



تحليل واحدهای فتوولتاييک- حرارتي و بررسی عوامل موثر بر بازده آنها

محمد سردار آبادي^a، محمد پسندیده فرد^b

^aدانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد؛ m.sardarabadi@yahoo.com

^bدانشیار گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد؛ mpfard@ferdowsi.um.ac.ir

انواع مختلف انرژیهای تجدیدپذیر در ابتدا وابسته به جذب تشعشع خورشید می باشند. انرژی آزاد شده از سطح خورشید $10^2 \times 3/86$ MW است، میزان انرژی که از این مقدار به سطح زمین می رسد به طور میانگین در سطح دریا معادل 1000 W/m^2 می باشد.

دو راه برای استفاده از انرژی دریافتی خورشید در سطح زمین وجود دارد. ساده ترین و ارزان ترین آن گرم کردن آب یا سیال دیگر به روشهای مختلف از جمله تمرکز نور می باشد، اما انرژی حرارتي در اکثر مواقع مطلوب نیست. راه دوم استحصال انرژی خورشیدی از طریق واحدهای فتوولتاييک می باشند، که به منظور تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به جریان الکتریسیته طراحی شده اند.

عملکرد سلولهای فتوولتاييک¹ به طور خلاصه بدین شرح است: فوتونهای نور توسط الکترونهای موجود در عناصر تشکیل دهنده نیمه هادیها² جذب شده و آنها را به سطح بالاتر انرژی می رسانند، این الکترونها از عنصر جدا شده، آزادانه به سمتی که در سطح پایین تری از انرژی قرار دارد حرکت می کنند و در محل جدا شده ایجاد حفره می کنند. الکترونها و حفره ها در خلاف جهت یکدیگر به سمت یک پیوند از نوع p-n (یا نوع دیگر) که در آن یک میدان الکتریکی قوی وجود دارد پخش می شوند، الکترونها و حفره ها توسط این میدان از یکدیگر جدا شده و سبب تشکیل اختلاف پتانسیل و به موجب آن جریان الکتریکی می شوند.

نیمه هادی ممکن است عناصری مانند سیلیسیوم (Si)، ژرمانیوم (Ge) و یا ترکیباتی مانند سولفید کادمیوم (CdS)، آرسنید گالیوم (GaAs) باشد، به دلیل اینکه سیلیسیوم دومین عنصر فراوان و دارای چهار ظرفیت است، گزینه مناسبی برای استفاده در سلولهای فتوولتاييک می باشد. در سلولهای

چکیده- سلولهای فتوولتاييک موادی نیمه هادی هستند که پرتوهایی با طول موج کوتاه منتشر شده از خورشید را به طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل می کنند. به دلیل اینکه تمام امواج جذب شده به الکتریسیته تبدیل نمی شوند، در سلول تولید حرارت می شود، با توجه به معادله کلی دیود که رفتار سیستم ساده فتوولتاييک را بیان می کند افزایش دما سبب کاهش ولتاژ مدار باز و در نتیجه کاهش بازدهی سیستم فتوولتاييک می شود. با افزودن سیستم بازتاب حرارت به سیستم فتوولتاييک می توان بازده الکتریکی و بازده کلی سیستم را افزایش داد، این سیستمها به واحدهای فتوولتاييک- حرارتي معروف هستند.

ترکیب استفاده از بالانس انرژی و تحلیل های جریان سیال، امکان پیش بینی رفتار دینامیکی سیستم فتوولتاييک- حرارتي، تحت تحریکات خارجی مانند تغییرات آب و هوایی، میزان مصرف سیال و شرایط ساخت را می دهد.

به این منظور تحلیل جامعی شامل بالانس معادلات انرژی برای اجزای مختلف مورد استفاده در سیستم بازتاب حرارتي و واحد فتوولتاييک در سیستمهای فتوولتاييک- حرارتي شده است. این مطالعه همچنین به بررسی عوامل موثر بر بازده سیستمهای فتوولتاييک- حرارتي، از لحاظ قانون اول و دوم ترمودینامیک که توسط مدل های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی ارائه شده می پردازد تا زمینه ای برای مطالعه گسترده تر در آینده ایجاد شود. عوامل موثر می توانند پارامترهای داخلی مانند ضریب پوشش، دبی جرمی و یا عوامل خارجی مانند شرایط آب و هوایی باشند.

واژه های کلیدی: فتوولتاييک- حرارتي، بالانس انرژی، بازده حرارتي، بازده الکتریکی.

1) مقدمه

افزایش اخیر قیمت حاملهای انرژی فسیلی عاملی برای تحقیقات در زمینه انرژیهای تجدیدپذیر شده است، اینگونه تحقیقات می توانند سهم بزرگی در ایجاد تنوع و امنیت تامین انرژی برای توسعه اقتصادی پایدار و ایجاد محیط پاک داشته باشند.

در حال حاضر انرژیهای تجدیدپذیر حدود ۱۳.۳٪ از انرژی اولیه مورد نیاز جهان را تامین می کنند، پتانسیل آینده آنها بستگی به استخراج منابع موضعی در دسترس و همچنین غلبه بر چالشهای محیطی مانند پذیرش افکار عمومی دارد.

¹ Photovoltaic Cells

² Semiconductor

نوع کلکتورها بالا بوده و به تبع آن دارای بازدهی کلی بالایی می- باشند. مایع چگالی بالایی نسبت به هوا دارد، بنابراین دبی کمتری از سیال برای استحصال میزان یکسان حرارت از سلولها نیاز است. در این کلکتورها برای گردش سیال خنک کننده در کلکتور می- توان از سیستم ثقلی کمک گرفت که سبب کاهش در هزینه ها می-شود. در مقابل در کلکتورهای PV/T با سیال کاری هوا امکان یخ زدگی و جوشش در سیال که سبب توقف کارکرد می-شود وجود ندارد، در صورت بروز نشتی آسبایی به سیستم وارد نمی- شود و همچنین در استفاده طولانی مدت استهلاک سیستم کمتر و نیز هزینه های اولیه نسبت به کلکتورهایی با سیال کاری مایع کمتر است.

۲) مدل ریاضی

ابتدا لازم است میزان و رابطه افزایش دما با تغییرات ولتاژ تعیین شود، برای تغییرات ولتاژ مدار باز با دما خواهیم داشت:

$$(dv_{oc})/dT = 1/q (dE_g/dT) - 1/T (E_g/q - V_{oc}) \quad (1)$$

در رابطه فوق V_{oc} ولتاژ مدار باز، E_g انرژی شکاف بین باند برحسب الکترون ولت و q میزان بار می-باشد، با توجه به رابطه فوق به عنوان مثال برای سلولی از جنس سیلیکن به ازای افزایش هر یک درجه سانتیگراد دما، V_{oc} تا ۰٫۴٪ کاهش می-یابد که تقریباً به همین میزان سبب افت در بازدهی الکتریکی خواهد شد. مثلاً برای واحد فتوولتاییکی که در دمای 20°C ، ۲۰٪ بازدهی داشته باشد در دمای 120°C ، ۱۲٪ بازدهی خواهد داشت. با تعریف دمای کارکرد نامی سلول (NOCT)، به عنوان دمای سلول در دمای محیط 20°C و سرعت باد کمتر از 1 m/s و شدت تشعشع 800 W/m^2 ، رابطه زیر را می-توان برای افزایش دمای سلول بر حسب دمای محیط و شدت تشعشع تعریف کرد [۲]:

$$T_{pv} = T_A + (\text{NOCT} - 20) / 0.8 \quad (2)$$

T_A دمای محیط و T_{pv} دمای سلول و G شدت تشعشع است. دمای سلول در شرایط معمول کارکرد با توجه به رابطه فوق در اکثر مواقع به بالاتر از 55°C می-رسد، که سبب کاهش شدید بازدهی الکتریکی می-شود بنابراین می-بایست راههایی برای افزایش بازدهی و افزایش بهره وری سیستمهای فتوولتاییک یافت.

فتوولتاییک، سیلیکن به صورت سیلیکن تک کریستاله (C-Si)^۱، سیلیکن چند کریستاله (PC-Si)^۲ و یا سیلیکن بی-شکل (A-Si)^۳ باشد. از نقطه ضعفهای واحدهای فتوولتاییک بازدهی کم تبدیل تشعشع به الکتریسیته می-باشد زیرا اولاً فوتونها با طول موجهای بالا را، نمی-توانند جذب کنند و ثانیاً آن بخشی که جذب می-شود نیز تماماً به الکتریسیته تبدیل نمی-شود، سلولهای فتوولتاییک بسته به جنس سلول و شرایط محیط فقط می-توانند حدود ۶٪ تا ۱۸٪ از اشعه جذب شده را به الکتریسیته تبدیل کنند، بخشی از تشعشع جذب شده که به الکتریسیته تبدیل نمی-شود به صورت امواج با طول موج بلند در فضا منتشر می-شود و قسمت اعظم آن به حرارت داخل سلول تبدیل می-شود، حرارت تولیدی در سلولهای فتوولتاییک سبب افزایش دما در سلولها می-شود. ولتاژ مدار باز خروجی وابستگی کاهشی نسبت به افزایش دمای سلول دارد، بنابراین افزایش دما در سلول جزو عوامل مهم برای افت توان و کاهش بازده محسوب می-شود. البته عوامل دیگر مانند اتلافات اهمی درون سلولها، انرژی شکاف بین باند، شدت نور و عوامل دیگر نیز بر بازده اثر می-گذارند که از بحث خارج می-باشند. در سالهای اخیر تحقیقات در زمینه تولید توان فتوولتاییک همراه با ترکیب واحد حرارتی به صورت چشمگیری افزایش یافته است، این ترکیب با نام واحد فتوولتاییک-حرارتی (PV/T)^۴ شناخته می-شود. نتیجه استفاده همزمان واحد حرارتی با واحد الکتریکی، بازدهی بیشتر الکتریکی، افزایش بازده کلی دستگاه، افزایش طول عمر سیستم و دوام بیشتر سلولها به واسطه کاهش دما می-باشد و از لحاظ اقتصادی نیز به صرفه تر است و بازگشت سرمایه در مدت زمان کوتاه تری انجام می-پذیرد. در محاسبات انجام شده توسط مرکز تحقیقات انرژی هلند [۱]، نشان داده شده است که می-توان مساحت صفحات را با تولید انرژی یکسان با استفاده از کلکتورهای فتوولتاییک حرارتی تا ۴۰٪ کاهش داد.

سیال مورد استفاده در فرایند خنک کاری با توجه به موقعیت، امکانات و نیاز مصرف کننده تعیین می-گردد که می-تواند آب یا هوا باشد (سیالات دیگر از قبیل روغنها و سیالات مورد استفاده در سیستمهای تبرید به علت هزینه های بالا و عدم بهره وری اقتصادی مورد استفاده قرار نمی-گیرند). استفاده از هر کدام از این سیالها (آب یا هوا) در کلکتور^۵ مزایا و معایبی دارد. کلکتورهای PV/T با سیال کاری آب ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی بالایی دارند در نتیجه نرخ انتقال حرارت در واحد سطح در این

³ Crystalline silicon

⁴ Poly-Crystalline silicon

⁵ Amorphous-Crystalline silicon

¹ Photovoltaic-thermal system

² Collector

در این رابطه \dot{E}_{xpv} انرژی خروجی فتوولتاییک بر واحد سطح سلول، \dot{E}_{xt} انرژی حرارتی خروجی بر واحد سطح کلکتور و \dot{E}_{xsun} انرژی ورودی تشعشع خورشید می باشد. انرژی های خروجی توسط روابط زیر به انرژی های خروجی مربوط می شوند:

$$\dot{E}_{xpv} = \dot{E}_{pv} \quad (7)$$

$$\dot{E}_{xt} = \dot{E}_t (1 - T_a/T_2) \quad (8)$$

برای ارزیابی انرژی ورودی تشعشع نیز می توان از رابطه ساده زیر استفاده کرد:

$$\dot{E}_{xsun} = (1 - \frac{T_0}{T_{sun}})G \quad (9)$$

در رابطه فوق T_0 دمای محیط و T_{sun} دمای تشعشع خورشید است، خورشید در دمای 5700 کلوین به عنوان جسم سیاه در نظر گرفته شده است.

۳-۲ بازده الکتریکی

همانطور که در ابتدای تحقیق بیان شد بازدهی الکتریکی به دمای سلولها وابسته است:

$$\eta_{pv} = G \cdot r \cdot \tau_g \cdot \eta_0 [1 - \phi_c (T_{pv} - 25)] \quad (10)$$

در رابطه η_0 بازدهی تبدیل انرژی الکتریکی در دمای مرجع $0^\circ C$ ϕ_c ضریب دمایی سلول خورشیدی با مقداری معادل $0.0045^\circ C^{-1}$ در روابط به کار می رود. τ_g ضریب انتقال پوشش شیشه ای است، داریم:

$$\tau_g = e^{-\lambda D_g / \cos \theta_2} \quad (11)$$

که در این رابطه برای θ_2 خواهیم داشت:

$$\theta_2 = \text{ArcSin}(\frac{\text{Sin} \theta_1}{n_g})$$

θ_1 زاویه بازتاب، n_g ضریب بازتاب شیشه و λ ضریب کاهش نور شیشه می باشد. همچنین علاوه بر رابطه ذکر شده بر حسب دمای نامی سلول، تشعشع ورودی و دمای محیط، در ابتدای بحث توسط مرجع [۲]، رابطه توزیع دما در یک پانل فتوولتاییک^۴ توسط مرجع [۴]، بر حسب شدت تشعشع و دمای محیط به صورت تقریبی توسط رابطه زیر داده شده است:

$$T_{pv} = 30 + 0.175(G - 150) + 1.14(T_a - 25) \quad (12)$$

از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک بازدهی کلی سیستم فتوولتاییک با تعریف دوره زمانی از t_1 تا t_2 عبارتست از:

$$\eta_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}_t + A_{pv} \dot{E}_{pv}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} (G) dt} = \eta_t + r \eta_{pv} \quad (3)$$

در رابطه فوق \dot{E}_t توان خروجی حرارتی بر واحد سطح کلکتور، \dot{E}_{pv} توان خروجی فتوولتاییک بر واحد سطح سلول، G شدت تشعشع بر واحد سطح کلکتور، A_c مساحت سطح کلکتور، A_{pv} مساحت سطح سلولها، η_t بازده حرارتی فتوولتاییک، η_{pv} بازده سلولهای فتوولتاییک، و r ضریب پوشش^۱ می باشد که عبارتست از مساحت سطح موثر سلولهای فتوولتاییک به مساحت سطح موثر کلکتور که به صورت زیر تعریف می شود:

$$r = A_{pv}/A_c \quad (4)$$

۲-۲ بازده قانون دوم ترمودینامیک:

بر اساس مطالعه صورت گرفته توسط فوجیساوا و تانی^۲ [۳]، بر فرض برابری اولیه دمای سیال با دمای محیط، بازده کلی از لحاظ انرژی برای سیستم فتوولتاییک حرارتی به صورت زیر تعریف می شود:

$$\eta_{pvt} = \eta_{pv} + \eta_t (1 - T_a/T_2) \quad (5)$$

در رابطه فوق η_{pv} بازدهی انرژی سلولهای فتوولتاییک، η_t بازدهی انرژی کلکتور حرارتی، T_a دمای محیط، T_2 دمای نهایی سیال واسطه می باشند. در صورت هم ارز گرفتن η_{pv} با η_{pv} ، η_t با η_t رابطه ای به صورت بازدهی کارنو خواهد داشت که در معادله مشخص می باشد. در رابطه ارائه شده فوق دو ساده سازی کلی صورت گرفته است: اولاً، فاکتور بسیار مهم ضریب پوشش در نظر گرفته نشده است، ثانیاً، انرژی خروجی حاصل از تشعشع نیز در رابطه استفاده نشده است. با اصلاح رابطه توسط چاو^۳ [۴]، رابطه جدیدی ارائه شد:

$$\eta_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}_{xt} + A_{pv} \dot{E}_{xpv}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} (\dot{E}_{xsun}) dt} = \eta_t + r \eta_{pv} \quad (6)$$

□

³ Packing Factor

¹ Fujisawa and Tani

² Chow

³ Photovoltaic panel

۳) تحلیل انرژی اجزای اصلی سیستم فتوولتاییک-حرارتی

برای نوشتن معادلات بالانس انرژی فرضیات زیر را در نظر می-گیریم: ناچیز بودن ظرفیت حرارتی عایق الکتریکی و صفحات چسباننده، صرف نظر کردن از تلفات اهمی در سلولها، یکنواخت بودن دما در پوشش شیشه‌ای. در این بخش تحلیل حرارتی اجزای اصلی سیستم ارائه می‌شود.

پوشش شیشه‌ای

حفاظ شیشه‌ای تشعشع مستقیم خورشید را دریافت و آنرا پخش میکند، همچنین امواج با طول موج بلند آسمان را از سطح جلو و امواج با طول موج بلند ساطع شده از کلکتور را از سطح پشت (به تناسب ضریب پوشش) دریافت می‌کند. در صورتی که هدایت حرارتی در امتداد جهت جریان آب باشد انتقال حرارت جابجایی در سطوح داخلی و خارجی شیشه اتفاق می‌افتد در اینصورت خواهیم داشت:

$$D_g \rho_g C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = (G_b \alpha_{eff,b,g} + G_d \alpha_{eff,d,g}) + D_g k_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial y^2} + (h_{pv,g} + h_{r,c-g})(T_{pv} - T_g)r + (h_{c-g} + h_{r,c-g})(T_c - T_g)(1-r) + h_{r,sky} \times (T_a - T_g) \quad (13)$$

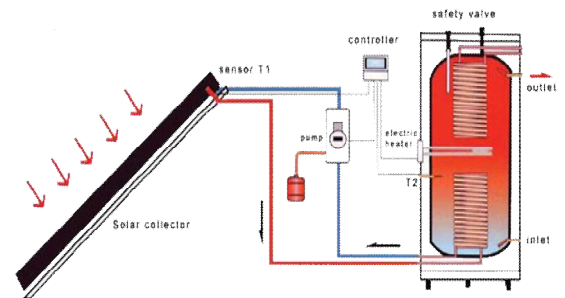
در رابطه فوق D_g , ρ_g , C_g به ترتیب: گرمای ویژه، چگالی و ضخامت پوشش شیشه‌ای می‌باشند. G_b پرتو حادث، G_d پخش تشعشع، $\alpha_{eff,b,g}$ و $\alpha_{eff,d,g}$ ضرایب جذب مفید متناظر آنها توسط شیشه می‌باشند، k_g ضریب هدایت، h_{pv-g} و h_{c-g} به ترتیب ضریب جابجایی بین شیشه و سلول و ضریب هدایت، $h_{r,c-g}$ و $h_{r,sky}$ ضرایب تابش در نظر گرفت. T_c, T_{pv}, T_g, T_a نیز به ترتیب دمای محیط، دمای شیشه، دمای سلول و دمای جاذب می‌باشند. چاو [۴]، با حذف پارامترهایی با ضریب تاثیر کم، رابطه فوق را به صورت زیر خلاصه کرد:

$$D_g \rho_g C_g \frac{dT_g}{dt} = G \alpha_g + (h_{wind} + h_{r,g-a})(T_a - T_g)r + (h_{c-g} + h_{r,c-g}) \times (T_c - T_g) \quad (14)$$

در این رابطه برای α_g خواهیم داشت:

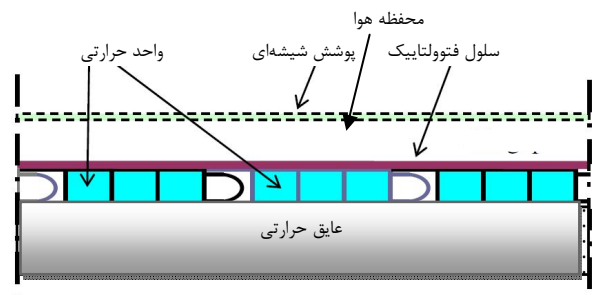
$$\alpha_g = 1 - \tau_g \quad (15)$$

برای تحلیل اجزای مختلف واحد فتوولتاییک حرارتی نمای جریانی زیر را در نظر می‌گیریم:



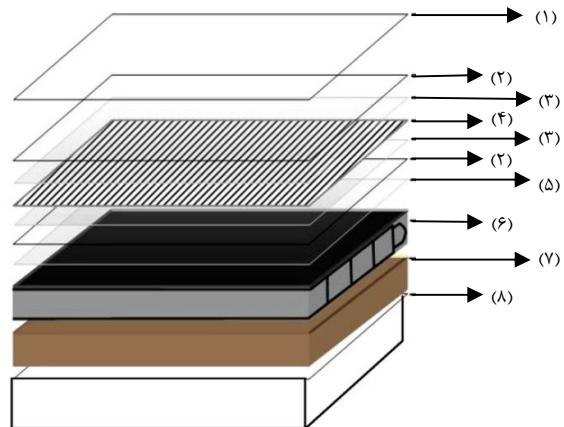
شکل ۱. نمای کلی واحد فتوولتاییک-حرارتی

جریان سیال سرد توسط پمپ به کلکتور واحد فتوولتاییک-حرارتی هدایت می‌شود و با تبادل حرارتی سلولها را خنک می‌کند. سپس جریان سیال گرم وارد مبدل حرارتی بسته شده و مجدد با تبادل حرارتی سیال داخل مبدل را برای مصرف گرم می‌کند. این سیکل مجدد تکرار خواهد شد. برش عرضی از کلکتور فتوولتاییک-حرارتی مورد بررسی، که در آن اجزای اصلی شامل سلول فتوولتاییک، پوشش شیشه‌ای و عایق حرارتی می‌باشد در شکل (۲)، نشان داده شده است.



شکل ۲. برش عرضی کلکتور واحد فتوولتاییک-حرارتی

کلکتور واحد فتوولتاییک-حرارتی به صورت جزئی تر شامل اجزای زیر است:



(۱) پوشش شیشه‌ای؛ (۲) TPT؛ (۳) EVA؛ (۴) واحد فتوولتاییک؛

(۵) سیلیکا ژل؛ (۶) جاذب حرارت؛ (۷) عایق حرارت؛ (۸) دیوار (اختیاری)

شکل ۳. اجزای تشکیل دهنده کلکتور فتوولتاییک-حرارتی

واحد فتوولتاییک

رابطه بالانس انرژی برای این قسمت عبارتست از:

$$G_b \alpha_{\text{eff}, b-pv} + G_d \alpha_{\text{eff}, d-g} - G_{\text{eff}, c} [a + b(T_{pv} - 25)] = (h_{pv-g} + h_{r, pv-g}) \times (T_{pv} - T_g) + U_{pv-c} (T_{pv} - T_c) \quad (16)$$

که در آن G_{eff} تشعشع فرود آمده موثر، a ، b ثوابت ویژه سلول خورشیدی و U_{pv-c} ضریب انتقال حرارت کلی بین سلول خورشیدی و جاذب حرارت می باشد.

کلکتور

با واحد در نظر گرفتن کارایی فین جاذب حرارت، بالانس انرژی برای این قسمت عبارتست از:

$$D_c \rho_c C_l \frac{\partial T_c}{\partial t} = (G_b \alpha_{\text{eff}, b-g} + G_d \alpha_{\text{eff}, d,g}) \times (1-r) W_c + D_c W_c k_c \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + (h_{c-g} + h_{r, c-g}) \times (T_c - T_g) (1-r) W_c + U_{pv-c} (T_c - T_p) r W_c + h_{c-fl} \times U_{c-ins} W_c (T_{ins} - T_c) \times (T_f - T_c) \quad (17)$$

W_c عرض جاذب، T_f دمای جریان سیال، T_{ins} دمای عایق حرارت و l میزان رطوبت کانال جاذب است. مجدداً با ساده سازیهای صورت گرفته در مطالعات چاو [4]، می توان رابطه را به صورت زیر خلاصه نمود:

$$D_g \rho_g C_g \frac{dT_g}{dt} = G \tau_g - E_{pv} + (h_{c-g} + h_{c,r-g}) (T_g - T_c) + (T_f - T_c) h_{c-fl} A_j + (T_a - T_c) / R_{ins} \quad (18)$$

کلکتور بدون پوشش شیشه ای¹

در صورتیکه پوشش شیشه ای وجود نداشته باشد تشعشع خورشید مستقیماً به صفحه کلکتور میرسد، در این صورت خواهیم داشت:

$$D_c \rho_c C_c \frac{dT_g}{dt} = G \tau_c - E_{pv} + h_{wind} + h_{r,c-a} T_a - T_c + T_f - T_c h_{c-fl} A_j + T_a - T_c R_{ins} \quad (19)$$

در رابطه بالا $h_{r,c-a}$ ، ضریب انتقال حرارت تشعشع در سطح صفحه کلکتور است.

جریان سیال در کانالهای جاذب

برای کانالی با سطح مقطع A_j خواهیم داشت:

$$A_j \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = T_c - T_f h_{c,f} - A_j u_f \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} y + A_j K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \quad (20)$$

عایق حرارتی

به علت تبادل حرارتی کم در عایق و حجم حرارتی کم آن می توان از این قسمت صرف نظر کرد، بالانس انرژی برای این قسمت عبارتست از:

$$U_{c,ins} (T_c - T_{ins}) = U_{w,ins} (T_{ins} - T_w) \quad (21)$$

در رابطه فوق $U_{c,ins}$ و $U_{w,ins}$ به ترتیب ضرایب انتقال حرارت کلی بین کلکتور و عایق - دیوار و عایق می باشد. که توسط روابط زیر محاسبه میشوند:

$$U_{c,ins} = 1 / (R_{c,ins} + R_{ins}) \quad (22)$$

$$U_{w,ins} = \frac{1}{R_{c,ins} + \frac{1}{\frac{1}{h_{ins,w,c}} + \frac{1}{h_{r,ins,w}}}}$$

در این روابط $R_{c,ins}$ مقاومت حرارتی بین کلکتور - عایق و R_{ins} مقاومت حرارتی عایق می باشد.

دیوار

در صورت وجود دیوار بعد از عایق حرارتی (سیستم فتوولتاییک روی سقف ساختمان نصب شده باشد) خواهیم داشت:

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = K W \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \quad (23)$$

مخزن ذخیره آب

$$M_{tk} C_{tk} \frac{dT_{tan,k}}{dt} = m_f C_f T_{tan,k,i} - T_{tan,k,o} + h_{tank} A_{tank} T_a - T_{tk} \quad (24)$$

لوله های اتصال

با صرف نظر از توان حرارتی مواد لوله بالانس حرارت بر واحد طول لوله نتیجه میدهد:

$$(\pi D_{\text{pipe}}^2 / 4) \rho_f C_f \frac{\partial T}{\partial t} = U_{a,f} \pi D_{\text{pipe}} (T_a - T_f) - (\pi D_{\text{pipe}}^2 / 4) U_{\text{pipe}} \times (T_a - T_f) + (\pi D_{\text{pipe}}^2 / 4) K_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial y^2} \quad (25)$$

¹ Unglazed collector

φ زاویه شیب کلکتور، β ضریب درجه حرارت قابلیت هدایت حرارتی ($1/^\circ\text{C}$) که برای هوا تقریباً معادل $1/T$ می باشد. انتقال حرارت بین مجراها و سیال کاری^۲ به صورت جابجایی اجباری می باشد، برای لوله های گردش آب با استفاده از روابط زیر می توان برای مشخص کردن ضرایب جابجایی که همگی روابط تجربی می باشند استفاده کرد، در یک سمت جابجایی بین سیال و لوله ها و در سمت دیگر بین لوله ها و عایق.

الف) در مورد جریان آرام: $\text{Re} < 2100$
برای $\text{Gz} < 1000$:

$$\text{Nu} = 3.66 + \frac{0.085\text{Gz}}{1 + 0.047\text{Gz}^{2/3}} \left[\frac{\mu_f}{\mu_n} \right]^{0.14} \quad (34)$$

برای $\text{Gz} > 1000$:

$$\text{Nu} = 1.86\text{Gz}^{1/3} + \left[\frac{\mu_f}{\mu_n} \right]^{0.14} + 0.87(1 + 0.015\text{Gz}^{1/3}) \quad (35)$$

ب) در مورد جریان در حالت انتقال: $2100 < \text{Re} < 10000$:

$$\text{Nu} = 0.116(\text{Re}^{2/3} - 125)\text{Pr}^{1/3} [1 + \text{D}_i^{2/3}] \left[\frac{\mu_f}{\mu_n} \right]^{0.14} \quad (36)$$

ج) در مورد جریان مغشوش: $\text{Re} > 10000$:

$$\text{Nu} = 0.23\text{Re}^{0.8}\text{Pr}^{1/3} \left[\frac{\mu_f}{\mu_n} \right]^{0.14} \quad (37)$$

μ ویسکوزیته دینامیکی سیال در دمای مشخص، Re , Pr , Gz به ترتیب اعداد گراتز، پرانتل و رینولدز می باشند. ضریب انتقال حرارت هدایت در لایه های مختلف کلکتور از رابطه زیر بدست می آید:

$$h_{\text{cond},n} = K_n / \delta_n \quad (38)$$

K_n ضریب هدایت حرارتی هر لایه و δ_n ضخامت آن لایه می باشد.

۵) مروری بر نتایج مدل های آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی ارائه شده

مدل های آزمایشگاهی مختلفی از سیستم های فتوولتائیک-حرارتی توسط چندین محقق مورد تست قرار گرفته است. هدف اصلی تمامی این آزمایش ها، ساخت سیستمی با بالاترین بازده الکتریکی و بازدهی رضایت بخش از لحاظ حرارتی بوده است. مقدار قابل توجهی از تحقیقات به صورت خاص برای بهبود در انتقال حرارت

اگر D_{ins} را ضخامت عایق و K_{ins} را ضریب هدایت حرارتی عایق در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$U_{a,f} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{pipe},f}} + \frac{D_{\text{ins}}}{K_{\text{ins}}} + \frac{1}{h_{\text{wind}}}} \quad (26)$$

۴) ضرایب انتقال حرارت:

ضریب انتقال حرارت جابجایی در اثر وزش باد توسط آدامز^۱ برگرفته از مرجع [۵]، به صورت زیر داده شده است:

$$h_{\text{wind}} = 5.7 + 3.8U_{\text{wind}} \quad (27)$$

در رابطه فوق U_{wind} سرعت باد می باشد.

ضریب انتقال حرارت جابجایی در داخل لوله عبارتست از:

$$h_{\text{pipe},f} = 4.11K_{\text{water}}/D_{\text{pipe}} \quad U_{\text{pipe}} > 0 \quad (28)$$

$$h_{\text{pipe},f} = 4.11K_{\text{water}}/D_{\text{pipe}} \quad U_{\text{pipe}} = 0 \quad (29)$$

ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین شیشه پوششی کلکتور و آسمان عبارتست از:

$$h_{r,c-g} = \epsilon \sigma (T_c^2 + T_{\text{sky}}^2) (T_c + T_{\text{sky}}) \quad (30)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد بین شیشه و واحد فتوولتائیک عبارتست از:

$$h_{\text{conv},g-pv} = \text{Nu} K_{\text{air}} / d \quad (31)$$

در رابطه K_{air} هدایت حرارتی هوا، d فاصله بین شیشه و واحد فتوولتائیک است. عدد ناسلت در رابطه فوق با استفاده از روابط ذیل تعیین می شود:

$$\text{Gr} < 1700 + 47.8\varphi \quad \text{Nu} = 1.013 \quad (32)$$

$$\text{Gr} > 80000 \quad \text{Nu} = 2.5 + 0.0133(90 - \varphi)$$

و در غیر این صورت داریم: $\text{Nu} = [0.06 + 3.10^{-4}(90 - \varphi)] \text{Gr}^{0.33}$

در روابط عدد گراشف به صورت زیر تعریف می شود:

$$\text{Gr} = \frac{G\beta\Delta T b^3}{\nu^2} \quad (33)$$

² Working fluid

¹ Adams

شده است. چهار ترکیب از واحدهای فتوولتائیک در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت: ترکیب اول شامل واحدهای فتوولتائیک شفاف با مجرای عبور سیال، ترکیب دوم واحدهای فتوولتائیک شفاف بدون مجرا، و ترکیبهای بعدی شامل واحدهای فتوولتائیک با صفحه عایق برای دو حالت فوق بود. در این مطالعه مشخص شد که میانگین بازدهی الکتریکی واحد فتوولتائیک با مجرای عبور سیال ۱۰/۴۱٪ و بدون عبور سیال ۹/۷۵٪ است.

تیواری [۱۰]، مدل عددی خود از تحقیق انجام شده را روی سیستم PV/T با سیال کاری آب برای تحلیل بازدهی و تستهای میزان حساسیت از کلکتورهای با پوشش و بدون پوشش شیشه-ای نیز گسترش داد. مقدار قابل توجهی تحقیقات به طور خاص برای بهبود در انتقال حرارت کلکتورهای هوا به صورت جابجایی آزاد و اجباری صورت گرفته است، این مطالعات به طور عمومی روی هندسه کانال، ایجاد توربولانس بیشتر در کانال جریان و افزایش مساحت سطح انتقال حرارت جابجایی در کانال متمرکز شده اند.

دهرا^۵ [۱۱]، مدلی برای شبکه حرارتی دو بعدی برای پیش بینی توزیع دمای هوا، دمای واحد فتوولتائیک و پانل پشتی^۶ در مقطعی مقطعی از دیواره خورشیدی واحد فتوولتائیک که به صورت عمودی به عنوان دیوار در قسمت خارجی اتاق نصب شده بود ارائه کرد، در مطالعه وی معادلات گره‌های شبکه حرارتی حالت پایدار با در نظر گرفتن تبادل و انتقال حرارت به صورت توأم توسعه یافته-اند. روند حل ماتریسی برای فرمول‌سازی میزان هدایت و شبکه-های منبع حرارت توسط پرداختن به شبکه دو بعدی به کار گرفته شده است. در مدل وی روند حل عددی از شبکه دو بعدی حرارتی شامل موارد زیر است:

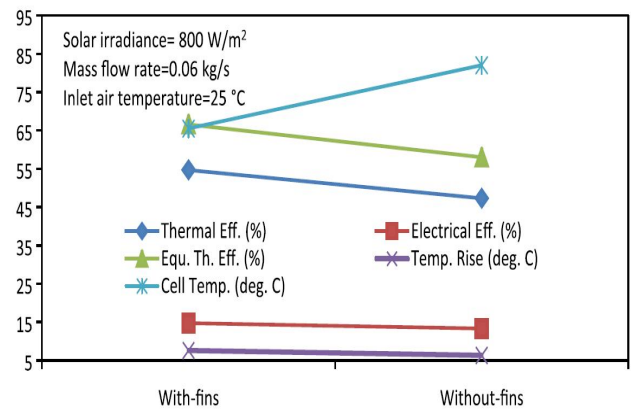
- ساختار شبکه بندی گره ای؛
- بالانس انرژی روی گره های صفحه در لبه جامد-هوا؛
- بالانس انرژی روی گره‌های هوا در مسیر هوا؛
- حل سیستم توسط حل معادلات جبری.

بابکری^۷ [۱۲]، با رویکردی عددی به مطالعه بازدهی کلکتور فتوولتائیک- حرارتی هیبریدی پرداخت. بر طبق مطالعات وی با توجه به خواص ترموفیزیکی کلکتورها با سیال کاری آب یا هوا بازدهی کمی را نشان می‌دهند، در این تحقیق ترکیب دو کلکتور (با سیال کاری هوا و آب) به عنوان روشی موثر برای بالا بردن بازدهی به کار گرفته شده است.

و ابداع سیستمهایی برای کاهش هزینه‌ها و به طور همزمان افزایش بازده الکتریکی بوده است:

تریپان^۱ [۷]، مدل‌های آزمایشگاهی شامل سه تغییر در کانال هوا را مورد بررسی قرار داد: (۱) عمق کانال هوا متغیر در نظر گرفت؛ (۲) فین‌ها و مجراهایی در کانال نصب کرد؛ (۳) یک صفحه صاف که به صورت خاصی پوشش داده شده بود در مجرا قرار داد. نتایج سیستم بهبود یافته با سیستم مرجع که دارای عمق کانال ۱۵cm بود مورد مقایسه قرار گرفت. بر اساس نتایج این تحقیق، پیشنهاد شد که یک راه ساده و کارآمد افزایش بازدهی، قرار دادن یک صفحه متالیک که در خلاف جهت جریان، زبر شده است، می‌باشد.

روسن^۲ [۸]، به ارزیابی عملکرد فین در یک واحد فتوولتائیک-حرارتی با سیال کاری هوا پرداخت، در مطالعه وی تاثیرات حضور فین در کانال جریان هوا، عمق کانال جریان هوا، نرخ جریان، دمای هوای ورودی و ضریب پوشش روی بازدهی الکتریکی و حرارتی به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است.



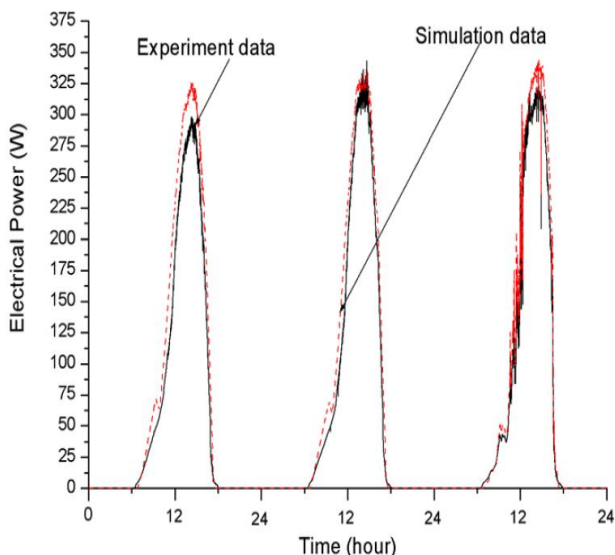
شکل ۵. مقایسه بازده الکتریکی، بازده حرارتی و دمای سلولهای فتوولتائیک-حرارتی در حالت کلکتور فین دار و بدون فین، مارک روسن [۸].

فین گسترش یافته دمای سلول را به طور قابل توجهی از ۸۲°C به ۶۶°C کاهش داد. حضور فین، در بازدهی الکتریکی حدود ۳٪ و در بازدهی حرارتی حدود ۸٪ افزایش را نشان می‌دهد. همچنین ارزیابیهای فشرده‌ای روی خروجیهای الکتریکی و حرارتی از تاثیر ضریب پوشش^۳ گزارش شده است و تشخیص داده است که ضریب‌های پوشش بالا به سبب تولید بیشتر الکتریسیته سودمند خواهد بود.

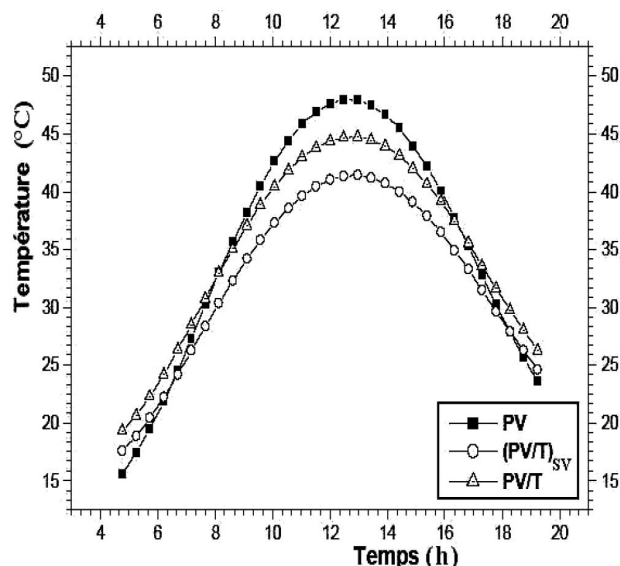
دابی و تیواری^۴ [۹]، مطالعه‌ای تحلیلی روی بازدهی الکتریکی کلکتورهای فتوولتائیک-حرارتی صفحه تخت، با سیال کاری هوا انجام داد در این مطالعه تاثیر جریان روی واحدهای فتوولتائیک به عنوان یکی از پارامترهای طراحی و شرایط آب و هوایی بررسی

³ Dehra
⁴ Back panel
⁵ Boubekri

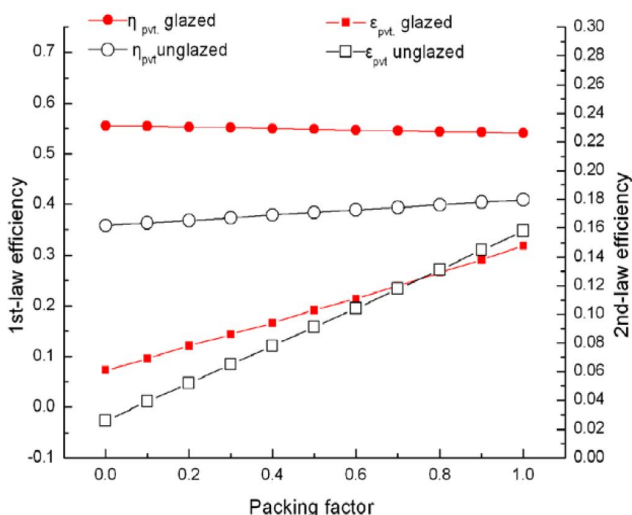
² Tripanagnostopoulos
³ Rosen
¹ Packing factor
² Dudgey and Tiwari



شکل ۶. مقایسه عددی و آزمایشگاهی توان خروجی الکتریکی برای حالت کارکرد پمپ، چاو [۴].



شکل ۵. مدل‌سازی عددی دما برای کلکتور با دو سیال کاری آب و هوا، بابکری [۱۲].



شکل ۷. تغییرات بازدهی کلی با ضریب پوشش سلولها توسط کلکتور، چاو [۴].

دابی [۱۳]، بازده تئوری کلکتورهای صفحه‌ای با ضریب پوشش جزئی، که به صورت سری به هم متصل شده بودند را مورد ارزیابی قرار داد. مطالعه گزارش کرد که اینگونه کلکتورها در ارزش‌گذاری سالیانه در صورتی که نیاز اولیه مصرف‌کننده، انرژی حرارتی باشد، مفید خواهد بود. از طرف دیگر در صورتیکه انرژی درخواستی اولیه الکتریسیته باشد کلکتور با ضریب پوشش بالاتر مفیدتر است. نتایج همچنین نشان می‌داد که دمای خروجی سیال با افزایش تعداد کلکتورها از ۴ به ۱۰، به طور قابل توجهی از ۶۰°C به ۸۴°C افزایش می‌یابد. همچنین انرژی حرارتی مفید از ۴/۱۷ کیلووات ساعت به ۸/۶۶ کیلووات ساعت و انرژی الکتریکی بدست آمده از ۰/۰۵۲ کیلووات ساعت به ۰/۱۲۳ کیلووات ساعت، وابسته به افزایش تعداد کلکتورها، افزایش خواهند یافت.

وی نتایج خود را با سیستم فتوولتائیک و سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیال کاری آب مقایسه کرد. سیستم فتوولتائیک مورد بررسی وی افزایش بازدهی ۱/۱٪ در بازدهی الکتریکی و کاهش دمای سلول تا ۱۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دادند.

برای پیش‌بینی دمای واحدهای فتوولتائیک و میزان گرمای جذب شده توسط سیال در طول دوره نوسان تشعشع ورودی یا تغییر میزان سیال در یک موقعیت ناپایدار، چاو [۴]، یک مدل دینامیکی صریح بر اساس تفاضل محدود برای سیستم فتوولتائیک با کلکتور حاوی سیال کاری آب ارائه کرد. او گزارش کرد که در یک کلکتور مناسب بازده ترکیبی را می‌توان بالای ۷۰٪ نیز رساند، و در یک کلکتور نامناسب این میزان به زیر ۶۰٪ می‌رسد. در شکل (۶)، نمونه ای از مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی وی برای مدل‌سازی سلول فتوولتائیک با کارکرد پمپ برای ایجاد جابجایی اجباری در سیال در سه روز متوالی نشان داده شده. او شش پارامتر کلیدی محیطی و داخلی را روی سیستم فتوولتائیک- حرارتی از جمله ضریب پوشش، دمای محیط و ... را روی بازدهی قانون اول و دوم و بازدهی الکتریکی بررسی کرد. نتایج بازدهی حرارتی و الکتریکی برای کلکتور با پوشش شیشه‌ای به ترتیب ۵۰/۳٪ و ۹/۳٪ و برای بدون پوشش شیشه‌ای آن ۴۰/۸٪ و ۱۲/۱٪ می‌باشد. همچنین تاثیر پوشش شیشه‌ای کلکتور روی بازده حرارتی و الکتریکی توسط وی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به عنوان نمونه تاثیر ضریب پوشش روی بازدهی قانون اول و دوم در شکل (۷)، آورده شده است.

۶ نتیجه گیری:

سیستم فتوولتائیک- حرارتی (در تمامی حل‌های موجود از انتقال و ظرفیت حرارتی برخی از اجزای به کار رفته در سیستم صرف نظر شده است)؛

- امکان توسعه مدل‌سازی عددی شبکه حرارتی واحدهای فتوولتائیک در دو و سه بعد و اعتبار سنجی با نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی.

۸ مراجع

- [1] IEA solar heating and cooling programmed, 2007.
- [2] Roger and Ventre, 2000. *Photovoltaic System engineering*. CRC, Press LLC.
- [3] Fujisawa and Tani, 1997. "Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector". *Solar Energy Mater Sol Cells*, 47, May, pp. 135-148.
- [4] Chow, T.T., 2009. "Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover". *Applied Energy*, 86, pp. 310-316.
- [5] Chow, T.T., He, W., 2003. "Dynamic Performance of Hybrid Photovoltaic / Thermal Collector Wall in Hong Kong". *Building and Environment*, Vol. 38, May, pp. 1327-1334.
- [6] Gang, P., Hide, B., and Tao, Z., 2011. "A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system". *Solar Energy*, 85, pp. 911-921.
- [7] Tripanagnostopoulos, Y., Nousia, T.H., and Souliotis, M., 2000. "Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV-thermal systems". *solar energy*, vol. 2, pp. 1874-89.
- [8] Rosen, M., Rakesh, 2011. "Performance evaluation of a double pass PV/T solar air heater with and without fins". *Applied Thermal Energy*, 31, pp. 1402-1410.
- [9] Dubey, S., Tiwari, G.N., 2009. "Analysis of PV/T flat plate water collectors connected in series". *Solar Energy*, 83, pp. 1485-98.
- [10] Tiwari A, Sodha M.S., 2006. "Performance evaluation of solar PV/T system: an experimental validation". *solar Energy*, 80, pp. 751-759.
- [11] Dehra H, 2009. "A two dimensional thermal network model for a photovoltaic solar wall". *solar Energy*, 83, pp. 1933-1942.
- [12] Boubekri, M., chaker and Chekane, 2009. "Numerical approach for performance study of hybrid PV/Thermal collector". *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 12, pp. 355-368.
- [13] Dubey, S., Sandha, G.S., and Tiwari, G.N., 2009. "Analytical expression for efficiency of PV/T hybrid air collector". *Applied Energy*, 86, pp. 697-705.
- [14] Jones, A.D., Underwood, C.P.A., 2001. "A thermal model for photovoltaic systems". *Solar Energy*, 70(4), pp. 349-359.

با مرور تحقیقات انجام شده واضح است که برای استفاده عمومی از سیستم‌های فتوولتائیک به عنوان ابزاری اقتصادی و کارآمد در مصارف خانگی و کاربردهای تجاری هنوز باید مطالعات و آزمایشات وسیعی در این زمینه انجام گیرد. با به کارگیری مدل عددی مناسب و به کارگیری ترکیب استفاده از بالانس انرژی و تحلیل‌های جریان سیال، امکان پیش بینی رفتار دینامیکی سیستم فتوولتائیک- حرارتی، تحت تحریکات خارجی مانند تغییرات آب و هوایی، میزان مصرف سیال و شرایط ساخت وجود دارد. بازدهی سیستم فتوولتائیک- حرارتی از دو عامل ساختار سیستم (پارامترهای داخلی) و شرایط آب و هوایی (پارامترهای خارجی) می‌تواند تاثیر بگیرد. پارامترهای داخلی می‌توانند شامل بازدهی سلول فتوولتائیک، فاکتور یا ضریب پخش و نسبت جرم آب ورودی به مساحت ورودی می‌باشد و پارامترهای خارجی می‌توانند شامل تشعشع خورشید، دمای محیط و سرعت باد باشند. بازدهی کلی فتوولتائیک- حرارتی سیستم فتوولتائیک- حرارتی از لحاظ انرژی اجازه ارزیابی از لحاظ کیفی بازدهی را با مقایسه توان خروجی الکتریکی و حرارتی در فرم درجه هم‌ارزی می‌دهد. تمایل بازدهی کلی فتوولتائیک- حرارتی "pv" از لحاظ انرژی وابسته به اثر ترکیب همزمان η_{pv} و η_t است.

با توجه به مطالعات انجام شده در مقالات و تحقیقات، دیده می‌شود که در سالهای اخیر تمامی کشورهای صنعتی و اکثر کشورهای در حال توسعه، تحقیقات گسترده‌ای روی انرژی‌های تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی انجام داده‌اند و در صدد تجاری سازی آن می‌باشند، ایران با توجه به نقشه‌های تابش-سنجی منتشر شده در رده کشورهای مستعد برای استفاده از این منبع انرژی می‌باشد اما تحقیقات تخصصی بسیار کمی در این موضوع انجام داده است.

در این زمینه خلأهایی در تحقیقات انجام شده مشاهده شد که می‌توان به عنوان زمینه‌ای برای مطالعات آینده از آنها استفاده کرد:

- بررسی بازده الکتریکی، حرارتی و ترکیبی، سیستم‌های فتوولتائیک- حرارتی با سیال کاری هوا از لحاظ انرژی و انرژی؛
- امکان‌سنجی پتانسیل استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک- حرارتی در شرایط آب و هوایی ایران؛
- بررسی پارامترهای مؤثر جهت یافتن سیستم بهینه فتوولتائیک - حرارتی از لحاظ مصرف و تولید انرژی؛
- بهبود و توسعه مدل‌های عددی موجود با در نظر گرفتن ظرفیت و انتقال حرارتی تمامی عناصر به کار رفته در