوولتائیک، جمع‌کننده حرارتی و جداره‌ی عایق از روابط (۲۵) و (۲۶) استفاده می‌شود [۴]:

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67 [Gr.Pr]^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{(4/9)}} \quad (25)$$

$$\alpha_g I_r w dx = (h_{r,pv-g} + h'_c)(T_g - T_{pv}) w dx + (h_{r,g-a} + h_w)(T_g - T_a) w dx \quad (13)$$

• پانل فتوولتائیک

$$\tau_g \alpha_{pv} (1 - \eta_{el}) I_r w dx = U_T (T_{pv} - T_a) w dx + h_c (T_{pv} - T_{f1}) w dx + h_{r,pv-TMS} (T_{pv} - T_{TMS}) w dx \quad (14)$$

• هوای کانال بالا

$$\dot{m}_{f1} C_p dT_{f1} = h_c (T_{pv} - T_{f1}) w dx + h_c (T_{TMS} - T_{f1}) w dx \quad (15)$$

• جمع‌کننده حرارتی

$$h_{r,pv-TMS} (T_{pv} - T_{TMS}) w dx = h_c (T_{TMS} - T_{f1}) w dx + h_c (T_{TMS} - T_{f2}) w dx + h_{r,TMS-b} (T_{TMS} - T_b) w dx \quad (16)$$

• هوای کانال پایین

$$\dot{m}_{f2} C_p dT_{f2} = h_c (T_{TMS} - T_{f2}) w dx + h_c (T_b - T_{f2}) w dx \quad (17)$$

• جداره‌ی عایق

$$h_{r,TMS-b} (T_{TMS} - T_b) w dx = U_b (T_b - T_a) w dx + h_c (T_b - T_{f2}) w dx \quad (18)$$

برای حالت بدون سرپوش شیشه‌ای علاوه‌بر حذف شدن معادله‌ی (۱۳)، معادله‌ی (۱۴) نیز به صورت رابطه (۱۹) تغییر می‌کند:

$$\alpha_{pv} (1 - \eta_{el}) I_r w dx = h_w (T_{pv} - T_a) w dx + h_c (T_{pv} - T_{f1}) w dx + h_{r,pv-TMS} (T_{pv} - T_{TMS}) w dx \quad (19)$$

روابط مورد استفاده برای محاسبه‌ی راندمان حرارتی، راندمان الکتریکی و راندمان مجموع سیستم مورد بررسی عبارتند از:

$$\eta_{TH} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{I_r A_{pv}} \quad (20)$$

$$\eta_{el} = \eta_{ref} (1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref})) \quad (21)$$

$$\eta_{tot} = \eta_{th} + \eta_{el} \quad (22)$$

در رابطه‌ی (۲۱) که به‌وسیله فلور شیتز [۹] ارائه شده است،

در رابطه‌ی فوق N نشان دهنده‌ی تعداد سرپوش‌های شیشه‌ای است که در بالای پانل فتوولتائیک قرار داده می‌شوند. عوامل c ، e و f با استفاده از روابط (۳۲) تا (۳۴) محاسبه می‌شوند:

$$\begin{aligned} c &= 520(1 - 0.000051\beta^2) & 0^\circ < \beta < 70^\circ \\ \beta &= 70^\circ & 70^\circ < \beta < 90^\circ \end{aligned} \quad (32)$$

$$e = 0.43\left(1 - \frac{100}{T_{pv}}\right) \quad (33)$$

$$\begin{aligned} f &= (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\varepsilon_{pv}) \\ &(1 + 0.07866N) \end{aligned} \quad (34)$$

۳- آزمایش‌ها

اطلاعات آزمایشگاهی جمع‌آوری شده برای آزمایش جابجایی آزاد در حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون آن در جدول‌های (۲) و (۳) آورده شده است. گفتنی است که سرعت باد در محیط انجام آزمایش کم بوده و در محاسبات برابر با ۱ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. عوامل اندازه‌گیری شده در طی آزمایش عبارتند از: شدت تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای پانل فتوولتائیک، دمای جمع‌کننده حرارتی، دمای هوای خروجی از کانال‌های بالا و پایین و سرعت متوسط هوای عبوری از کانال‌های بالا و پایین. عوامل هر نیم ساعت یکبار ثبت شده‌اند.

۴- نتایج

برای اینکه بتوان نتایج مدل‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمود از شدت تابش خورشیدی و دمای محیط اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به عنوان ورودی برنامه نوشته شده برای شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی استفاده شده است. عوامل دیگری که برای شبیه‌سازی سیستم مورد نیاز هستند عبارتند از خواص تابشی (ضریب جذب، ضریب صدور و ضریب عبور) اجزای مختلف سیستم که مقادیر آن‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

$$h_c = \frac{k.Nu}{D_H} \quad (26)$$

۲-۴ ضرایب انتقال حرارت تشعشعی

ضریب انتقال حرارت تشعشعی میان آسمان و سرپوش شیشه‌ای برای حالت با سرپوش و سطح رویی پانل فتوولتائیک برای حالت بدون سرپوش از روابط (۲۷) و (۲۸) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$h_{r,g-a} = \sigma\varepsilon_{pv} \frac{(T_g^4 - T_a^4)}{T_g - T_a} \quad (27)$$

$$T_s = 0.0552T_a^{1.5} \quad (28)$$

برای حالت بدون سرپوش شیشه‌ای باید در رابطه‌ی (۲۷) به جای T_g عبارت T_{pv} را قرار داد. برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت تشعشعی میان سطوح ۱ و ۲، رابطه‌ی (۲۹) مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۰]:

$$h_{r,1-2} = \sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \quad (29)$$

۲-۳ ضرایب اتلاف حرارتی

ضریب اتلاف حرارت سطح پایینی بدنه به محیط اطراف از رابطه‌ی (۳۰) محاسبه می‌شود:

$$U_b = \frac{k_{ins}}{\delta_{ins}} \quad (30)$$

در رابطه‌ی فوق، k_{ins} و δ_{ins} به ترتیب نشان دهنده‌ی رسانایی حرارتی و ضخامت عایق هستند.

ضریب اتلاف حرارت پانل فتوولتائیک به محیط اطراف با استفاده از رابطه‌ی (۳۱) محاسبه می‌شود [۱۰]:

$$\begin{aligned} U_T &= \left[\frac{N}{(C/T_p)[(T_{pv} - T_a)/(N + f)]^e} \right. \\ &+ \left. \frac{1}{h_w} \right]^{-1} \\ &+ \left[\frac{(\varepsilon_{pv} + 0.00591N.h_w)^{-1} + [(2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_{pv})/\varepsilon_g] - N}{\sigma(T_{pv} + T_a)(T_{pv}^2 + T_a^2)} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (31)$$

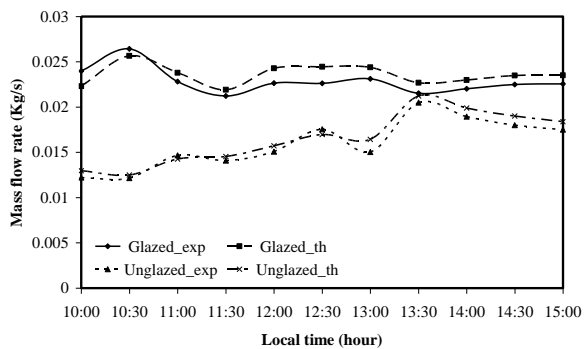
جدول (۲): اطلاعات آزمایشگاهی جمع‌آوری شده برای آزمایش جابجایی آزاد با سرپوش شیشه‌ای (انجام شده در ۸ مرداد ماه سال ۱۳۸۸)

زمان	شدت تابش خورشیدی (W/m ²)	دمای محیط (°C)	دمای پانل فتوولتائیک (°C)	دمای جمع‌کننده حرارتی (°C)	دمای هوای خروجی (°C)		سرعت متوسط هوا (m/s)	
					کانال بالا	کانال پایین	کانال بالا	کانال پایین
۱۰:۰۰	۶۴۱	۳۰/۲	۵۷	۴۳/۶	۳۷/۸	۳۶	۰/۳۲	۰/۱۵
۱۰:۳۰	۷۲۷	۳۱/۴	۶۰/۳	۴۶	۴۰/۶	۳۷/۸	۰/۲۹	۰/۲۳
۱۱:۰۰	۷۹۲	۳۲	۶۳/۴	۴۷/۵	۴۲/۵	۴۰/۵	۰/۲۹	۰/۱۶
۱۱:۳۰	۸۱۶	۳۳/۲	۶۷	۴۹/۶	۴۳/۹	۴۱	۰/۳۱	۰/۱۱
۱۲:۰۰	۸۶۴	۳۴/۳	۶۸/۷	۵۱/۲	۴۵/۴	۴۲/۳	۰/۳۳	۰/۱۲
۱۲:۳۰	۸۸۴	۳۴/۶	۷۰/۶	۵۱/۹	۴۵/۸	۴۲/۵	۰/۳۳	۰/۱۲
۱۳:۰۰	۸۸۰	۳۴/۸	۷۰/۸	۵۲	۴۶/۸	۴۲/۵	۰/۳۴	۰/۱۲
۱۳:۳۰	۸۷۰	۳۶/۱	۷۰/۲	۵۴	۴۸/۳	۴۲/۵	۰/۳۶	۰/۱۲
۱۴:۰۰	۸۴۶	۳۶	۷۱/۱	۵۴/۵	۴۶/۸	۴۳/۵	۰/۳۲	۰/۱۲
۱۴:۳۰	۸۰۰	۳۶/۵	۷۰/۸	۵۴/۴	۴۷/۳	۴۴/۷	۰/۳۲	۰/۱۳
۱۵:۰۰	۷۲۵	۳۵/۶	۶۸/۸	۵۴/۱	۴۵/۸	۴۴/۱	۰/۲۹	۰/۱۶

جدول (۳): اطلاعات آزمایشگاهی جمع‌آوری شده برای آزمایش جابجایی آزاد بدون سرپوش شیشه‌ای (انجام شده در ۹ مرداد ماه سال ۱۳۸۸)

زمان	شدت تابش خورشیدی (W/m ²)	دمای محیط (°C)	دمای پانل فتوولتائیک (°C)	دمای جمع‌کننده حرارتی (°C)	دمای هوای خروجی (°C)		سرعت متوسط هوا (m/s)	
					کانال بالا	کانال پایین	کانال بالا	کانال پایین
۱۰:۰۰	۶۵۰	۳۰/۸	۴۸/۴	۳۹	۳۹/۳	۳۷/۷	۰/۱۶	۰/۰۸
۱۰:۳۰	۷۳۲	۳۲/۴	۵۳/۲	۴۳/۵	۴۰/۷	۳۹/۷	۰/۱۴	۰/۱
۱۱:۰۰	۷۹۹	۳۲/۷	۵۴/۸	۴۴/۸	۴۱/۴	۴۰/۳	۰/۱۸	۰/۱۱
۱۱:۳۰	۸۴۸	۳۴/۷	۵۹/۱	۴۸/۵	۴۳/۴	۴۲/۱	۰/۱۸	۰/۱
۱۲:۰۰	۸۸۹	۳۴/۷	۶۰/۵	۴۹/۱	۴۳/۵	۴۲/۸	۰/۱۸	۰/۱۲
۱۲:۳۰	۸۹۹	۳۵/۴	۶۰/۹	۴۹/۹	۴۴/۴	۴۳/۳	۰/۲۳	۰/۱۲
۱۳:۰۰	۸۹۹	۳۵/۸	۶۱/۱	۵۰/۳	۴۶/۳	۴۳/۹	۰/۲	۰/۱
۱۳:۳۰	۸۸۰	۳۶/۶	۶۲/۵	۵۲/۶	۴۶/۸	۴۴/۱	۰/۲۹	۰/۱۲
۱۴:۰۰	۸۴۸	۳۷/۴	۶۲/۶	۵۲/۱	۴۷/۵	۴۴/۴	۰/۲۹	۰/۰۹
۱۴:۳۰	۷۹۴	۳۶/۴	۶۰/۵	۵۱/۲	۴۵/۶	۴۴/۵	۰/۲۴	۰/۱۲
۱۵:۰۰	۷۳۱	۳۶/۳	۵۷/۵	۴۹/۸	۴۵/۳	۴۴/۳	۰/۲۳	۰/۱۲

سیستم مورد بررسی در حالت با سرپوش شیشه‌ای بیشتر از حالت بدون سرپوش شیشه‌ای است.



شکل (۴): دبی جرمی هوای عبوری از کانال‌های سیستم برای زمان‌های مختلف روز

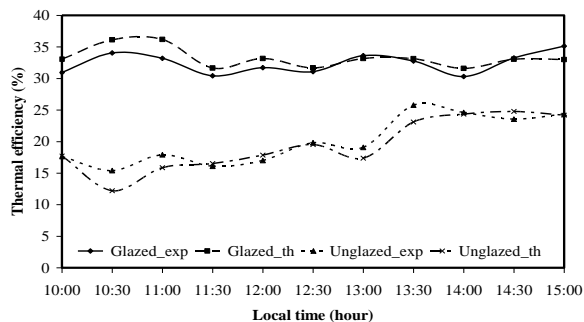
جدول (۴): خواص تابشی اجزای مختلف سیستم مورد بررسی

α_g	α_{pv}	τ_g	ϵ_g	ϵ_b	ϵ_{pv}	ϵ_{TMS}
۰/۰۴	۰/۹	۰/۹۲	۰/۸۶	۰/۸	۰/۹	۰/۹

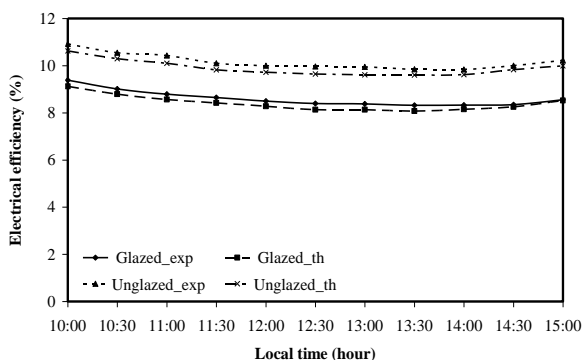
نحوه تغییرات دبی جرمی هوای عبوری از کانال‌های سیستم، دمای پانل فتوولتائیک و دمای هوای خروجی از کانال‌های بالا و پایین سیستم مورد بررسی در طول روز برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون آن به ترتیب در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است. همان‌طوری که دیده می‌شود نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی هم‌خوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که دبی جرمی هوا، دمای پانل فتوولتائیک و دمای هوای خروجی از کانال‌های

فتوولتائیک باعث کاهش راندمان الکتریکی آن می‌شود. قرار دادن سرپوش شیشه‌ای علاوه بر افزایش دمای پانل فتوولتائیک، به دلیل انعکاس بخشی از تابش ورودی باعث کاهش بیشتر راندمان الکتریکی می‌شود. بنابراین فقط در کاربردهایی که راندمان حرارتی اولویت بیشتری نسبت به راندمان الکتریکی دارد، قرار دادن سرپوش شیشه‌ای مناسب است.

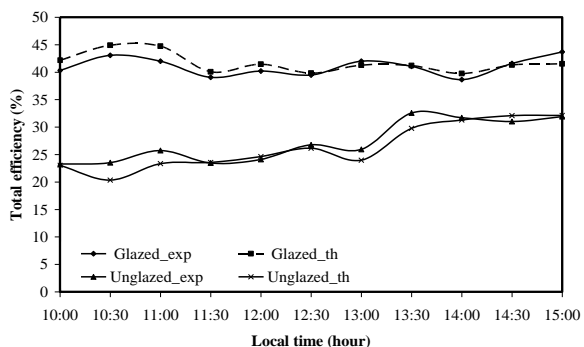
در پایان گفتنی است، محاسبات نشان می‌دهند که میزان خطای نسبی بین نتایج بدست آمده شبیه‌سازی و نتایج آزمایشگاهی برای همه عوامل مورد بررسی در هر دو حالت با سرپوش شیشه‌ای و بدون سرپوش کمتر از ۷ درصد است که مقدار قابل قبولی است.



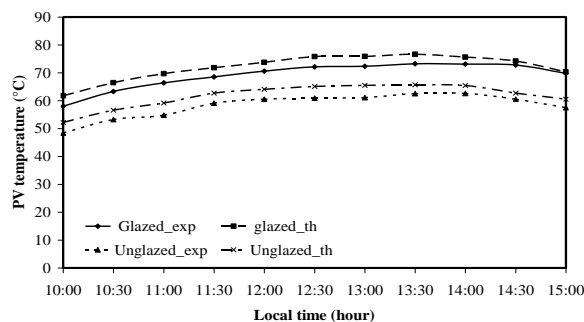
شکل (۵): راندمان حرارتی سیستم مورد بررسی برای زمان‌های مختلف روز



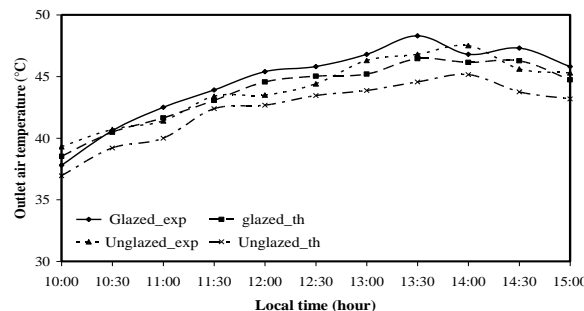
شکل (۶): راندمان الکتریکی سیستم مورد بررسی برای زمان‌های مختلف روز



شکل (۷): راندمان مجموع سیستم مورد بررسی برای زمان‌های مختلف روز



شکل (۸): دمای پانل فتوولتائیک برای زمان‌های مختلف روز



شکل (۹): دمای هوای خروجی از کانال برای زمان‌های مختلف روز

قرار دادن سرپوش شیشه‌ای سبب قطع تماس پانل فتوولتائیک با محیط اطراف و در نتیجه افزایش دمای پانل می‌شود. در اثر افزایش دمای پانل دمای هوای خروجی از کانال‌ها و در نتیجه دبی جرمی هوا افزایش می‌یابد.

نوعی تغییر راندمان حرارتی، راندمان الکتریکی و راندمان مجموع سیستم فتوولتائیک/حرارتی مورد بررسی در طول روز برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون آن به ترتیب در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است. شکل‌های ارائه شده نشان می‌دهند که نتایج تئوری و آزمایشگاهی هم‌خوانی خوبی با هم دارند. همچنین در شکل‌های (۷) و (۹) دیده می‌شود که در بعد از ظهر با افزایش شدت تابش خورشید و دمای محیط، راندمان حرارتی و در نتیجه راندمان مجموع سیستم بدون سرپوش شیشه‌ای افزایش چشمگیری داشته در حالی که در سیستم با سرپوش شیشه‌ای، به علت کمتر بودن میزان افزایش شدت تابش خورشیدی و دمای محیط، تغییر چندان قابل توجه نیست.

همان‌طوری که اشاره شد دبی جرمی و دمای خروجی هوای عبوری از کانال‌های سیستم مورد بررسی در حالت با سرپوش شیشه‌ای بیشتر از حالت بدون سرپوش شیشه‌ای است. بنابراین با توجه به رابطه‌ی ارائه شده برای محاسبه‌ی راندمان حرارتی می‌توان نتیجه گرفت که راندمان حرارتی حالت با سرپوش شیشه‌ای بیشتر از حالت بدون سرپوش است. هم‌چنین همان‌طوری که در مقدمه اشاره شد افزایش دمای پانل

۵- نتیجه

Pr	عدد پرانتل
T	دمای مطلق، K
U	ضریب اتلاف حرارتی، $W/m^2 K$
w	پهنای کانال، m
	علائم یونانی
α	ضریب جذب
β_{ref}	ضریب دمایی سلول فتوولتائیک
δ	ضخامت عایق، m
ε	ضریب صدور
	راندمان الکتریکی
η_{ref}	پانل فتوولتائیک در دمای مرجع
	راندمان الکتریکی
η_{el}	پانل فتوولتائیک در دمای پانل
	راندمان حرارتی
η_{th}	سیستم فتوولتائیک/حرارتی
	راندمان مجموع
η_{tot}	سیستم فتوولتائیک/حرارتی
σ	ثابت استفان-بولتزمان، $5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$
τ	ضریب عبور
	زیرنویس
b	جداره‌ی عایق
$f1$	سیال کانال بالا
$f2$	سیال کانال پایین
g	شیشه
pv	پانل فتوولتائیک
TMS	جمع‌کننده حرارتی

قرار دادن سرپوش شیشه‌ای باعث افزایش دبی جرمی هوا و راندمان حرارتی و کاهش راندمان الکتریکی این سیستم‌ها می‌شود. بنابراین فقط در کاربردهایی که راندمان حرارتی اولویت بیشتری در مقایسه با راندمان الکتریکی دارد قرار دادن سرپوش شیشه‌ای مناسب است. محاسبات نشان می‌دهند راندمان مجموع تئوری و آزمایشگاهی سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی هوایی برای هر دو حالت بیشتر از راندمان ۵ الی ۲۰ درصدی سیستم‌های فتوولتائیک است.

۶- تقدیر و تشکر

این پژوهش در پژوهشکده‌ی انرژی و محیط زیست دانشگاه شهید باهنر کرمان صورت انجام شده است که از این مرکز تشکر می‌گردد.

۷- فهرست علائم

A	مساحت مقطع کانال، m^2
D_H	قطر هیدرولیکی، m
f	ضریب اصطکاک
Gr	عدد گرافش
h_c	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $W/m^2 K$
h_r	ضریب انتقال حرارت تشعشعی، $W/m^2 K$
I_r	شدت تابش ورودی، W/m^2
k	رسانایی حرارتی، $W/m K$
L	طول سیستم، m
\dot{m}	دبی جرمی، Kg/s
Nu	عدد ناسلت
p	فشار، Pa

۸- مراجع

- Joshi, A.; Tiwari, A.; "Energy and exergy Efficiencies of a hybrid Photovoltaic-Thermal Air Collectors", Renewable Energy 2007, 32, p. 2223-2241. [۶]
- Hegazy, A.; "Comparative study of the performance of four photovoltaic/thermal solar air collectors", Energy Conversion & Management 2000, 41, p. 861-881. [۷]
- Ibrahim, Z.; Marshall, R.H.; Brinkworth, B.J.; "Simplified loop analysis for naturally ventilated channel heated from one side by PV elements", In: Proceedings of the UKISES silver jubilee conference, Brighton. May 1999, p. 69-74. [۸]
- Florschuetz, L.W.; "Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors", Solar Energy 1979, 22, p. 361-366. [۹]
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A.; Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991. [۱۰]
- Kern, E.C.; Russell, M.C.; "Combined photovoltaic and thermal hybrid collector system", In: Proceedings of the 13th IEEE PV specialist conference, Washington DC. 5-8 June 1978, p. 1153-1157. [۱]
- Prakash, J.; "Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water", Energy Conversion and Management 1994, 35, p. 967-972. [۲]
- Sopian, K.; Yigit, K.S.; Liu, H.T.; Kakac, S.; Veziroglu, T.N.; "Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters", Energy Conversion and Management 1996, 37, p. 1657-1670. [۳]
- Bazilian, M.; Prasad, D.; "Modeling of a photovoltaic heat recovery system and its role in a design decision support tool for building professionals", Renewable Energy 2002, 27, p. 57-68. [۴]
- Tonui, J.K.; Tripanagnostopoulos, Y.; "improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation", Solar Energy 2006, 81, p. 498-511. [۵]

\ Hot Wire
ˆ Kipp & Zonen