شبيه‌سازي و آزمايش سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي هوايي در حالت جابجايي آزاد

امين شهسوار[i]; مهران عامري[ii *]; محمد مهدي محمودآبادي[iii]

چکيده

در اين مقاله شبيه‌سازي سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي در حالت جابجايي آزاد براي حالت‌هاي با سرپوش شيشه‌اي و بدون آن آورده شده و نتايج بدست آمده با مقادير آزمايشگاهي مقايسه شده است. نتايج نشان مي‌دهند که شبيه‌سازي با مقادير آزمايشگاهي هم‌خواني بسيار خوبي دارند. اثرات قرار دادن سرپوش شيشه‌اي بر روي عوامل مختلف سيستم نيز بررسي شده است. نتايج نشان مي‌دهند که قرار دادن سرپوش شيشه‌اي در سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي باعث افزايش راندمان حرارتي و کاهش راندمان الکتريکي اين سيستم‌ها مي‌شود.

کلمات کليدي: جابجايي آزاد، سرپوش شيشه‌اي، شبيه‌سازي، فتوولتائيک، فتوولتائيک/حرارتي.

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

امروزه در اثر افزايش بهاي سوخت‌هاي فسيلي و محدوديت منابع و هم‌چنين مشکلات زيست محيطي و تغييرات اقليمي استفاده از انرژي‌هاي تجديدپذير مورد توجه قرار گرفته است. يکي از منابع قابل دسترس و فراوان، انرژي خورشيدي است. از جمله کاربردهاي انرژي خورشيدي تبديل مستقيم پرتوهاي خورشيد به الکتريسيته بوسيله‌ي پانل‌هاي فتوولتائيک است. سيستم‌هاي فتوولتائيک توانايي تبديل انرژي خورشيدي به الکتريسيته را با راندماني در حدود ۵ الي ۲۰ درصد دارند. يعني پانل فتوولتائيک بخش کمي از تشعشع جذب شده را به انرژي الکتريکي تبديل مي‌کند و باقي آن به صورت حرارت تلف مي‌شود. در عين حال افزايش دماي پانل موجب کاهش راندمان الکتريکي آن مي‌شود. با دفع حرارت از پانل‌ها مي‌توان اين اثر نامطلوب را کاهش داد، به اين صورت که با جاري ساختن يک سيال بر روي پانل‌هاي فتوولتائيک، به واسطه‌ي انتقال حرارت جابجايي، مي‌توان بخش زيادي از اين حرارت را از پانل جذب کرده و دماي سطح پانل فتوولتائيک را کاهش و در نتيجه

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۸/۱۱/۱

تاريخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/٤/۷

[i] کارشناس ارشد; دانشگاه شهيد باهنر کرمان، دانشکده فني و مهندسي، بخش مهندسي مکانيک: amin.shahsavar@yahoo.com.

[ii] * نويسنده مسئول و دانشيار; دانشگاه شهيد باهنر کرمان، دانشکده فني و مهندسي، بخش مهندسي مکانيک: ameri_mm@mail.uk.ac.ir.

[iii] کارشناس ارشد; دانشگاه شهيد باهنر کرمان، دانشکده فني و مهندسي، بخش مهندسي مکانيک: m.mahmoudabadi@gmail.com.

راندمان الكتريكي را افزايش داد. دماي سيال عبوري از روي پانل در اثر جذب حرارت افزايش مي‌يابد و در نتيجه مي‌توان از آن براي مصارف مختلف مانند خشک‌کن خورشيدي و تهويه مطبوع استفاده نمود. همه اين فرآيندها را مي‌توان در يک مجموعه جاي داد که اين مجموعه را سيستم فتوولتائيک/حرارتي خورشيدي مي‌نامند. در اين تکنولوژي خنک‌کاري پانل فتوولتائيک و افزايش راندمان هم‌زمان شده است. استفاده از آب و هوا براي خنك‌كاري پانل‌هاي فتوولتائيك معمول است. سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي مورد توجه قرار گرفته و به‌وسيله بسياري از محققين از نظر تئوري و آزمايشگاهي مورد بررسي قرار گرفته است. در سال ۱۹۷۸، کرن و راسل [۱] اولين کساني بودند که با استفاده از نتايج آزمايشگاهي مفهوم اصلي سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي را که به‌وسيله دو سيال عامل آب و هوا عمل مي‌کردند، ارائه نمودند. پراکاش [۲] با تحقيق بر روي سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي با سيال عامل هوا و آب به اين نتيجه رسيد که راندمان اين سيستم‌ها با سيال عامل آب بالاتر از هوا است، زيرا خواص ترموفيزيکي آب از هوا بالاتر است. ولي استفاده از هوا به دليل هزينه‌هاي ساختاري کمتر رايج است. سوپيان و همکارانش [۳] بر روي سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي هوايي از نوع تک کاناله و دو کاناله تحليل حرارتي انجام دادند. در سيستم تک کاناله‌ي مورد بررسي آن‌ها، هوا از طريق کانال ميان سرپوش شيشه‌اي و پانل فتوولتائيک عبور کرده و باعث خنک‌کاري پانل‌ها مي‌شد در حالي که در سيستم دو کاناله، هوا ابتدا از طريق کانال رفت که ميان سرپوش شيشه‌اي و پانل فتوولتائيک بود، از روي پانل‌ها عبور کرده و سپس از طريق کانال برگشت که ميان پانل‌ها و يک جداره‌ي عايق بود، از زير پانل‌ها عبور مي‌کرد. آن‌ها نشان دادند که سيستم با آرايش دو کاناله مشخصه‌هاي بهتري نسبت به نوع تک کاناله دارد. بازيليان و پراساد [۴] يک مدل عددي براي سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي در حالت جابجايي آزاد ارائه نمودند. با وجود اينکه راندمان سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي در مقايسه با سيستم‌هاي فتوولتائيک بسيار بيشتر است ولي براي افزايش راندمان سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي نيز روش‌هايي وجود دارد که معمول‌ترين آن‌ها عبارت است از قرار دادن پره در طول کانال عبور هوا و قرار دادن جمع‌کننده حرارتي در وسط کانال عبور هوا. تونوي و تريپاناگنوستوپولوس [۵] عملکرد اين سيستم‌ها را بررسي نموده و با سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي ساده مقايسه کردند. نتايج نشان دادند که استفاده از پره و يا جمع‌کننده حرارتي در کانال هواي سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي، باعث افزايش مشخصات حرارتي و الکتريکي مي‌شود. در سال ۲۰۰۷، جوشي و تيواري [۶]، راندمان سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي را به دو صورت انرژي و اگزرژي مورد بررسي قرار دادند. آن‌ها راندمان انرژي را حدود ۵۵ الي ۵۶ درصد و راندمان اگزرژي را حدود ۱۲ الي ۱۵ درصد بيان نموده‌اند.

در اين مقاله يک سيستم فتوولتائيک/حرارتي هوايي با جمع‌کننده حرارتي در حالت جابجايي آزاد براي حالت‌هاي با سرپوش شيشه‌اي و بدون سرپوش شيشه‌اي شبيه‌سازي شده و نتايج بدست آمده با مقادير آزمايشگاهي مقايسه شده است. اثرات قرار دادن سرپوش شيشه‌اي بر روي عوامل مختلف سيستم نيز بررسي شده است.

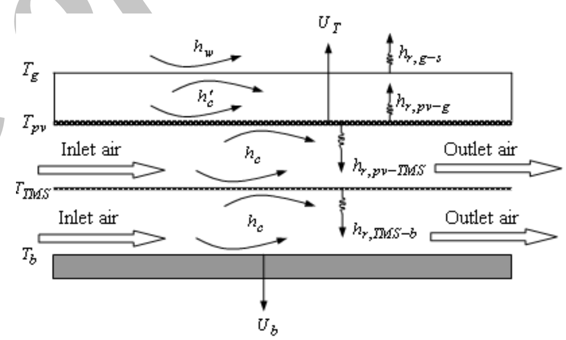
۲- شبيه‌سازي

نمونه‌اي از سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي در دانشکده فني دانشگاه شهيد باهنر کرمان ساخته شده و در محيط آزاد مورد آزمايش قرار گرفته است. اين سيستم شامل بدنه‌ي اصلي (قاب)، جمع‌کننده حرارتي، پانل فتوولتائيك، تکيه‌گاه و سرپوش شيشه‌اي است. بدنه‌ي اصلي با ابعاد ۳۵ × ۵۴ × ۱۹۶ سانتي‌متر از جنس چوب ساخته شده و وجوه آن به‌وسيله پشم شيشه به ضخامت ۲/۵ سانتي‌متر عايق‌بندي شده است تا اتلاف حرارت کاهش يابد. جمع‌کننده حرارتي از جنس آلومينيوم تجاري (با ضخامت ۱ ميلي‌متر) بوده و در وسط کانال عبور هوا قرار گرفته است. در اين سيستم از دو پانل فتوولتائيك نوع سيليکوني پلي‌کريستالي ساخت کارخانه‌ي شهيد قندي يزد که هر كدام داراي توان اسمي برابر با ۴۵ وات هستند، استفاده شده است. مشخصات اين پانل‌ها که از طرف کارخانه‌ي سازنده اعلام شده است، در جدول (۱) آورده شده است. اين پانل‌ها بخشي از تشعشع رسيده را جذب مي‌کنند که صرف توليد الکتريسيته و بالا رفتن دماي آن‌ها مي‌شود. تشعشع عبوري از پانل‌ها به‌وسيله جمع‌کننده حرارتي جذب مي‌شود. عبور سيال از داخل کانال بين پانل فتوولتائيک و جمع‌کننده حرارتي از بالا رفتن دماي پانل‌ها جلوگيري نموده و باعث بالا رفتن راندمان الکتريکي پانل‌ها مي‌شود. دماي هواي عبوري از کانال‌هاي سيستم در اثر جذب حرارت پانل‌هاي فتوولتائيک و جمع‌کننده حرارتي، به دليل انتقال حرارت جابجايي، افزايش مي‌يابد. افزايش دماي هوا به افزايش راندمان حرارتي منجر مي‌شود. در نتيجه با اين شيوه طراحي مي‌توان انرژي بر واحد سطح بيشتري بدست آورد.

جدول (۱): مشخصات فني پانل‌هاي به كار گرفته شده در سيستم مورد بررسي

تعداد سلول‌هاي خورشيدي	۳۶
جريان اتصال كوتاه	۲/۹۸ آمپر
ولتاژ مدار باز	۲۰/۵ ولت
جريان بيشترين توان	۲/۷۶ آمپر
ولتاژ بيشترين توان	۱۶/۳ ولت
بيشترين توان	۴۵ وات

در پايان مرحله ساخت، در بالاي بدنه‌ي اصلي و روي پانل‌هاي فتوولتائيك، سرپوشي از جنس شيشه قرار داده شده است. در اثر قرار دادن سرپوش شيشه‌اي بر روي پانل فتوولتائيک يک كانال هوا تشكيل مي‌شود كه براي جلوگيري از تماس پانل‌ها با هواي محيط، دو سر اين كانال بسته مي‌شود. در نهايت كل مجموعه روي يك تكيه گاه قابل حمل قرار مي‌گيرد. گفتني است كه در سيستم مورد بررسي از سيستم تعقيب خورشيد استفاده نشده است. اجزاي مختلف سيستم و ضرايب انتقال حرارت در مقطع عرضي ارائه شده در شكل (۱) نشان داده شده است. در شكل (۲) نيز نمايي كلي از اين سيستم ارائه شده است.



شكل (۱): اجزاي مختلف سيستم مورد بررسي و ضرايب انتقال حرارت

چگونگي جريان يافتن هوا در داخل كانال‌ها را مي‌توان به اين صورت شرح داد كه هواي محيط اطراف كه وارد كانال‌هاي سيستم شده است، در اثر دريافت حرارت از پانل فتوولتائيک و جمع‌كننده حرارتي دچار افزايش دما و در نتيجه كاهش چگالي مي‌شود. در اثر كاهش چگالي، هوا در داخل كانال‌ها به سمت بالا حركت كرده و هواي محيط كه چگالي بيشتري دارد جايگزين آن در ورودي كانال مي‌شود. هواي عبوري از كانال‌هاي زير پانل باعث كاهش دما و در نتيجه افزايش راندمان الكتريكي پانل‌ها مي‌شود.

شكل (۲): نمايي كلي از سيستم مورد بررسي

۲-۱- وسايل اندازه‌گيري

مهم‌ترين بخش هر آزمايش، ثبت صحيح و دقيق عوامل مهم در طي آزمايش است. در آزمايش‌هاي انجام گرفته بر روي سيستم، كميت‌هاي دمايي، سرعت هوا در داخل كانال‌ها و شدت تابش خورشيد بسيار مهم و اثرگذار هستند. براي اندازه‌گيري دماي هواي محيط، از يك دماسنج ديجيتالي مدل Testo405-v1 كه مجهز به تكنولوژي سيم داغ[1] است، استفاده شده است. چون اين دستگاه قابليت اندازه‌گيري سرعت را نيز دارد، براي اندازه-گيري سرعت هوا در داخل كانال‌هاي بالا و پايين نيز مورد استفاده قرار گرفته است. براي اندازه‌گيري دماي پانل فتوولتائيک، دماي جمع‌كننده حرارتي و دماي هواي خروجي از كانال‌هاي بالا و پايين سيستم، از چهار عدد ترمومتر ديجيتالي مدل AM 200P–Pt100 استفاده شده است. در پايان تشعشع-سنج كيپ زونن[2] مدلCB7 براي تعيين شدت تشعشع خورشيد مورد استفاده قرار گرفته است.

۲-۲- محاسبه‌ي دبي جرمي

براي بدست آوردن رابطه‌اي براي محاسبه‌ي دبي جرمي در حالت جابجايي آزاد، با توجه به شكل (۳)، معادله‌ي برنولي براي نقاط ۱ و ۲ يعني به ترتيب ورودي و خروجي هوا به داخل كانال به صورت رابطه (۱) نوشته مي‌شود.

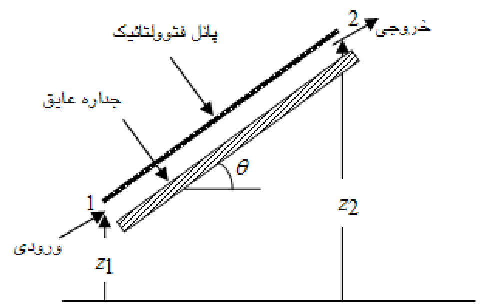
$$p_1+\frac{\rho_1 v_1^2}{2}+\rho_1 g z_1-\frac{fL}{D_H}\frac{\rho v^2}{2}-k_1\frac{\rho_1 v_1^2}{2} = p_2+\frac{\rho_2 v_2^2}{2}+\rho_2 g z_2+k_2\frac{\rho_2 v_2^2}{2} \quad (۱)$$

در رابطه (۱) ρ_1، ρ_2 و ρ به ترتيب عبارتند از چگالي هواي ورودي، چگالي هواي خروجي و چگالي متوسط هوا و v_1، v_2 و v به ترتيب عبارتند از سرعت هواي ورودي، سرعت هواي خروجي و سرعت متوسط هوا در داخل كانال. k_1 و k_2 به ترتيب ضريب اتلافات جزئي ناشي از ورود هوا به داخل كانال و ضريب اتلافات جزئي ناشي از خروج هوا از كانال كه مقادير آن‌ها با توجه به مرجع [۷] برابر با ۰/۵ و ۱ در نظر گرفته شده

است. D_H نشان دهنده‌ي قطر هيدروليکي است و با استفاده از رابطه‌ي $D_H=\frac{4A}{P}$ محاسبه مي‌شود. در اين رابطه A سطح مقطع کانال و P محيط کانال است. هم‌چنين در رابطه‌ي فوق f ضريب اصطکاک بوده و با استفاده از رابطه‌ي (۲) محاسبه مي‌شود [۵]:

$$f=1.906(Gr/Pr)^{1/12} \tag{۲}$$

$$Gr=\frac{L^3\rho^2 g\sin\theta\beta\Delta T}{\mu^2} \tag{۳}$$



شکل (۳): مقطع عرضي سيستم فتوولتائيک/حرارتي

براي ساده‌تر شدن معادله‌ي (۱)، فرض‌هاي ساده کننده‌اي در نظر گرفته مي‌شود که عبارتند از:

۱- با توجه به اين نکته که نقاط ۱ و ۲ هر دو با هواي محيط در ارتباط هستند، مي‌توان فشار اين نقاط را يکسان در نظر گرفت يعني مي‌توان فرض کرد: $p_1=p_2$

۲- از سرعت هواي ورودي به داخل کانال مي‌توان صرف‌نظر نمود يعني: $v_1=0$

با در نظر گرفتن فرضيات معادله‌ي (۴) بدست مي‌آيد:

$$\rho_1 g z_1-\rho_2 g z_2=\frac{\rho_2 v_2^2}{2}+\frac{fL}{D_H}\frac{\rho v^2}{2}+k_2\frac{\rho_2 v_2^2}{2} \tag{۴}$$

عبارت سمت چپ تساوي در معادله‌ي (۴) نشان دهنده‌ي نيروي شناوري است. ابراهيم و همکارانش [۸] نشان دادند که اين عبارت برابر است با:

$$\rho_1 g z_1-\rho_2 g z_2=gL\sin\theta(\rho_1-\rho) \tag{۵}$$

معادله‌ي بقاي جرم و رابطه‌ي ميان چگالي هوا و دماي آن به ترتيب عبارتند از:

$$\dot m=\rho A v=\rho_2 A_2 v_2 \tag{۶}$$

$$\rho_T=\rho\beta T \tag{۷}$$

در رابطه‌ي فوق ρ_T چگالي هوا در دماي مفروض T است. β ضريب انبساط حرارتي هوا بوده و به صورت رابطه (۸) تعريف مي‌شود:

$$\beta=\frac{1}{T_f}\qquad T_f=\frac{T_{in}+T_{out}}{2} \tag{۸}$$

با استفاده از معادلات (۵) تا (۸) در معادله‌ي (۴)، معادله‌ي (۹) براي محاسبه‌ي سرعت هواي عبوري از کانال بدست مي‌آيد:

$$v^2=\frac{g\beta^2 L\sin\theta(T_{out}-T_{in})T_{in}}{\frac{fL}{D_H}+\frac{2}{\beta T_{out}}} \tag{۹}$$

با استفاده از معادلات (۶) و (۹)، معادله‌ي (۱۰) براي محاسبه‌ي دبي جرمي بدست مي‌آيد:

$$\dot m^2=\frac{g\beta^2 L\sin\theta(A\rho)^2(T_{out}-T_{in})T_{in}}{\frac{fL}{D_H}+\frac{2}{\beta T_{out}}} \tag{۱۰}$$

گرماي جذب شده به‌وسيله هواي عبوري از کانال با استفاده از رابطه‌ي (۱۱) محاسبه مي‌شود:

$$Q_u=\dot m C_p(T_{out}-T_{in}) \tag{۱۱}$$

در اين رابطه C_p گرماي ويژه‌ي هوا است که برابر با $1000\ J/Kg\,K$ در نظر گرفته شده است. اگر عبارت $(T_{out}-T_{in})$ را از معادله‌ي (۱۱) بدست آورده و در معادله (۱۰) قرار دهيم، رابطه‌ي نهايي براي محاسبه‌ي دبي جرمي هواي داخل کانال بدست مي‌آيد:

$$\dot m=\left(\frac{g\beta^2 L\sin\theta(A\rho)^2 T_{in}Q_u}{C_p\left[\frac{fL}{D_H}+\frac{2}{\beta T_{out}}\right]}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{۱۲}$$

در صورتي که از اختلاف ارتفاع کانال‌هاي بالا و پايين چشم‌پوشي کنيم، از رابطه‌ي (۱۲) مي‌توان براي محاسبه‌ي دبي جرمي هر دو کانال استفاده نمود.

۲-۳- معادلات بقاي انرژي

براي نوشتن معادلات بقاي انرژي اجزاي مختلف سيستم، الماني ديفرانسيلي، به طول dx و عرض w و به فاصله‌ي x از طول ورودي در نظر مي‌گيريم. فرضيات مورد استفاده براي نوشتن معادلات انرژي عبارتند از: انتقال حرارت دائم و يک بعدي، صرف‌نظر کردن از گرماي ويژه‌ي همه‌ي اجزا به جز هواي داخل کانال‌ها، يکسان در نظر گرفتن ضريب انتقال حرارت جابجايي ميان هواي داخل کانال‌ها با پانل فتوولتائيک، جمع‌کننده حرارتي و جداره‌ي عايق و يکنواخت در نظر گرفتن دماي پانل فتوولتائيک، جمع‌کننده حرارتي، شيشه و جداره‌ي عايق. اکنون به ارائه‌ي روابط بقاي انرژي براي اجزاي مختلف

سيستم مي‌پردازيم. گفتني است كه در روابط ارائه شده، انديس‌هاي g ،pv ،TMS و b به ترتيب نشان‌دهنده‌ي شيشه، پانل فتوولتائيک، جمع‌كننده حرارتي و جداره‌ي عايق هستند. هواي عبوري از كانال‌هاي بالا و پايين نيز به ترتيب با انديس‌هاي $f1$ و $f2$ نشان داده شده‌اند. ضريب انتقال حرارت تشعشعي بين دو سطح ۱ و ۲ با $h_{r,1-2}$ و ضريب انتقال حرارت جابجايي با h_c نشان داده شده است.

- سرپوش شيشه‌اي

$$\alpha_g I_r wdx = (h_{r,pv-g} + h'_c)(T_g - T_{pv})wdx + (h_{r,g-a} + h_w)(T_g - T_a)wdx \quad (۱۳)$$

- پانل فتوولتائيک

$$\tau_g \alpha_{pv}(1-\eta_{el})I_r wdx = U_T(T_{pv} - T_a)wdx + h_c(T_{pv} - T_{f1})wdx + h_{r,pv-TMS}(T_{pv} - T_{TMS})wdx \quad (۱۴)$$

- هواي كانال بالا

$$\dot{m}_{f1} C_p dT_{f1} = h_c(T_{pv} - T_{f1})wdx + h_c(T_{TMS} - T_{f1})wdx \quad (۱۵)$$

- جمع‌كننده حرارتي

$$h_{r,pv-TMS}(T_{pv} - T_{TMS})wdx = h_c(T_{TMS} - T_{f1})wdx + h_c(T_{TMS} - T_{f2})wdx + h_{r,TMS-b}(T_{TMS} - T_b)wdx \quad (۱۶)$$

- هواي كانال پايين

$$\dot{m}_{f2} C_p dT_{f2} = h_c(T_{TMS} - T_{f2})wdx + h_c(T_b - T_{f2})wdx \quad (۱۷)$$

- جداره‌ي عايق

$$h_{r,TMS-b}(T_{TMS} - T_b)wdx = U_b(T_b - T_a)wdx + h_c(T_b - T_{f2})wdx \quad (۱۸)$$

براي حالت بدون سرپوش شيشه‌اي علاوه‌بر حذف شدن معادله‌ي (۱۳)، معادله‌ي (۱۴) نيز به صورت رابطه (۱۹) تغيير مي‌كند:

$$\alpha_{pv}(1-\eta_{el})I_r wdx = h_w(T_{pv} - T_a)wdx + h_c(T_{pv} - T_{f1})wdx + h_{r,pv-TMS}(T_{pv} - T_{TMS})wdx \quad (۱۹)$$

روابط مورد استفاده براي محاسبه‌ي راندمان حرارتي، راندمان الكتريكي و راندمان مجموع سيستم مورد بررسي عبارتند از:

$$\eta_{TH} = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{I_r A_{pv}} \quad (۲۰)$$

$$\eta_{el} = \eta_{ref}(1 - \beta_{ref}(T_{pv} - T_{ref})) \quad (۲۱)$$

$$\eta_{tot} = \eta_{th} + \eta_{el} \quad (۲۲)$$

در رابطه‌ي (۲۱) كه به‌وسيله فلورشيتز [۹] ارائه شده است، β_{ref} ضريب دمايي سلول خورشيدي و η_{ref} راندمان الكتريكي پانل در دماي مرجع T_{ref} است. براي سيستم فتوولتائيک/حرارتي مورد بررسي، η_{ref} با استفاده از نتايج آزمايشگاهي براي دماي مرجع ۲۵ درجه‌ي سانتي‌گراد براي حالت‌هاي با سرپوش شيشه‌اي و بدون آن به ترتيب برابر با ۰/۱۱۷ و ۰/۱۲۷ در نظر گرفته شده است. β_{ref} نيز براي هر دو حالت با سرپوش شيشه‌اي و بدون آن برابر با $0/006\ ^\circ C^{-1}$ است.

۲-۴- محاسبه‌ي ضرايب انتقال حرارت

۲-۴-۱ ضرايب انتقال حرارت جابجايي

ضريب انتقال حرارت جابجايي آزاد بين شيشه و سطح رويي پانل فتوولتائيک از رابطه‌ي (۲۳) محاسبه مي‌شود [۸]:

$$h'_c = \frac{k}{s\left\{\begin{matrix}1+1.44[1-R]^*(1-R(\sin 1.8\theta)^{1.6}) \\ +[0.66416R^{-1/3}-1]^*\end{matrix}\right\}} \quad (۲۳)$$

در رابطه‌ي فوق $R = 1708/Ra_s \cos\theta$ ،Ra_s عدد رايلي براي فاصله‌ي هوايي ميان شيشه و پانل فتوولتائيک، θ زاويه‌ي قرارگيري جمع‌كننده نسبت به افق (۳۰ درجه براي كرمان) و s فاصله هوايي بين شيشه و پانل فتوولتائيک است كه براي سيستم مورد بررسي برابر با ۲/۵ سانتي‌متر است. منظور از علامت * در رابطه، اين است كه اگر جمله‌هاي اشاره شده منفي شوند بايد با صفر جايگزين شوند. هم‌چنين همه خواص به كار گرفته شده در اين رابطه بايد در دماي ميانگين فاصله‌ي هوايي يعني $\frac{(T_{pv}+T_g)}{2}$ محاسبه شوند.

ضريب انتقال حرارت جابجايي شيشه با هواي آزاد براي حالت با شيشه و سطح رويي جمع‌كننده با هواي آزاد براي حالت بدون شيشه از رابطه‌ي (۲۴) محاسبه مي‌شود [۱۰]:

$$h_w = 2.8 + 3V_w \quad (۲۴)$$

V_w نشان دهنده‌ي سرعت باد است.

براي محاسبه‌ي ضريب انتقال حرارت جابجايي آزاد ميان هواي داخل كانال‌هاي بالا و پايين سيستم با پانل فتوولتائيک، جمع‌كننده حرارتي و جداره‌ي عايق از روابط (۲۵) و (۲۶) استفاده مي‌شود [۴]:

$$Nu = 0.68 + \frac{0.67\left[\left|Gr.Pr\right|\right]^{(1/4)}}{\left[1+\left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{(\frac{9}{16})}\right]^{(4/9)}} \quad (۲۵)$$

$$h_c = \frac{k.Nu}{D_H} \quad (۲۶)$$

۲-۴-۲ ضرايب انتقال حرارت تشعشعي

ضريب انتقال حرارت تشعشعي ميان آسمان و سرپوش شيشه‌اي براي حالت با سرپوش و سطح رويي پانل فتوولتائيک براي حالت بدون سرپوش از روابط (۲۷) و (۲۸) محاسبه مي‌شود [۱۰]:

$$h_{r,g-a} = \sigma\varepsilon_{pv}\frac{(T_g^4 - T_s^4)}{T_g - T_a} \quad (۲۷)$$

$$T_s = 0.0552T_a^{1.5} \quad (۲۸)$$

براي حالت بدون سرپوش شيشه‌اي بايد در رابطه‌ي (۲۷) به جاي T_g،عبارت T_{pv} را قرار داد. براي محاسبه‌ي ضريب انتقال حرارت تشعشعي ميان سطوح ۱ و ۲، رابطه‌ي (۲۹) مورد استفاده قرار مي‌گيرد [۱۰]:

$$h_{r,1-2} = \sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)^{-1} \quad (۲۹)$$

۳-۴-۲ ضرايب اتلاف حرارتي

ضريب اتلاف حرارت سطح پاييني بدنه به محيط اطراف از رابطه‌ي (۳۰) محاسبه مي‌شود:

$$U_b = \frac{k_{ins}}{\delta_{ins}} \quad (۳۰)$$

در رابطه‌ي فوق، k_{ins} و δ_{ins} به ترتيب نشان دهنده‌ي رسانايي حرارتي و ضخامت عايق هستند.

ضريب اتلاف حرارت پانل فتوولتائيک به محيط اطراف با استفاده از رابطه‌ي (۳۱) محاسبه مي‌شود [۱۰]:

$$U_T = \left[\frac{N}{(C/T_p)[(T_{pv} - T_a)/(N+f)]^e} + \frac{1}{h_w}\right]^{-1} + \left[\frac{(\varepsilon_{pv} + 0.00591N.h_w)^{-1} + [(2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_{pv})/\varepsilon_g] - N}{\sigma(T_{pv} + T_a)(T_{pv}^2 + T_a^2)}\right]^{-1} \quad (۳۱)$$

در رابطه‌ي فوق N نشان دهنده‌ي تعداد سرپوش‌هاي شيشه‌اي است که در بالاي پانل فتوولتائيک قرار داده مي‌شوند. عوامل c، e و f با استفاده از روابط (۳۲) تا (۳۴) محاسبه مي‌شوند:

$$c = 520(1 - 0.000051\beta^2) \quad 0° < \beta < 70° \qquad \beta = 70° \quad 70° < \beta < 90° \quad (۳۲)$$

$$e = 0.43(1 - \frac{100}{T_{pv}}) \quad (۳۳)$$

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w\varepsilon_{pv})(1 + 0.07866N) \quad (۳۴)$$

۳- آزمايش‌ها

اطلاعات آزمايشگاهي جمع‌آوري شده براي آزمايش جابجايي آزاد در حالت‌هاي با سرپوش شيشه‌اي و بدون آن در جدول‌هاي (۲) و (۳) آورده شده است. گفتني است که سرعت باد در محيط انجام آزمايش کم بوده و در محاسبات برابر با ۱ متر بر ثانيه در نظر گرفته شده است. عوامل اندازه‌گيري شده در طي آزمايش عبارتند از: شدت تابش خورشيدي، دماي محيط، دماي پانل فتوولتائيک، دماي جمع‌کننده حرارتي، دماي هواي خروجي از کانال‌هاي بالا و پايين و سرعت متوسط هواي عبوري از کانال‌هاي بالا و پايين. عوامل هر نيم ساعت يکبار ثبت شده‌اند.

۴- نتايج

براي اينکه بتوان نتايج مدل‌سازي را با نتايج آزمايشگاهي مقايسه نمود از شدت تابش خورشيدي و دماي محيط اندازه‌گيري شده در آزمايشگاه به عنوان ورودي برنامه نوشته شده براي شبيه‌سازي سيستم مورد بررسي استفاده شده است. عوامل ديگري که براي شبيه‌سازي سيستم مورد نياز هستند عبارتند از خواص تابشي (ضريب جذب، ضريب صدور و ضريب عبور) اجزاي مختلف سيستم که مقادير آن‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۲): اطلاعات آزمايشگاهي جمع‌آوري شده براي آزمايش جابجايي آزاد با سرپوش شيشه‌اي (انجام شده در ۸ مرداد ماه سال ۱۳۸۸)

سرعت متوسط هوا (m/s)		دماي هواي خروجي (°C)		دماي جمع‌كننده حرارتي (°C)	دماي پانل فتوولتائيک (°C)	دماي محيط (°C)	شدت تابش خورشيدي (W/m2)	زمان
کانال پايين	کانال بالا	کانال پايين	کانال بالا					
٠/١٥	٠/٣٢	٣٦	٣٧/٨	٤٣/٦	٥٧	٣٠/٢	٦٤١	١٠:٠٠
٠/٢٣	٠/٢٩	٣٧/٨	٤٠/٦	٤٦	٦٠/٣	٣١/٤	٧٢٧	١٠:٣٠
٠/١٦	٠/٢٩	٤٠/٥	٤٢/٥	٤٧/٥	٦٣/٤	٣٢	٧٩٢	١١:٠٠
٠/١١	٠/٣١	٤١	٤٣/٩	٤٩/٦	٦٧	٣٣/٢	٨١٦	١١:٣٠
٠/١٢	٠/٣٣	٤٢/٣	٤٥/٤	٥١/٢	٦٨/٧	٣٤/٣	٨٦٤	١٢:٠٠
٠/١٢	٠/٣٣	٤٢/٥	٤٥/٨	٥١/٩	٧٠/٦	٣٤/٦	٨٨٤	١٢:٣٠
٠/١٢	٠/٣٤	٤٢/٥	٤٦/٨	٥٢	٧٠/٨	٣٤/٨	٨٨٠	١٣:٠٠
٠/١٢	٠/٣٦	٤٢/٥	٤٨/٣	٥٤	٧٠/٢	٣٦/١	٨٧٠	١٣:٣٠
٠/١٢	٠/٣٢	٤٣/٥	٤٦/٨	٥٤/٥	٧١/١	٣٦	٨٤٦	١٤:٠٠
٠/١٣	٠/٣٢	٤٤/٧	٤٧/٣	٥٤/٤	٧٠/٨	٣٦/٥	٨٠٠	١٤:٣٠
٠/١٦	٠/٢٩	٤٤/١	٤٥/٨	٥٤/١	٦٨/٨	٣٥/٦	٧٢٥	١٥:٠٠

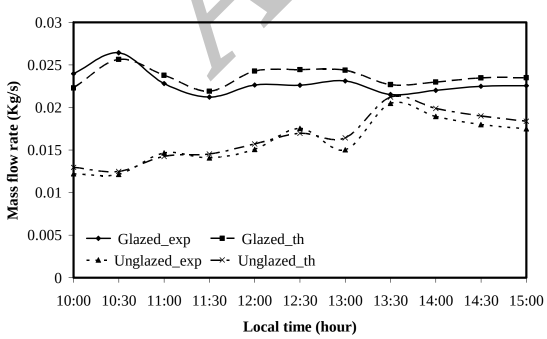
جدول (۳): اطلاعات آزمايشگاهي جمع‌آوري شده براي آزمايش جابجايي آزاد بدون سرپوش شيشه‌اي (انجام شده در۹ مرداد ماه سال ۱۳۸۸)

سرعت متوسط هوا (m/s)		دماي هواي خروجي (°C)		دماي جمع‌كننده حرارتي (°C)	دماي پانل فتوولتائيک (°C)	دماي محيط (°C)	شدت تابش خورشيدي (W/m^2)	زمان
کانال پايين	کانال بالا	کانال پايين	کانال بالا					
٠/٠٨	٠/١٦	٣٧/٧	٣٩/٣	٣٩	٤٨/٤	٣٠/٨	٦٥٠	١٠:٠٠
٠/١	٠/١٤	٣٩/٧	٤٠/٧	٤٣/٥	٥٣/٢	٣٢/٤	٧٣٢	١٠:٣٠
٠/١١	٠/١٨	٤٠/٣	٤١/٤	٤٤/٨	٥٤/٨	٣٢/٧	٧٩٩	١١:٠٠
٠/١	٠/١٨	٤٢/١	٤٣/٤	٤٨/٥	٥٩/١	٣٤/٧	٨٤٨	١١:٣٠
٠/١٢	٠/١٨	٤٢/٨	٤٣/٥	٤٩/١	٦٠/٥	٣٤/٧	٨٨٩	١٢:٠٠
٠/١٢	٠/٢٣	٤٣/٣	٤٤/٤	٤٩/٩	٦٠/٩	٣٥/٤	٨٩٩	١٢:٣٠
٠/١	٠/٢	٤٣/٩	٤٦/٣	٥٠/٣	٦١/١	٣٥/٨	٨٩٩	١٣:٠٠
٠/١٢	٠/٢٩	٤٤/١	٤٦/٨	٥٢/٦	٦٢/٥	٣٦/٦	٨٨٠	١٣:٣٠
٠/٠٩	٠/٢٩	٤٤/٤	٤٧/٥	٥٢/١	٦٢/٦	٣٧/٤	٨٤٨	١٤:٠٠
٠/١٢	٠/٢٤	٤٤/٥	٤٥/٦	٥١/٢	٦٠/٥	٣٦/٤	٧٩٤	١٤:٣٠
٠/١٢	٠/٢٣	٤٤/٣	٤٥/٣	٤٩/٨	٥٧/٥	٣٦/٣	٧٣١	١٥:٠٠

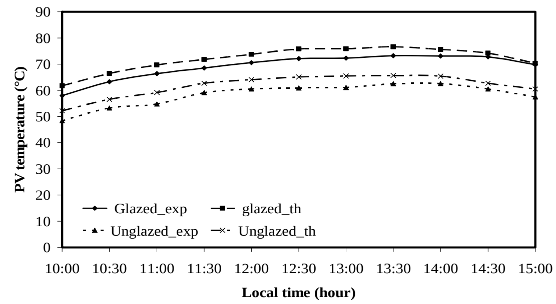
جدول (۴): خواص تابشي اجزاي مختلف سيستم مورد بررسي

ε_{TMS}	ε_{pv}	ε_b	ε_g	τ_g	α_{pv}	α_g
٠/٩	٠/٩	٠/٨	٠/٨٦	٠/٩٢	٠/٩	٠/٠٤

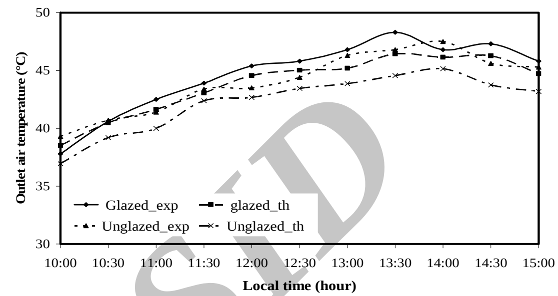
نحوه‌ي تغييرات دبي جرمي هواي عبوري از كانال‌هاي سيستم، دماي پانل فتوولتائيک و دماي هواي خروجي از كانال‌هاي بالا و پايين سيستم مورد بررسي در طول روز براي حالت‌هاي با سرپوش شيشه‌اي و بدون آن به ترتيب در شكل‌هاي (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است. همان‌طوري كه ديده مي‌شود نتايج بدست آمده از شبيه‌سازي هم‌خواني خوبي با نتايج آزمايشگاهي دارند. همچنين نتايج نشان مي‌دهند كه دبي جرمي هوا، دماي پانل فتوولتائيک و دماي هواي خروجي از كانال‌هاي سيستم مورد بررسي در حالت با سرپوش شيشه‌اي بيشتر از حالت بدون سرپوش شيشه‌اي است.



شكل (۴): دبي جرمي هواي عبوري از كانال‌هاي سيستم براي زمان‌هاي مختلف روز



شکل (۵): دماي پانل فتوولتائيک براي زمان‌هاي مختلف روز



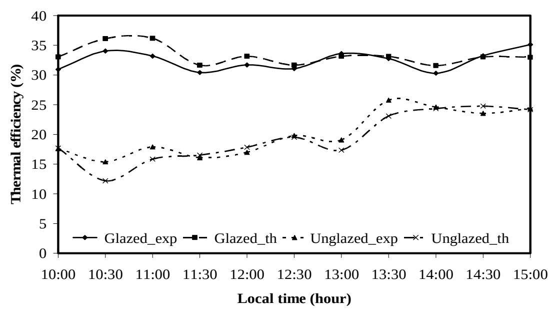
شکل (۶): دماي هواي خروجي از کانال براي زمان‌هاي مختلف روز

قرار دادن سرپوش شيشه‌اي سبب قطع تماس پانل فتوولتائيک با محيط اطراف و در نتيجه افزايش دماي پانل مي‌شود. در اثر افزايش دماي پانل دماي هواي خروجي از کانال‌ها و در نتيجه دبي جرمي هوا افزايش مي‌يابد.

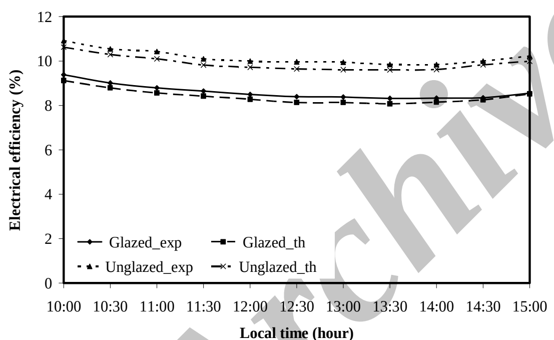
نحوه‌ي تغيير راندمان حرارتي، راندمان الکتريکي و راندمان مجموع سيستم فتوولتائيک/حرارتي مورد بررسي در طول روز براي حالت‌هاي با سرپوش شيشه‌اي و بدون آن به ترتيب در شکل‌هاي (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است. شکل‌هاي ارائه شده نشان مي‌دهند که نتايج تئوري و آزمايشگاهي هم‌خواني خوبي با هم دارند. هم‌چنين در شکل‌هاي (۷) و (۹) ديده مي‌شود که در بعد از ظهر با افزايش شدت تابش خورشيد و دماي محيط، راندمان حرارتي و در نتيجه راندمان مجموع سيستم بدون سرپوش شيشه‌اي افزايش چشم‌گيري داشته در حالي که در سيستم با سرپوش شيشه‌اي، به علت کمتر بودن ميزان افزايش شدت تابش خورشيدي و دماي محيط، تغيير چندان قابل توجه نيست.

همان‌طوري که اشاره شد دبي جرمي و دماي خروجي هواي عبوري از کانال‌هاي سيستم مورد بررسي در حالت با سرپوش شيشه‌اي بيشتر از حالت بدون سرپوش شيشه‌اي است. بنابراين با توجه به رابطه‌ي ارائه شده براي محاسبه‌ي راندمان حرارتي مي‌توان نتيجه گرفت که راندمان حرارتي حالت با سرپوش شيشه‌اي بيشتر از حالت بدون سرپوش است. هم‌چنين همان‌طوري که در مقدمه اشاره شد افزايش دماي پانل فتوولتائيک باعث کاهش راندمان الکتريکي آن مي‌شود. قرار دادن سرپوش شيشه‌اي علاوه‌بر افزايش دماي پانل فتوولتائيک، به دليل انعکاس بخشي از تابش ورودي باعث کاهش بيشتر راندمان الکتريکي مي‌شود. بنابراين فقط در کاربردهايي که راندمان حرارتي اولويت بيشتري نسبت به راندمان الکتريکي دارد، قرار دادن سرپوش شيشه‌اي مناسب است.

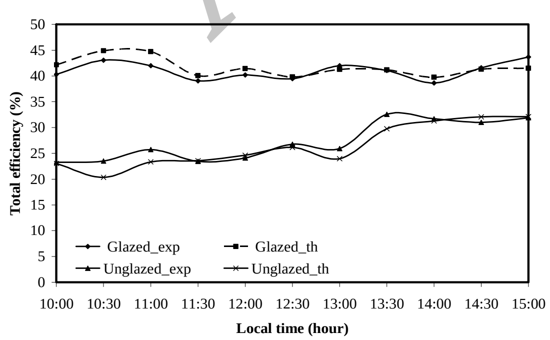
در پايان گفتني است، محاسبات نشان مي‌دهند که ميزان خطاي نسبي بين نتايج بدست آمده شبيه‌سازي و نتايج آزمايشگاهي براي همه عوامل مورد بررسي در هر دو حالت با سرپوش شيشه‌اي و بدون سرپوش کمتر از ۷ درصد است که مقدار قابل قبولي است.



شکل (۷): راندمان حرارتي سيستم مورد بررسي براي زمان‌هاي مختلف روز



شکل (۸): راندمان الکتريکي سيستم مورد بررسي براي زمان‌هاي مختلف روز



شکل (۹): راندمان مجموع سيستم مورد بررسي براي زمان‌هاي مختلف روز

۵- نتيجه

قرار دادن سرپوش شيشه‌اي باعث افزايش دبي جرمي هوا و راندمان حرارتي و كاهش راندمان الكتريكي اين سيستم‌ها مي‌شود. بنابراين فقط در كاربردهايي كه راندمان حرارتي اولويت بيشتري در مقايسه با راندمان الكتريكي دارد قرار دادن سرپوش شيشه‌اي مناسب است. محاسبات نشان مي‌دهند راندمان مجموع تئوري و آزمايشگاهي سيستم‌هاي فتوولتائيک/حرارتي هوايي براي هر دو حالت بيشتر از راندمان ۵ الي ۲۰ درصدي سيستم‌هاي فتوولتائيک است.

٦- تقدير و تشكر

این پژوهش در پژوهشکده‌ي انرژي و محيط زيست دانشگاه شهيد باهنر کرمان صورت انجام شده است که از اين مرکز تشکر مي‌گردد.

۷- فهرست علائم

مساحت مقطع كانال، m^2	A
قطر هيدروليكي، m	D_H
ضريب اصطكاک	f
عدد گراشف	Gr
ضريب انتقال حرارت جابجايي، $W/m^2\,K$	h_c
ضريب انتقال حرارت تشعشعي، $W/m^2\,K$	h_r
شدت تابش ورودي، W/m^2	I_r
رسانايي حرارتي، W/m K	k
طول سيستم، m	L
دبي جرمي، Kg/s	$\dot{m}$
عدد ناسلت	Nu
فشار، Pa	p
عدد پرانتل	Pr
دماي مطلق، K	T
ضريب اتلاف حرارتي، $W/m^2\,K$	U
پهناي كانال، m	w
علائم يوناني	
ضريب جذب	α
ضريب دمايي سلول فتوولتائيک	β_{ref}
ضخامت عايق، m	δ
ضريب صدور	ε
راندمان الكتريكي پانل فتوولتائيک در دماي مرجع	η_{ref}
راندمان الكتريكي پانل فتوولتائيک در دماي پانل	η_{el}
راندمان حرارتي سيستم فتوولتائيک/حرارتي	η_{th}
راندمان مجموع سيستم فتوولتائيک/حرارتي	η_{tot}
ثابت استفان-بولتزمان، $W/m^2\,K^4$ $۵/۶۷\times ۱۰^{-۸}$	σ
ضريب عبور	τ
زيرنويس	
جداره‌ي عايق	b
سيال كانال بالا	$f1$
سيال كانال پايين	$f2$
شيشه	g
پانل فتوولتائيک	pv
جمع‌كننده حرارتي	TMS

۸- مراجع

[۱] 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.

[۲] 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.

[۳] 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.

[۴] 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.

[۵] 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.

[۶] Joshi, A.; Tiwari, A.; “Energy and exergy Efficiencies of a hybrid Photovoltaic-Thermal Air Collectors”, Renewable Energy 2007, 32, p. 2223-2241.

[۷] Hegazy, A.; “Comparative study of the performance of four photovoltaic/thermal solar air collectors”, Energy Conversion & Management 2000, 41, p. 861-881.

[۸] Ibarahim, 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.

[۹] 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.

[۱۰] Duffie, J.A.; Beckman, W.A.; Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1991.

۹- زیر نویس ها

[1] Hot Wire
[2] Kipp & Zonen