شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتاییک / حرارتی در حالت جابجایی آزاد

امین شهسوار*[۱]، مهران عامری[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۸۸/۶/۴
تاریخ پذیرش مقاله:
۸۸/۸/۲

چکیده:

در این مقاله شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی در حالت جابجایی آزاد برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون آن ارائه شده و نتایج حاصل با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی و مقادیر آزمایشگاهی هم‌خوانی بسیار خوبی دارد. اثرات قرار دادن سرپوش شیشه‌ای بر روی پارامترهای مختلف سیستم نیز بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که قرار دادن سرپوش شیشه‌ای در سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی (PV/T) منجر به افزایش راندمان حرارتی و کاهش راندمان الکتریکی این سیستم‌ها می‌شود.

کلمات کلیدی:
جابجایی آزاد، شبیه‌سازی، فتوولتایی، فتوولتاییک/ حرارتی

۱) دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مهندسی مکانیک (نویسندهٔ مسئول) amin.shahsavar@yahoo.com
۲) دانشگاه شهید باهنر کرمان، پژوهشکده انرژی و محیط زیست ameri_mm@mail.uk.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

مقدمه

امروزه بر اثر افزایش بهای سوخت‌های فسیلی و محدودیت منابع و از طرف دیگر مشکلات زیست محیطی و تغییرات اقلیمی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه بیشتری 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 فتوولتایی است. سیستم‌های فتوولتایی توانایی تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته را با راندمانی در حدود ۵ الی ۲۰ درصد داراست. یعنی پانل فتوولتایی بخش کمی از تشعشع جذب شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و بقیه 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 فتوولتایی، به واسطه انتقال حرارت جابجایی، می‌توان بخش زیادی از این حرارت را از پانل جذب کرده و دمای سطح پانل فتوولتایی را کاهش و در نتیجه راندمان الکتریکی را افزایش داد. دمای سیال عبوری از روی پانل در اثر جذب حرارت افزایش می‌یابد و در نتیجه می‌توان از آن جهت مصارف مختلف از جمله خشک‌کن خورشیدی و تهویه مطبوع استفاده کرد. تمامی این فرآیندها را می‌توان در یک مجموعه جای داد که این مجموعه را سیستم فتوولتایی/حرارتی خورشیدی می‌نامند. در این فن‌آوری، خنک‌کاری پانل فتوولتایی و افزایش راندمان با یکدیگر مقارن شده است. استفاده از آب و هوا برای خنک‌کاری پانل‌های فتوولتایی رایج است. سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی مورد توجه بسیاری قرار گرفته و در نتیجه توسط محققین بسیاری هم از لحاظ نظری و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. در سال ۱۹۷۸ کرن و راسل اولین کسانی بودند که با استفاده از نتایج آزمایشگاهی مفهوم اصلی سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی را که توسط دو سیال عامل آب و هوا عمل می‌کرد، ارائه نمودند [۶]. پراکاش با تحقیق بر روی سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی با سیال عامل هوا و آب به این نتیجه رسید که راندمان این سیستم‌ها با سیال عامل آب بیشتر از هوا است، زیرا که خواص ترموفیزیکی آب از هوا بیشتر است. ولی استفاده از هوا به دلیل هزینه‌های ساختاری کمتر رایج‌تر است [۳]. سوپیان و همکارانش با انجام آنالیز حرارتی بر روی سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی هوایی از نوع تک کانالی و دو کانالی نشان دادند که سیستم با آرایش دو کانالی مشخصه‌های بهتری نسبت به نوع تک کانالی داراست [۸]. بازیلیان و پراساد یک مدل عددی برای سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی در حالت جابجایی آزاد ارائه کردند [۱]. تونی و تریپاناگنوستوپولوس، اصلاحاتی بر روی سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی انجام دادند و آن را به دو صورت انتقال حرارت اجباری و آزاد مورد بررسی قرار دادند [۷]. در سال ۲۰۰۷، جوشی و تیواری، راندمان سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی را به دو صورت انرژی و اگزرژی مورد بررسی قرار دادند. آنان راندمان انرژی را حدود ۵۵ الی ۵۶ درصد و راندمان اگزرژی را حدود ۱۲ الی ۱۵ درصد بیان کردند [۵].

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در این مقاله یک سیستم فتوولتایی/حرارتی هوایی دو کانالی در حالت جابجایی آزاد برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون سرپوش شیشه‌ای شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شده است.

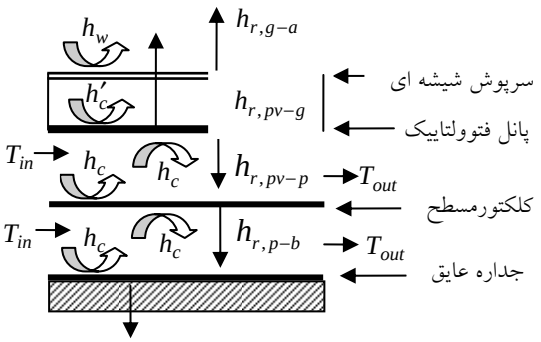
مدل‌سازی

نمونه‌ای از سیستم‌های فتوولتایی/ حرارتی مطابق شکل (۱) در دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان ساخته شده و در محیط آزاد مورد آزمایش قرار گرفته است. ابعاد این سیستم برابر با ۳۵×۵۴×۱۹۶ سانتی‌متر است. اجزای مختلف سیستم و کلیه ضرایب انتقال حرارت در مقطع عرضی ارائه شده در شکل (۲) نشان داده شده است. در این مجموعه از دو پانل فتوولتایی نوع سیلیکونی پلی‌کریستالی که هر کدام توان اسمی برابر با ۴۵ وات را داراست، استفاده 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 توسط کلکتور حرارتی جذب می‌شود. عبور سیال از میان پانل فتوولتایی و کلکتور از بالا رفتن دمای پانل‌ها جلوگیری کرده و باعث افزایش راندمان الکتریکی پانل‌ها می‌شود. دمای هوای عبوری از کانال‌های سیستم بر اثر جذب حرارت پانل فتوولتایی و کلکتور حرارتی، به واسطه انتقال حرارت جابجایی، افزایش می‌یابد. افزایش دمای هوا به افزایش راندمان حرارتی منجر می‌شود. پس با این نحوه طراحی می‌توان انرژی بر واحد سطح بیشتری به دست آورد. نحوه جریان یافتن هوا در داخل کانال‌ها را می‌توان به این صورت شرح داد که هوای محیط اطراف که وارد کانال‌های سیستم شده است، بر اثر دریافت حرارت از پانل فتوولتایی و کلکتور حرارتی دچار افزایش دما و در نتیجه کاهش چگالی می‌شود. بر اثر کاهش چگالی، هوا در داخل کانال‌ها به سمت بالا حرکت کرده و هوای محیط که چگالی بیشتری دارد، جایگزین آن در ابتدای کانال می‌شود. هوای عبوری از کانال بالای سیستم با جذب حرارت پانل فتوولتایی موجب کاهش دما و در نتیجه افزایش راندمان الکتریکی پانل‌ها می‌شود.



شکل ۱ : دستگاه ساخته شده در دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

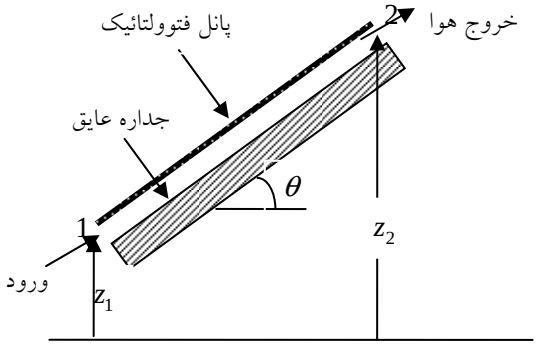


شکل ۲ : اجزای مختلف سیستم مورد بررسی و ضرایب انتقال حرارت

محاسبه دبی جرمی

برای به دست آوردن رابطه‌ای جهت محاسبه دبی جرمی برای حالت جابجایی آزاد، با توجه به شکل (۳)، معادلـه برنـولی برای نقاط ۱و ۲ یعنی به ترتیب ورودی و خروجی هوا به داخل کانال به شکل زیر نوشته می‌شود. در این رابطه ρ_1 ، ρ و ρ_2 به ترتیب عبارت است از چگالی هوای ورودی، چگالی هوای خروجی و چگالی متوسط هوا در حالی v_1 ، v_2 و v بـه ترتیب عبارتست از: سرعت هوای ورودی، سرعت هوای خروجی و سرعت متوسط هوا در داخل کانال. k_1 ضـریب اتـلاف جزئی ناشی از ورود هوا به داخل کانال بوده و برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود در حـالی کـه k_2 ضـریب اتـلاف جزئـی ناشی از خروج هوا از کانال است و برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. k_3 نیز ضریب اتلاف جزئی ناشی از سایر عوامل بوده و برابر با ۲/۲ در نظر گرفته شده است [۱].

$$p_1+\frac{\rho_1 v_1^2}{2}+\rho_1 g z_1-\frac{fL}{D_H}\frac{\rho v^2}{2}-k_1\frac{\rho_1 v_1^2}{2}-k_3\frac{\rho v^2}{2}=p_2+\frac{\rho_2 v_2^2}{2}+\rho_2 g z_2+k_2\frac{\rho_2 v_2^2}{2} \qquad (۱)$$



شکل ۳ : مقطع عرضی سیستم فتوولتایی/حرارتی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در رابطه فوق D_H نشان دهنده قطر هیدرولیکی است و با استفاده از رابطه $D_H = \frac{4A}{p}$ محاسبه می‌شود. در این رابطه A سطح مقطع کانال و p محیط کانال را نشان می‌دهند. همچنین در رابطه فوق f ضریب اصطکاک بوده و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$f = 1.906(Gr / \Pr)^{1/12} \quad (۲)$$

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu} \quad (۳)$$

برای ساده‌تر شدن معادله (۱)، تعدادی فرض ساده کننده در نظر گرفته می‌شود که عبارتست از :

۱- با توجه به این نکته که نقاط ۱ و ۲ هر دو با هوای محیط در ارتباط است، می توان 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 صرف‌نظر کرد یعنی می‌توان فرض کرد: $v_1 = 0$

با در نظر گرفتن فرضیات فوق معادله زیر به دست می‌آید:

$$\rho_1 g z_1 - \rho_2 g z_2 = \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + \frac{fL}{D_H}\frac{\rho v^2}{2} + k_3 \frac{\rho v^2}{2} + k_2 \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \quad (۴)$$

معادله بقای جرم و رابطه میان چگالی هوا و دمای آن به ترتیب عبارتست از:

$$\dot{m} = \rho A_{ch} v = \rho_2 A_2 v_2 \quad (۵)$$

$$\rho_T = \rho \beta T \quad (۶)$$

در رابطه فوق ρ_T چگالی هوا در دمای مفروض T است. β ضریب انبساط حرارتی هوا بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad \wp \quad T_f = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (۷)$$

با بکارگیری معادلات (۵)، (۶) و (۷) در معادله (۴)، معادله زیر برای محاسبه سرعت هوای عبوری از کانال حاصل می‌شود:

$$v^2 = 2 g \beta L \sin\theta (T_{out} - T_{in}) \left[2.2 + \frac{fL}{D_H} = 2\beta T_{out} \left(\frac{A_{ch}}{A_2} \right)^2 \right]^{-1} \quad (۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

با استفاده از معادلات (۵) و (۸)، معادله زیر برای محاسبه دبی جرمی بدست می‌آید:

$$\dot{m}^2 = 2g\beta L\sin\theta(A_{ch}\rho)^2(T_{out}-T_{in})\left[2.2+\frac{fL}{D_H}+2\beta T_{out}\left(\frac{A_{ch}}{A_2}\right)^2\right]^{-1} \quad (۹)$$

گرمای جذب شده توسط هوای عبوری از کانال با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_{out}-T_{in}) = \eta_{th}A_{pv}I_r \quad (۱۰)$$

در این رابطه I_r شدت تابش برخوردی به پانل‌های فتوولتایی، A_{pv} مساحت پانل‌ها و η_{th} راندمان حرارتی سیستم را نشان می‌دهد. C_p نیز گرمای ویژه هوا است که برابر با $JKg^{-1}K^{-1}$ ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. در صورتی که عبارت $(T_{out}-T_{in})$ را از معادله (۱۰) بدست آورده و در معادله (۹) قرار دهیم، رابطه نهایی برای محاسبه دبی جرمی هوای داخل کانال به دست می‌آید:

$$\dot{m} = \left(\frac{2g\beta(A_{ch}\rho)^2A_{pv}\eta_{th}I_rL\sin\theta}{C_p(2.2+fL/D_h+2\beta T_{out}(A_{ch}/A_2)^2)}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (۱۱)$$

در صورتی که از اختلاف ارتفاع کانال‌های بالا و پایین صرفنظر کنیم، از رابطه (۱۱) برای محاسبه دبی جرمی هر دو کانال می‌توان استفاده کرد.

معادلات بقای انرژی

برای نوشتن معادلات بقای انرژی اجزای مختلف سیستم، المانی دیفرانسیلی به طول dx و به عرض w و به فاصله x از طول ورودی در نظر می‌گیریم. فرضیات مورد استفاده برای نوشتن معادلات انرژی عبارتست از: انتقال حرارت غیر دائم و یک بعدی، صرف‌نظر کردن از گرمای ویژه همه اجزا به جز هوای داخل کانال‌ها، یکسان در نظر گرفتن ضریب انتقال حرارت جابجایی میان هوای داخل کانال‌ها با پانل فتوولتایی، کلکتور حرارتی و جداره عایق و در نهایت یکنواخت در نظر گرفتن دمای پانل فتوولتایی، کلکتور حرارتی، شیشه و جداره عایق. با در نظر گرفتن فرضیات فوق اکنون به ارائه روابط بقای انرژی برای اجزای مختلف سیستم می‌پردازیم. گفتنی است که در روابط ارائه شده اندیس‌ها g، pv، p و b به ترتیب نشان‌دهندهٔ شیشه، پانل فتوولتایی، کلکتور حرارتی و جداره عایق است. هوای عبوری از کانال‌های بالا و پایین نیز به ترتیب با اندیس‌های $f1$ و $f2$ نشان داده شده است. 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

سرپوش شیشه‌ای

$$\alpha_g I_r w dx = (h_{r,pv-g} + h_c')(T_g - T_{pv}) w dx + (h_{r,g-a} + h_w)(T_g - T_a) w dx \quad (۱۲)$$

پانل فتوولتایی

$$\tau_g \alpha_{pv}(1-\eta_{el}) I_r w dx = U_T (T_{pv} - T_a) w dx + h_c (T_{pv} - T_{f1}) w dx + h_{r,pv-p}(T_{pv} - T_p) w dx \quad (۱۳)$$

سیال کانال بالا

$$\dot{m}_{f1} C_p dT_{f1} = h_c (T_{pv} - T_{f1}) w dx + h_c (T_p - T_{f1}) w dx \quad (۱۴)$$

کلکتور حرارتی

$$h_{r,pv-p}(T_{pv} - T_p) w dx = h_c (T_p - T_{f1}) w dx + h_c (T_p - T_{f2}) w dx + h_{r,p-p}(T_p - T_b) w dx \quad (۱۵)$$

سیال کانال پایین

$$\dot{m}_{f2} C_p dT_{f2} = h_c (T_p - T_{f2}) w dx + h_c (T_b - T_{f2}) w dx \quad (۱۶)$$

جداره عایق

$$h_{r,p-b}(T_p - T_b) w dx = U_b (T_b - T_a) w dx + h_c (T_b - T_{f2}) w dx \quad (۱۷)$$

برای حالت بدون سرپوش شیشه‌ای علاوه‌بر حذف شدن معادله (۱۲)، معادله (۱۳) نیز به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$\alpha_{pv}(1-\eta_{el}) I_r w dx = h_w (T_{pv} - T_a) w dx + h_c (T_{pv} - T_{f1}) w dx + h_{r,pv-p}(T_{pv} - T_p) w dx \quad (۱۸)$$

روابط مورد استفاده برای محاسبه راندمان حرارتی و راندمان الکتریکی سیستم عبارتست از:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{f1} c_p (T_{out} - T_{in})_{f1}}{I_r A} + \frac{\dot{m}_{f2} c_p (T_{out} - T_{in})_{f2}}{I_r A} \quad (۱۹)$$

$$\eta_{el} = \eta_{ref} (1 - \beta_{ref} (T_{pv} - T_{ref})) \quad (۲۰)$$

$$\eta_{tot} = \eta_{th} + \eta_{el} \quad (۲۱)$$

در رابطه (۲۰)، β_{ref} ضریب دمایی سلول خورشیدی و η_{ref} راندمان الکتریکی پانل در دمای مرجع T_{ref} است. برای سیستم فتوولتایی/حرارتی مورد بررسی، η_{ref} با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای دمای مرجع ۲۵ سانتی‌گراد برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون آن به ترتیب برابر با ۰/۱۱۷ و ۰/۱۲۷ در نظر گرفته شده است. β_{ref} نیز برای هر دو حالت با سرپوش و بدون سرپوش برابر با ۰/۰۰۶ $^{\circ}C^{-1}$ در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

معادلات ارائه شده بیانگر این واقعیت است که معادلات انرژی و معادله (۱۱) وابسته بوده و در نتیجه برای شبیه‌سازی سیستم مورد بررسی باید دستگاه معادلات وابسته حاصل با استفاده از روش‌های عددی حل شود.

محاسبه ضرایب انتقال حرارت

ضرایب انتقال حرات جابجایی

ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد میان شیشه و سطح رویی پانل فتوولتایی از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$h'_c = \frac{k}{s\left\{1+1.44[1-R]^*(1-R(\sin 1.8\theta)^{1.6})+[0.66416R^{-1/3}-1]^*\right\}} \qquad (۲۲)$$

در رابطه فوق $R = 1708/Ra_s\cos\theta$ ، Ra_s عدد رایلی برای فاصله هوایی میان شیشه و پانل فتوولتایی، θ زاویه قرارگیری کلکتور نسبت به افق (برای کرمان $30°$) و s فاصله هوایی میان شیشه و پانل فتوولتایی است که برای سیستم مورد بررسی برابر با ۲۵ میلی‌متر است. منظور از علامت * در این رابطه این است که اگر ترم‌های مزبور منفی شود باید با صفر جایگزین شود. در ضمن کلیه خواص به کار گرفته شده در این رابطه باید در دمای میانگین فاصله هوایی یعنی $\frac{(T_{pv}+T_g)}{2}$ محاسبه شود.

ضریب انتقال حرارت جابجایی شیشه با هوای آزاد برای حالت با شیشه و سطح رویی کلکتور با هوای آزاد برای حالت بدون شیشه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$h_w = 2.8+3V_w \qquad (۲۳)$$

در رابطه فوق V_w نشان دهنده سرعت باد است.

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد میان هوای داخل کانال‌های بالا و پایین سیستم با پانل فتوولتایی، کلکتور حرارتی و جداره عایق از روابط زیر استفاده می‌شود [۱] :

$$Nu = 0.68+\frac{0.67\left[|Gr.\Pr|\right]^{(1/4)}}{\left[1+\left(\frac{0.492}{\Pr}\right)^{(\frac{9}{16})}\right]^{(4/9)}} \qquad (۲۴)$$

$$h_c = \frac{kNu}{D_H} \qquad (۲۵)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

ضرایب انتقال حرارت تشعشعی

ضریب انتقال حرات تشعشعی میان آسمان و سرپوش شیشه‌ای برای حالت با سرپوش و سطح رویی پانل فتوولتایی برای حالت بدون سرپوش از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$h_{r,g-a} = \sigma \varepsilon_{pv} \frac{(T_g^4 - T_s^4)}{T_g - T_a} \quad (۲۶)$$

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (۲۷)$$

برای حالت بدون سرپوش شیشه‌ای باید در رابطه (۲۶) به جای T_g، T_{pv} قرار داد. برای محاسبه ضریب انتقال حرارت تشعشعی میان سطوح ۱ و ۲، رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲]:

$$h_{r,1-2} = \sigma (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)^{-1} \quad (۲۸)$$

ضرایب اتلاف حرارتی

ضریب اتلاف حرارت سطح پایینی بدنه به محیط اطراف از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$U_b = \frac{k_{ins}}{\delta_{ins}} \quad (۲۹)$$

در رابطه فوق، k_{ins} و β_{ins} به ترتیب نشان دهنده رسانایی حرارتی و ضخامت عایق است.

ضریب اتلاف حرارت پانل فتوولتایی به محیط اطراف با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$U_T = \left[\frac{N}{(C/T_p)[(T_p - T_a)/(N+f)]^e} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \left[\frac{(\varepsilon_p + 0.00591 N h_w)^{-1} + [(2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p)/\varepsilon_g] - N}{\sigma (T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)} \right]^{-1} \quad (۳۰)$$

در رابطه فوق، پارامترهای c، e و f با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$c = 520(1 - 0.000051\beta^2) \quad for \quad 0° < \beta < 70° \; \beta = 70° \quad if \quad 70° < \beta < 90° \quad (۳۱)$$

$$e = 0.43\left(1 - \frac{100}{T_p}\right) \quad (۳۲)$$

$$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \varepsilon_p)(1 + 0.07866 N) \quad (۳۳)$$

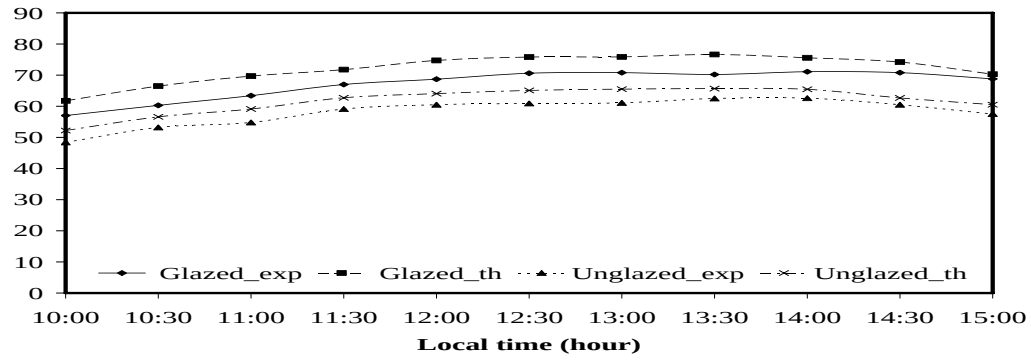
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

علاوه‌بر این در رابطه فوق N نشان دهنده تعداد سرپوش‌های شیشه‌ای است که در بالای پانل فتوولتایی قرار داده می‌شود.

نتایج مدل‌سازی

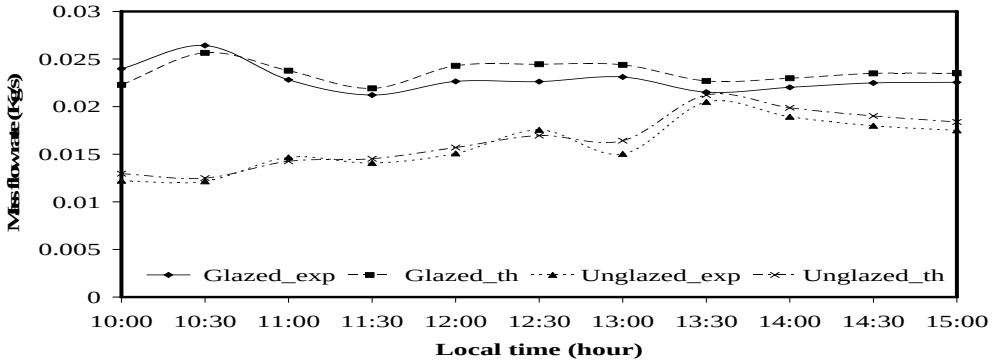
برای اینکه بتوان نتایج مدل‌سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرد از شدت تابش، دمای محیط و سرعت باد اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه استفاده شده است. شکل‌های ارائه شده در این بخش به خوبی نشان می‌دهند که نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای حالت‌های با سرپوش شیشه‌ای و بدون آن انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

قرار دادن سرپوش شیشه‌ای منجر به قطع تماس پانل فتوولتایی با محیط اطراف و در نتیجه افزایش دمای پانل می‌شود. در اثر افزایش دمای پانل، به علت بیشتر شدن انتقال حرارت جابجایی، دمای هوای خروجی از کانال‌ها و در نتیجه دبی جرمی هوا افزایش می‌یابد. با توجه به رابطه ارائه شده برای محاسبه راندمان حرارتی، می‌توان نتیجه گرفت راندمان حرارتی حالت با سرپوش شیشه‌ای بیشتر از حالت بدون سرپوش است. علاوه بر این، همانطور که در مقدمه اشاره شد افزایش دمای پانل فتوولتایی منجر به کاهش راندمان الکتریکی آن می‌شود. قرار دادن سرپوش شیشه‌ای علاوه‌بر افزایش دمای پانل فتوولتایی، به واسطه انعکاس بخشی از تابش ورودی موجب کاهش بیشتر راندمان الکتریکی می‌شود. بنابراین تنها در کاربردهایی که راندمان حرارتی اولویت بیشتری در مقایسه با راندمان الکتریکی دارد، قرار دادن سرپوش شیشه‌ای مناسب است. بیشتر بودن دمای پانل فتوولتایی، دبی جرمی و راندمان حرارتی سیستم فتوولتایی/حرارتی مورد بررسی برای حالت با سرپوش شیشه‌ای در مقایسه با حالت بدون سرپوش را می‌توان به ترتیب در شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) مشاهده کرد. در شکل (۷) نیز مشاهده می‌شود که راندمان الکتریکی حالت بدون سرپوش بیشتر از حالت با سرپوش شیشه‌ای است. همچنین در شکل (۸) مشاهده می‌شود که راندمان مجموع سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی برای حالت با سرپوش شیشه‌ای بسیار بیشتر از حالت بدون سرپوش شیشه‌ای است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش راندمان الکتریکی در اثر قرار دادن سرپوش شیشه‌ای در مقایسه با افزایش راندمان حرارتی ناچیز است.

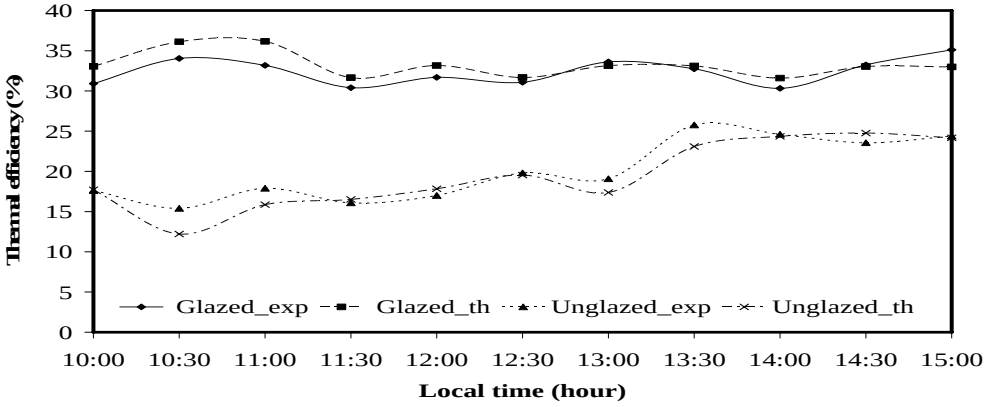


شکل ۴ : دمای پانل فتوولتاییک برای زمان‌های مختلف روز

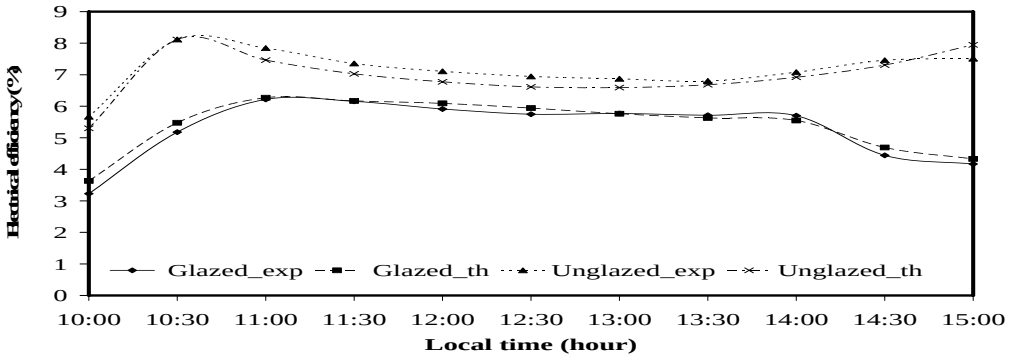
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۵ : دبی جرمی هوا برای زمان‌های مختلف روز

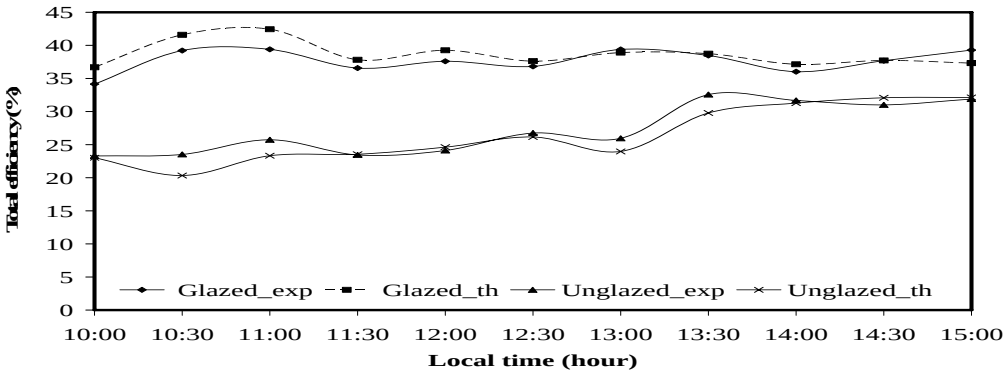


شکل ۶ : راندمان حرارتی برای زمان‌های مختلف روز



شکل ۷ : راندمان الکتریکی برای زمان‌های مختلف روز

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل ۸ : راندمان مجموع برای زمان‌های مختلف روز

نتیجه‌گیری

نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که شبیه‌سازی سیستم‌های فتوولتایی/حرارتی و نتایج آزمایش هم‌خوانی بسیار خوبی دارد. به علاوه قرار دادن سرپوش شیشه‌ای منجر به افزایش دبی جرمی هوا و راندمان حرارتی و کاهش راندمان الکتریکی این سیستم‌ها می‌شود. بنابراین، تنها در کاربردهایی که راندمان حرارتی دارای اولویت بیشتری در مقایسه با راندمان الکتریکی است قرار دادن سرپوش شیشه‌ای مناسب است. محاسبه نشان می‌دهد راندمان مجموع (الکتریکی+حرارتی) تئوری و آزمایشگاهی سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی هوایی برای هر دو حالت با شیشه و بدون شیشه بسیار بیشتر از راندمان ۵ الی ۲۰ درصدی سیستم‌های فتوولتایی است.

فهرست علائم

A	مساحت مقطع کانال، m^2
D_H	قطر هیدرولیکی، m
f	ضریب اصطکاک
Gr	عدد گراشف
h_c	ضریب انتقال حرارت جابجایی، $WK^{-1}m^{-2}$
h_r	ضریب انتقال حرارت تشعشعی، $WK^{-1}m^{-2}$
I_r	شدت تابش ورودی، Wm^{-2}
k	رسانایی حرارتی، $Wm^{-1}K^{-1}$
L	طول سیستم، m
$\dot{m}$	دبی جرمی، Kg/s
Nu	عدد ناسلت
p	فشار، Pa
Pr	عدد پرانتل
T	دمای مطلق، K

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

U	ضریب اتلاف حرارتی، $WK^{-1}m^{-2}$
w	پهنای کانال، m
	علائم یونانی
α	ضریب جذب
β_{ref}	ضریب دمایی سلول‌های فتوولتایی
δ	ضخامت عایق
η_{ref}	راندمان الکتریکی پانل فتوولتایی در دمای مرجع
η_{el}	راندمان الکتریکی پانل فتوولتایی در دمای پانل
η_{th}	راندمان حرارتی سیستم فتوولتایی/حرارتی
σ	ثابت اشتفان- بولتسمان، $5.67\times10^{-8}\ Wm^{-2}K^{-4}$
τ	ضریب عبور
	زیرنویس
b	جداره عایق
$f1$	سیال کانال بالا
$f2$	سیال کانال پایین
g	شیشه
p	کلکتور حرارتی
pv	پانل فتوولتاییک

منابع

[1] Bazilian, M, Prasad, D., 2002. "Modelling of a Photovoltaic Heat Recovery System and its Role in a Design Decision Support Tool for Building Professionals." Renewable Energy 27, 57-68.

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

[3] FPrakash, J., 1994. "Transient Snalysis of a Photovoltaic-Thermal Solar Collector for Co-generation of Electricity and Hot Air/Water." Energy Conversion and Managment 35, 967–972.

[4] Hegazy, A., 2000. "Comparative Study of the Performance of Four Photovoltaic/Thermal Solar Air Collectors." Energy Conversion & Management 41, 861-881.

[5] Joshi, A., Tiwari, A., 2007. "Energy and Exergy Efficiencies of a Hybrid Photovoltaic-Thermal Air Collectors." Renewable Energy 32, 2223–2241.

[6] Kern, EC., Russell, M.C., 1978. "Combined Photovoltaic and Thermal Hybrid Collector Systems." In: Proceedings of the 13th IEEE PV Specialist Conference, Washington, DC. 5–8 June 1978. p. 1153–7.

[7] Onui, J.K., Tripanagnostopoulos, Y., 2006. "Improved PV/T Solar Collectors with Heat Extraction by Forced or Natural air Circulation,." Solar Energy 81, 498-511.

[8] Sopian, K., Yigit, K.S., Liu, H.T., Kakac, S., Veziroglu, T.N., 1996. "Performance Analysis of Photovoltaic Thermal Air Heaters." Energy Conversion and Management 37, 1657–1670.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]