

## بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر عملکرد یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی صفحه تخت آبی

فریده یزدانی فرد<sup>۱</sup>، مهران عامری<sup>۲\*</sup>، احسان ابراهیم نیا بجستان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی

صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، [fyazdanifard@yahoo.com](mailto:fyazdanifard@yahoo.com)

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، [ameri\\_mm@uk.ac.ir](mailto:ameri_mm@uk.ac.ir)

<sup>۳</sup> استادیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری

پیشرفته، کرمان، ایران، [e.ebrahimnia@kgut.ac.ir](mailto:e.ebrahimnia@kgut.ac.ir)

**چکیده:** سیستم فتوولتائیک/حرارتی ترکیبی از فناوری فتوولتائیک و فناوری حرارتی خورشیدی است که به وسیله آن، انرژی الکتریکی و حرارتی به طور همزمان تولید می شود. در این تحقیق، یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی صفحه تخت آبی در دو حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن مدل سازی شده و کارایی سیستم فتوولتائیک/حرارتی از دیدگاه انرژی و انرژی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر چهار متغیر تابش خورشید، دمای محیط، دبی جرمی و ضریب فشردگی بر راندمان انرژی و انرژی بررسی شده است. مدل پیشنهاد شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبارسنجی و تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده شده است. براساس نتایج به دست آمده بازده انرژی سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پوشش شیشه‌ای همواره بیشتر از سیستم بدون پوشش شیشه‌ای است؛ اما بازده انرژی سیستم با پوشش شیشه‌ای در بیشتر موارد از سیستم بدون پوشش شیشه‌ای کمتر است. افزایش تابش و ضریب فشردگی سبب افزایش بازده انرژی و بازده انرژی می شود، اما افزایش دمای محیط سبب افزایش بازده انرژی و کاهش بازده انرژی می گردد. همچنین یک دبی جرمی بهینه وجود دارد که به ازای آن، بازده انرژی ماکزیمم می شود. این دبی بهینه برای سیستم بدون پوشش شیشه‌ای بیشتر از سیستم با پوشش شیشه‌ای به دست می آید.

**واژه‌های کلیدی:** فتوولتائیک/حرارتی، فتوولتائیک، پوشش شیشه‌ای، بازده انرژی، بازده انرژی.

طراحی آن‌ها بررسی کرده‌اند. چو [۷] یک مدل حرارتی دینامیکی مناسب را برای شبیه‌سازی یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با استفاده از یک مدل هفت‌نقطه‌ای و به کمک روش حل تفاضل محدود پیشنهاد داده است.

در برخی از کارهای صورت‌گرفته، کارایی سیستم فتوولتاییک/حرارتی آبی با گردآورنده خورشیدی و ماژول فتوولتاییک مقایسه شده است. هوانگ و همکاران [۸] به صورت آزمایشگاهی، کارایی یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی را با یک آبگرمکن خورشیدی معمولی مقایسه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بازده صرفه‌جویی انرژی اولیه سیستم فتوولتاییک/حرارتی از آبگرمکن خورشیدی و سیستم فتوولتاییک بیشتر است. باتارای و همکاران [۹] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی صفحه و لوله و گردآورنده خورشیدی معمولی را شبیه‌سازی کرده‌اند. طبق بررسی آن‌ها بازده حرارتی گردآورنده خورشیدی تقریباً ۱۸ درصد بالاتر از سیستم فتوولتاییک/حرارتی است. آسته و همکاران [۱۰] یک گردآورنده فتوولتاییک/حرارتی آبی با پوشش شیشه‌ای، شامل فناوری فتوولتاییک فیلم نازک و جاذب صفحه تخت اتصال نوردی را طراحی و شبیه‌سازی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که فناوری فتوولتاییک/حرارتی دارای بازده کل بالاتر اما تولید الکتریسته کمتری نسبت به یک ماژول استاندارد فتوولتاییک است.

استفاده از پوشش شیشه‌ای و بررسی برخی دیگر از متغیرهای داخلی و خارجی مؤثر بر کارایی سیستم فتوولتاییک/حرارتی آبی نیز در منابع گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است. جی و همکاران [۱۱] تأثیر دبی جرمی و ضریب فشردگی را بر عملکرد یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی نصب‌شده بر دیوار به صورت عددی بررسی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که یک دبی جرمی بهینه وجود دارد که سیستم در آن دبی جرمی، به کارایی مطلوب دست می‌یابد. چو و همکاران [۱۲] تأثیر متغیرهای مختلف بر بازده انرژی و آگرژی یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی از نوع ترموسیفون بدون پوشش شیشه‌ای و همراه با آن را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کرده‌اند. نویسندگان نشان داده‌اند که از دیدگاه قانون اول، یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشش شیشه‌ای زمانی مناسب است که به دست آوردن بازده کل یا بازده حرارتی بیشتری مورد نظر باشد. صیح‌نمایان و همکاران [۱۳] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی را به صورت عددی مورد بررسی قرار داده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، قطر بهینه و سرعت جریان ورودی بهینه را برای دستیابی به بیشترین بازده آگرژی به دست آورده‌اند. همچنین نتایج مدل‌سازی آن‌ها تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی هوانگ و همکاران [۸] داشته

سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی ترکیبی از سیستم‌های فتوولتاییک و گردآورنده‌های خورشیدی هستند. این سیستم‌ها قادرند که به صورت هم‌زمان از تابش خورشیدی دریافتی، انرژی الکتریکی و حرارتی تولید کنند. طبق تحقیقاتی که تاکنون درباره این سیستم‌ها صورت گرفته، می‌توان گفت که این سیستم‌ها قادرند به راندمانی بالاتر از سیستم فتوولتاییک و سیستم حرارتی خورشیدی دست یابند. در زمینه سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی مطالعات آزمایشگاهی و عددی بسیاری صورت گرفته و پیکربندی‌های مختلفی از این سیستم‌ها بررسی شده است. کومار و همکاران [۱]، پیشینه و پیشرفت‌های کنونی فناوری‌های فتوولتاییک/حرارتی خورشیدی در سراسر جهان را بررسی کرده‌اند. مکی و همکاران [۲] در یک بررسی جامع طراحی‌های مختلف و متغیرهای عملیاتی مؤثر بر ظرفیت خنک‌کنندگی سیستم‌های فتوولتاییک را که منجر به بهبود عملکرد آن‌ها می‌شود، ارائه داده‌اند.

سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی هوایی کمترین هزینه کارکرد و حداقل استفاده از مواد را بین انواع سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی دارند و به همین سبب، مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته‌اند. شهسوار و عامری [۳] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی هوایی اتصال مستقیم را به صورت عددی و آزمایشگاهی تحت شرایط جابه‌جایی آزاد و اجباری و شهسوار و همکاران [۴] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی هوایی را به صورت عددی و آزمایشگاهی تحت شرایط جابه‌جایی آزاد، در حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن بررسی کرده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که قرار دادن پوشش شیشه‌ای بر روی ماژول‌های فتوولتاییک منجر به افزایش راندمان حرارتی و کاهش راندمان الکتریکی سیستم می‌شود. شهسوار و همکاران [۵] یک گردآورنده فتوولتاییک/حرارتی هوایی را به صورت عددی و آزمایشگاهی در حالت جابه‌جایی آزاد بررسی کرده‌اند. طبق نتایج آن‌ها بازده انرژی در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشش شیشه‌ای برای شش متغیر عملیاتی تابش، عمق کانال، طول گردآورنده و بازده سلول فتوولتاییک بهتر از سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشه‌ای است.

دسته‌ای دیگر از سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی، سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی آبی هستند که به علت کمک به توزیع دمای همگن در سطح ماژول فتوولتاییک، عملکرد بهتری نسبت به سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی هوایی دارند. آسته و همکاران [۶] مقاله مروری جامعی درباره سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی صفحه تخت آبی ارائه کرده و همه اجزای تشکیل‌دهنده آن را با معرفی متغیرهای مهم در

ارائه نشده است. در نتیجه هدف پژوهش حاضر، ارائه یک مدل ریاضی ساده برای شبیه‌سازی یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی صفحه تخت آبی با جریان اجباری و بررسی متغیرهای مؤثر بر عملکرد این سیستم از دیدگاه قانون اول و دوم، در دو حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن است.

### ۱. مدل‌سازی ریاضی

برای ارائه یک مدل ریاضی، سیستم فتوولتائیک/حرارتی نشان داده شده در شکل (۱) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. این سیستم شامل ماژول فتوولتائیک پلی‌کریستالی و جاذب صفحه و لوله است که از طریق یک لایه چسب بر روی هم قرار گرفته‌اند. جاذب صفحه و لوله از جوش دادن لوله مسی به جاذب صفحه تخت مسی ایجاد شده است و سیال خنک‌کن آب درون لوله‌ها جریان دارد. برای کاهش اتلافات حرارتی از ماژول فتوولتائیک به محیط می‌توان از یک پوشش شیشه‌ای که توسط شکاف هوا از ماژول فتوولتائیک جدا شده، استفاده کرد. برای نوشتن معادلات انرژی برای اجزای مختلف سیستم، المان دیفرانسیلی به طول  $dx$  و عرض  $w$  در نظر گرفته می‌شود. فرضیاتی که برای نوشتن معادلات انرژی استفاده شده، عبارت‌اند از: انتقال حرارت پایا و یک‌بعدی (در راستای  $z$ )، ثابت در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی همه اجزای سیستم فتوولتائیک/حرارتی آبی، چشم‌پوشی از ظرفیت گرمایی ویژه همه اجزا به جز آب درون لوله‌ها به دلیل ناچیز بودن آن در مقابل ظرفیت گرمایی آب. با این فرضیات معادلات انرژی برای هریک از اجزا نوشته می‌شود.

#### ۱.۲. سیستم فتوولتائیک/حرارتی با پوشش شیشه‌ای

معادلات موازنه انرژی برای هریک از اجزای سیستم فتوولتائیک/حرارتی به شرح زیر است:

- پوشش شیشه‌ای

$$I\alpha_g w dx = (h_{c,g-a} + h_{r,g-s})(T_g - T_a) w dx + (h_{r,pv-g} + h_{c,pv-g})(T_g - T_{pv}) w dx \quad (1)$$

در این رابطه، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در اثر باد با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$h_{c,g-a} = 3v_w + 2.8 \quad (2)$$

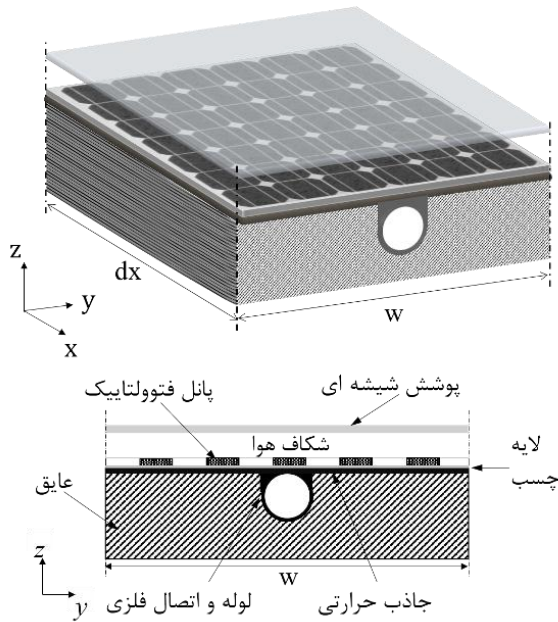
رابطه (۲) در مرجع [۲۲] برای مساحت  $0.5m^2$  پیشنهاد شده است، اما مراجع [۹، ۱۱، ۱۵ و ۱۷] برای مساحت بیشتر نیز از این رابطه استفاده کرده‌اند و بررسی نویسندگان نشان می‌دهد که تغییر این متغیر، تغییرات ناچیزی در دما ایجاد می‌کند. ضریب انتقال حرارت تابشی بین پوشش شیشه‌ای و آسمان به صورت زیر است [۲۲]:

است. توفک و همکاران [۱۴] به صورت آزمایشگاهی و عددی یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی صفحه و لوله با جاذب جدید صفحه و لوله فولادی گالوانیزه را مورد بررسی قرار داده‌اند. طبق نتایج آن‌ها تابش خورشید تأثیرگذارترین متغیر برشمرده شده است. فودهولی و همکاران [۱۵] کارایی حرارتی و الکتریکی یک گردآورنده فتوولتائیک/حرارتی آبی را تحت سطوح تابش مختلف محاسبه کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که جاذب ماریچج کارایی بیشتری در بالاترین سطح تابش و دبی جرمی دارد. اولاً و مارلتا [۱۶]، با بررسی یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی آبی از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک نشان داده‌اند که در هر نوع شرایط کارکردی، می‌توان دمای ورودی آب بهینه که منجر به حداکثر انرژی سیستم می‌شود را از طریق یک سیستم کنترل فرمان ساده محاسبه کرد. رجب و همکاران [۱۷]، یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی صفحه و لوله را بررسی کرده‌اند. نتایج عددی آن‌ها نشان می‌دهد که یک پوشش شیشه‌ای، انتخابی مناسب برای حفظ بازده الکتریکی و حرارتی است. همچنین در ادامه کارهای انجام شده، ضیاپور و همکاران [۱۸]، به صورت عددی اثر نوع جاذب و وانگ و همکاران [۱۹]، به صورت عددی و آزمایشگاهی اثر سایه قاب را بر روی سیستم فتوولتائیک/حرارتی بررسی کرده‌اند.

همچنین مقایسه عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک/حرارتی آبی مختلف نیز توجه محققان را به خود معطوف داشته است. کالوگرو و تربیانانگوستوپولوس [۲۰]، دو سیستم فتوولتائیک/حرارتی آبی شامل ماژول‌های فتوولتائیک سیلیکونی پلی‌کریستالی<sup>۱</sup> و سیلیکونی آمورف<sup>۲</sup> را در نرم افزار ترنسیس شبیه‌سازی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سیستم با سلول خورشیدی پلی‌کریستالی تولید الکتریسیته بیشتری دارد، اما سهم حرارتی خورشیدی آن اندکی کمتر است. دویی و تای [۲۱]، دو سیستم مختلف فتوولتائیک/حرارتی، یکی فتوولتائیک از نوع تک‌کریستالی و جاذب پوسته و لوله، و دیگری فتوولتائیک از نوع پلی‌کریستالی و جاذب کانال مستطیلی را مورد آزمایش قرار داده‌اند. آن‌ها در این بررسی به طور متوسط راندمان حرارتی و راندمان فتوولتائیک را برای ماژول فتوولتائیک/حرارتی نوع اول ۴۰/۷ و ۱۱/۸ درصد و برای نوع دوم به ترتیب ۳۹/۴ و ۱۱/۵ درصد به دست آورده‌اند.

در بین کارهایی که تاکنون صورت گرفته، اثر متغیرهای مختلف بر هر دو بازده انرژی و انرژی یک سیستم فتوولتائیک/حرارتی آبی با جریان اجباری به صورت هم‌زمان بررسی نشده است. همچنین مقایسه نتایج در دو حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن برای جریان اجباری

1. Polycrystalline Silicon
2. Amorphous Silicon



شکل (۱): المان در نظر گرفته برای موازنه انرژی

- جاذب حرارتی

$$h_{pv-abs} dA_{pv-abs} (T_{pv} - T_{abs}) = h_{abs-t} dA_{abs-t} (T_{abs} - T_t) + h_{abs-i} dA_{abs-i} (T_{abs} - T_i) \quad (11)$$

در این رابطه، ضریب انتقال حرارت بین جاذب و لوله و اتصال آن به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$h_{abs-t} dA_{abs-t} = \frac{8k_{abs} \delta_{abs}}{w - D_o} w dx \quad (12)$$

ضریب انتقال حرارت بین جاذب و لایه عایق از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$h_{abs-i} dA_{abs-i} = \frac{2k_i}{\delta_i} \left(1 - \frac{D_o}{w}\right) w dx \quad (13)$$

- لوله و اتصال آن

$$h_{abs-t} dA_{abs-t} (T_{abs} - T_t) + h_{pv-t} dA_{pv-t} (T_{pv} - T_t) = h_{t-w} dA_{t-w} (T_t - \bar{T}_w) + h_{t-i} dA_{t-i} (T_t - T_i) \quad (14)$$

در این رابطه، ضریب انتقال حرارت بین لوله و آب درون آن به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$h_{t-w} dA_{t-w} = \frac{w dx}{\frac{w}{h_w \pi D_i} + \frac{w}{c_b}} \quad (15)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی آب داخل لوله از رابطه (۱۶) به دست می‌آید:

$$h_w = Nu_w \frac{k_w}{D_i} \quad (16)$$

با توجه به طول لوله، جریان داخل لوله در حالت آرام از نظر هیدرودینامیکی توسعه یافته و از نظر حرارتی در حال توسعه است، اما

$$h_{r,g-s} = \frac{\epsilon_g \sigma (T_g^4 - T_s^4)}{(T_g - T_a)} \quad (3)$$

دمای معادل آسمان به شکل زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (4)$$

ضریب انتقال حرارت تابشی بین پوشش شیشه‌ای و صفحه فتوولتائیک از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۲]:

$$h_{r,pv-g} = \frac{\sigma (T_g^2 + T_{pv}^2) (T_g + T_{pv})}{\frac{1}{\epsilon_g} + \frac{1}{\epsilon_{pv}} - 1} \quad (5)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در فاصله هوایی بین پوشش شیشه‌ای و صفحه فتوولتائیک به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$h_{c,pv-g} = \frac{Nu_a k_a}{\delta_a} \quad (6)$$

عدد ناسلت<sup>۱</sup> لایه هوا از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۳]:

$$Nu_a = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \phi}\right]^* \left[1 - \frac{1708 (\sin 1.8 \phi)^{1.6}}{Ra \cos \phi}\right] + \left[\left(\frac{Ra \cos \phi}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^* \quad (7)$$

همه خصوصیات لایه هوا در دمای میانگین پوشش شیشه‌ای و صفحه فتوولتائیک محاسبه می‌شود. منظور از علامت \* در رابطه (۷) این است که اگر حاصل عبارات اشاره شده منفی شود، باید با صفر جایگزین شوند.

- مازول فتوولتائیک

$$I \tau_g \alpha_{pv} [1 - pa \times \eta_r (1 - \beta_r (T_{pv} - T_r))] w dx = (h_{r,pv-g} + h_{c,pv-g}) (T_{pv} - T_g) w dx + h_{pv-abs} dA_{pv-abs} (T_{pv} - T_{abs}) + h_{pv-t} dA_{pv-t} (T_{pv} - T_t) \quad (8)$$

در رابطه (۸) نشان‌دهنده ضریب فشردگی یعنی نسبت مساحت فتوولتائیک به مساحت گردآورنده است. همچنین در این رابطه، ضریب انتقال حرارت بین صفحه فتوولتائیک و جاذب به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷]:

$$h_{pv-abs} dA_{pv-abs} = \frac{k_{ad}}{\delta_{ad}} \left(1 - \frac{D_o}{w}\right) w dx \quad (9)$$

ضریب انتقال حرارت بین صفحه فتوولتائیک و لوله و اتصال آن از رابطه زیر به دست می‌آید [۷]:

$$h_{pv-t} dA_{pv-t} = \frac{\delta_{pv}}{w^2 + \frac{\delta_{ad} \delta_{pv} w}{8k_{pv} + \frac{k_{ad}}{D_o}}} w dx \quad (10)$$

ضریب انتقال حرارتی تابشی بین صفحه فتولتاییک و آسمان از رابطه (۲۶) به دست می آید [۲۲].

$$h_{r,pv-s} = \frac{\varepsilon_{pv} \sigma (T_{pv}^4 - T_s^4)}{(T_{pv} - T_a)} \quad (26)$$

موازنه انرژی برای اجزای دیگر یعنی روابط (۹) تا (۲۳) برای سیستم بدون پوشش شیشه‌ای نیز صادق است. در این پژوهش، نرم افزار متلب برای شبیه سازی به کار گرفته شده است. برای حل معادلات موازنه انرژی از روش رانگ کوتا<sup>۱</sup> مرتبه ۴ استفاده شده است. دمای میانگین آب درون لوله با استفاده از روش انتگرال عددی دوزنقه‌ای به شکل زیر محاسبه شده است:

$$\bar{T}_w = \frac{1}{L} \int_0^L T_w(x) dx \quad (27)$$

### ۳.۲. راندمان الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم فتولتاییک/حرارتی

توان خروجی ماژول فتولتاییک را می توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد [۷]:

$$\dot{E}_{pv} = I \tau_g \alpha_{pv} \times pa \times A_c \eta_r (1 - \beta_r (T_{pv} - T_r)) \quad (28)$$

برای سیستم فتولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشه‌ای در معادله (۲۸)، ضریب عبور شیشه  $\tau_g$  حذف می شود. برای محاسبه بازده حرارتی، الکتریکی و بازده کلی سیستم به ترتیب از روابط زیر استفاده می شود [۶]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} c_p (T_{w,out} - T_{w,in})}{IA_c} \quad (29)$$

$$\eta_{ele} = \frac{\dot{E}_{pv} - P_{pump}}{IA_c} \quad (30)$$

$$\eta_{PV/T} = \eta_{th} + \eta_{ele} \quad (31)$$

### ۴.۲. موازنه انرژی و راندمان انرژی سیستم فتولتاییک/حرارتی

موازنه انرژی برای یک سیستم فتولتاییک/حرارتی به شکل زیر نوشته می شود:

$$\sum \dot{X}_{in} - \sum \dot{X}_{out} = \sum \dot{X}_{dest} \quad (32)$$

که در آن، انرژی تابش به صورت زیر محاسبه می شود [۲۶]:

$$\dot{X}_{in} = \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_a}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}} \right] IA_c \quad (33)$$

در حالت جریان مغشوش، از نظر هیدرودینامیکی و حرارتی توسعه یافته است. عدد ناسلت برای جریان آرام در حال توسعه حرارتی داخل لوله به شکل زیر محاسبه می شود [۲۴]:

$$x^* = \frac{L}{\text{Re Pr } D_i} \quad (17)$$

$$\text{Nu}_w = \begin{cases} 1.953(x^*)^{-1/3} & x^* \leq 0.03 \\ 4.364 + \frac{0.0722}{x^*} & x^* > 0.03 \end{cases} \quad (18)$$

برای جریان مغشوش عدد ناسلت از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۵]:

$$\text{Nu}_w = \frac{(f/8)(\text{Re}-1000)\text{Pr}}{1+12.7(f/8)^{1/2}(\text{Pr}^{2/3}-1)} \quad (19)$$

ضریب انتقال حرارت بین لوله و لایه عایق از رابطه زیر به دست می آید [۷]:

$$h_{i-i} dA_{i-i} = \frac{2k_i \left( \frac{\pi}{2} + 1 \right) D_o}{\delta_i} \frac{D_o}{w} w dx \quad (20)$$

- لایه عایق

$$h_{abs-i} dA_{abs-i} (T_{abs} - T_i) + h_{i-i} dA_{i-i} (T_i - T_i) = h_{i-a} (T_i - T_a) w dx \quad (21)$$

در این رابطه، ضریب انتقال حرارت بین لایه عایق و محیط به صورت زیر است [۷]:

$$h_{i-a} = \frac{1}{\frac{\delta_i}{2k_i} + \frac{1}{h_{c,g-a}}} \quad (22)$$

- سیال خنک کن داخل لوله

$$h_{i-w} dA_{i-w} (T_i - \bar{T}_w) = \dot{m} c_p dT_w \quad (23)$$

### ۲.۲. سیستم فتولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشه‌ای

تابش در یک سیستم فتولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشه‌ای مستقیماً به صفحه فتولتاییک می رسد. معادلات موازنه انرژی این سیستم، روابط (۲۴) تا (۲۶) هستند که در مدل سازی ارائه شده، جایگزین روابط (۱) تا (۸) می شوند که برای موازنه انرژی با حضور پوشش شیشه‌ای است.

$$I \alpha_{pv} [1 - pa \times \eta_r (1 - \beta_r (T_{pv} - T_r))] w dx = (h_{c,pv-a} + h_{r,pv-s}) (T_{pv} - T_a) w dx \quad (24)$$

$$+ h_{pv-abs} dA_{pv-abs} (T_{pv} - T_{abs}) + h_{pv-t} dA_{pv-t} (T_{pv} - T_t)$$

در این رابطه، ضریب انتقال حرارت جابه جایی در اثر باد به صورت

زیر است [۲۲]:

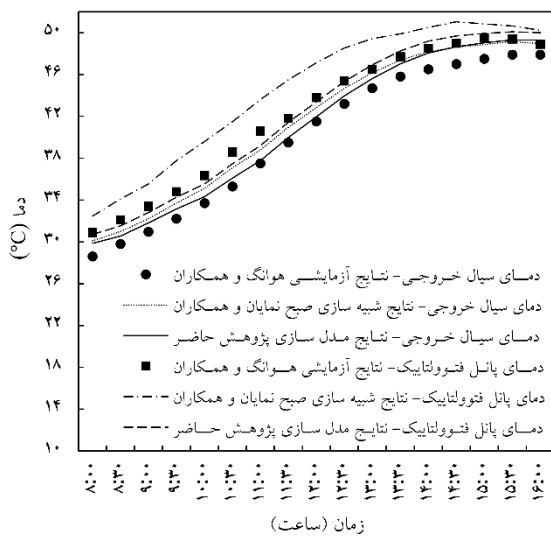
$$h_{c,pv-a} = 3v_w + 2.8 \quad (25)$$

## ۲. اعتبارسنجی

مدل پیشنهادشده در پژوهش حاضر، با استفاده از نتایج تجربی پژوهش هوانگ و همکاران [۸] و نتایج عددی پژوهش صبح‌نمایان و همکاران [۱۳] اعتبارسنجی شده است. در جدول (۱) شرایط مورد استفاده برای اعتبارسنجی مشاهده می‌شود. شکل (۲) مقایسه نتایج تجربی ارائه شده در پژوهش هوانگ [۸] و نتایج عددی ارائه شده در پژوهش صبح‌نمایان [۱۳] را با نتایج مدل‌سازی حاضر نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۲) تطابق مناسبی بین نتایج تجربی موجود در پژوهش هوانگ [۸] و نتایج حاصل از مدل حاضر وجود دارد. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی پژوهش حاضر نسبت به نتایج عددی مدل پیشنهاد شده توسط صبح‌نمایان [۱۳] به نتایج تجربی نزدیک‌تر است.

جدول (۱): مقادیر مورد استفاده برای اعتبارسنجی [۸ و ۱۳]

| متغیر            | مقدار         | واحد              |
|------------------|---------------|-------------------|
| ماژول فتوولتائیک | سولارکس MSX60 |                   |
| ضریب دمایی مرجع  | ۰/۰۰۴۵        | °C <sup>-1</sup>  |
| مساحت گردآورنده  | ۱/۱۰۵×۰/۴۶۷   | m <sup>2</sup>    |
| جنس کانال        | پلی کربنات    |                   |
| قطر هیدرولیکی    | ۰/۰۰۶         | m                 |
| فاصله کانال‌ها   | ۰/۰۱۲         | m                 |
| سرعت باد         | ۱             | m.s <sup>-1</sup> |



شکل (۲): تغییرات دما برحسب زمان روز (ساعت) به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده

## ۳. نتایج و بحث

در ادامه پس از اطمینان از صحت مدل ارائه شده، نتایج مدل‌سازی برای دو حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن با توجه به اطلاعات موجود در

در این رابطه،  $T_{sun}$  دمای تابش خورشید و برابر با ۶۰۰۰ کلین است [۵، ۶ و ۱۲]. آگرزری خروجی سیستم شامل آگرزری حرارتی و الکتریکی است:

$$\sum \dot{X}_{out} = \sum (\dot{X}_{thermal} + \dot{X}_{electrical}) \quad (34)$$

نرخ آگرزری حرارتی و الکتریکی به صورت زیر است [۶]:

$$\dot{X}_{thermal} = \dot{m} c_p (T_{w,out} - T_{w,in}) \left( 1 - \frac{T_a}{T_{w,out}} \right) \quad (35)$$

$$\dot{X}_{electrical} = \dot{E}_{PV} - P_{pump} \quad (36)$$

بازده آگرزری حرارتی، الکتریکی و بازده آگرزری کلی سیستم

به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{\epsilon}_{th} = \frac{\dot{X}_{thermal}}{\dot{X}_{in}} \quad (37)$$

$$\dot{\epsilon}_{ele} = \frac{\dot{X}_{electrical}}{\dot{X}_{in}} \quad (38)$$

$$\dot{\epsilon}_{PV/T} = \dot{\epsilon}_{th} + \dot{\epsilon}_{ele} \quad (39)$$

## ۵.۲. محاسبه توان پمپ

برای محاسبه افت فشار از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g (L \sin \phi + h_f) \quad (40)$$

در این رابطه،  $L \sin \phi$  فاصله عمودی بین ورودی و خروجی سیستم فتوولتائیک/حرارتی و  $h_f$  افت هد کل است که مجموع افت اصطکاکی در لوله و افت‌های موضعی است.

$$h_f = \frac{8m^2}{\rho^2 g \pi^2 D_i^4} \left( f \frac{L}{D_i} + K_1 + K_2 \right) \quad (41)$$

در این رابطه،  $K_1$  ضریب افت فرعی در ورودی لوله و  $K_2$  ضریب افت فرعی در خروجی لوله هستند که به ترتیب برابر ۰/۵ و یک در نظر گرفته می‌شوند [۲۷]. ضریب اصطکاک برای جریان آرام توسعه یافته هیدرودینامیکی را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد [۲۸]:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (42)$$

ضریب اصطکاک برای جریان مغشوش توسعه یافته هیدرودینامیکی عبارت است از [۲۵]:

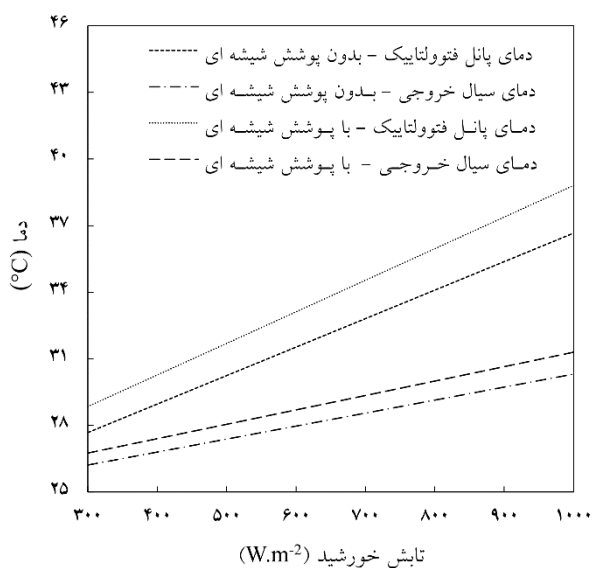
$$f = \frac{1}{(0.79 \ln(Re) - 1.64)^2} \quad (43)$$

توان مورد نیاز پمپ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

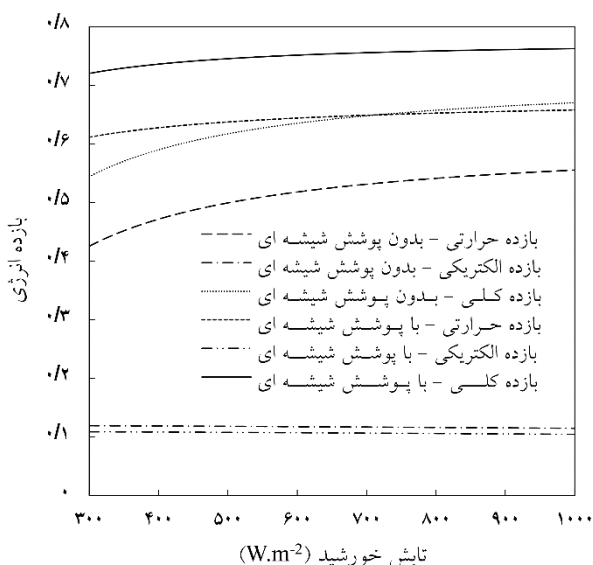
$$P_{pump} = \frac{\dot{m} \times \Delta P}{\rho \times \eta_{pump}} \quad (44)$$

در این رابطه،  $\dot{m}$  دبی جرمی در هر لوله و  $n$  تعداد لوله‌هاست.

شکل (۵) تأثیر میزان تابش را بر بازده انرژی نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) مشخص است که با افزایش تابش میزان انرژی دریافتی توسط ماژول فتوولتائیک افزایش می‌یابد، سلول‌های فتوولتائیک قادرند که طول موج‌های مشخصی از تابش دریافتی را به الکتریسیته تبدیل کنند و بقیه طول موج‌های تابش دریافتی صرف افزایش دمای ماژول فتوولتائیک می‌شوند و در نتیجه، میزان انتقال حرارت به سیال خروجی نیز افزایش می‌یابد، پس هر دو دمای ماژول فتوولتائیک و دمای خروجی سیال عامل افزایش می‌یابند و در نتیجه، راندمان الکتریکی کاهش و راندمان حرارتی افزایش می‌یابند. به دلیل اینکه میزان این افزایش بازده حرارتی بر کاهش بازده الکتریکی غلبه دارد، در نهایت با توجه به شکل (۴)، بازده کلی افزایش می‌یابد.



شکل (۳): اثر تابش بر دمای ماژول فتوولتائیک و دمای سیال خروجی



شکل (۴): اثر تابش بر بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی

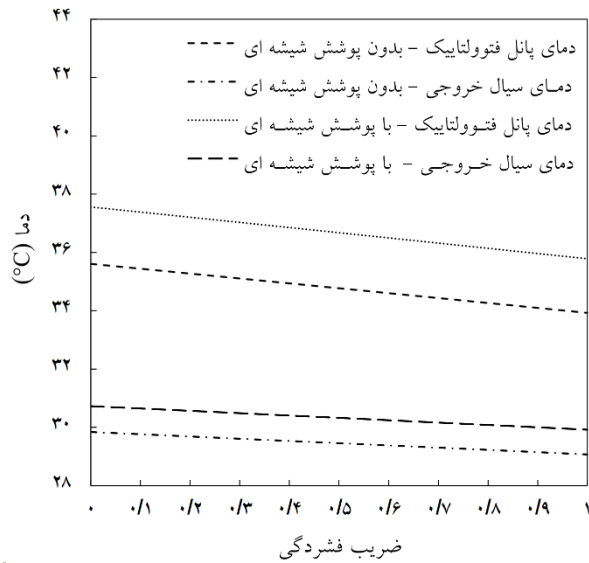
جدول (۲) ارائه شده است. برای بررسی اثر هریک از متغیرهای تابش، ضریب فشردگی، دبی جرمی و دمای محیط، متغیر مورد نظر تغییر داده شده و بقیه متغیرها مطابق با جدول (۲) ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۲): متغیرهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی [۱۵، ۱۷، ۲۱ و ۲۹]

| جزء             | متغیر                          | مقدار  | واحد              |
|-----------------|--------------------------------|--------|-------------------|
| پوشش شیشه‌ای    | ضخامت                          | ۰/۰۰۴  | m                 |
|                 | ضریب عبور                      | ۰/۹۲   |                   |
|                 | ضریب جذب                       | ۰/۰۴   |                   |
| صفحه فتوولتائیک | ضریب جذب                       | ۰/۹    |                   |
|                 | ضریب انتشار                    | ۰/۹    |                   |
|                 | ضریب هدایت حرارتی              | ۱۰۰    | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
|                 | بازده سلول مرجع                | ۱۵     | %                 |
|                 | ضریب دمایی بازده در شرایط مرجع | ۰/۰۰۴۵ | $K^{-1}$          |
|                 | دمای مرجع                      | ۲۹۸    | K                 |
|                 | صفحه جاذب (مسی)                | ۰/۵    | mm                |
|                 | ضریب هدایت حرارتی              | ۳۱۰    | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| لوله (مسی)      | قطر خارجی                      | ۰/۰۰۸  | m                 |
|                 | ضخامت                          | ۰/۰۰۱۲ | m                 |
|                 | طول                            | ۲      | m                 |
|                 | تعداد                          | ۱۰     |                   |
|                 | فاصله بین لوله ها              | ۰/۱    | m                 |
|                 | ضریب هدایت حرارتی              | ۳۱۰    | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| لایه عایق       | ضخامت                          | ۰/۰۵   | m                 |
|                 | ضریب هدایت حرارتی              | ۰/۰۳   | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| آب درون لوله    | دمای ورودی                     | ۲۹۸    | K                 |
| سایر متغیرها    | سرعت باد                       | ۱/۵    | $m.s^{-1}$        |
|                 | شیب گردآورنده                  | ۳۰°    |                   |
|                 | دبی جرمی کل                    | ۰/۰۵   | $kg.s^{-1}$       |
|                 | دمای محیط                      | ۲۵     | $^{\circ}C$       |
|                 | تابش                           | ۸۰۰    | $W.m^{-2}$        |
|                 | ضریب فشردگی                    | ۰/۹    |                   |
|                 | بازده پمپ                      | ۰/۸    |                   |

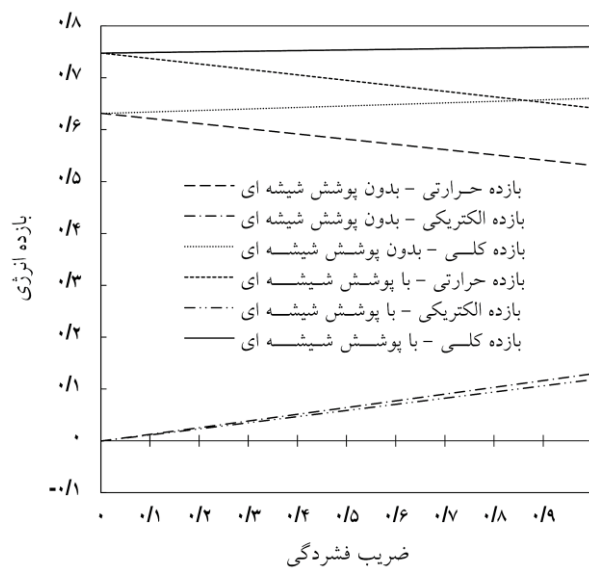
شکل (۳) تأثیر میزان تابش را بر دمای ماژول فتوولتائیک و دمای خروجی سیال عامل، شکل (۴) تأثیر میزان تابش را بر بازده انرژی، و

الکتریسیته شده و مقدار کمتری از آن به صورت حرارت به سیال عامل منتقل می شود.

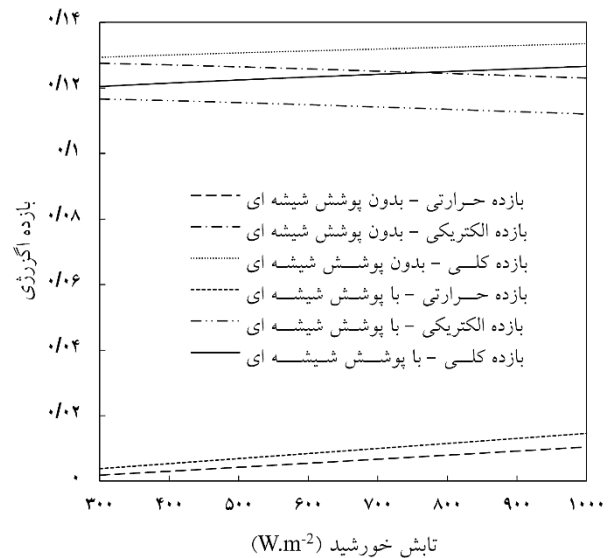


شکل (۶): اثر ضریب فشردگی بر دمای ماژول فتوولتائیک و دمای سیال خروجی

شکل (۷) و شکل (۸) به ترتیب تغییر بازده انرژی و اگزرژی را با ضریب فشردگی نشان می دهند. همان طور که از شکل ها مشخص است، بازده انرژی و اگزرژی حرارتی به دلیل کاهش دمای سیال عامل کاهش می یابند، در حالی که بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی به دلیل کاهش دمای ماژول فتوولتائیک و افزایش سطح فتوولتائیک افزایش می یابند. در نتیجه به دلیل افزایش قابل ملاحظه بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی در برابر کاهش بازده انرژی و اگزرژی حرارتی، بازده کلی انرژی و بازده کلی اگزرژی با افزایش ضریب فشردگی افزایش می یابند.



شکل (۷): اثر ضریب فشردگی بر بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی



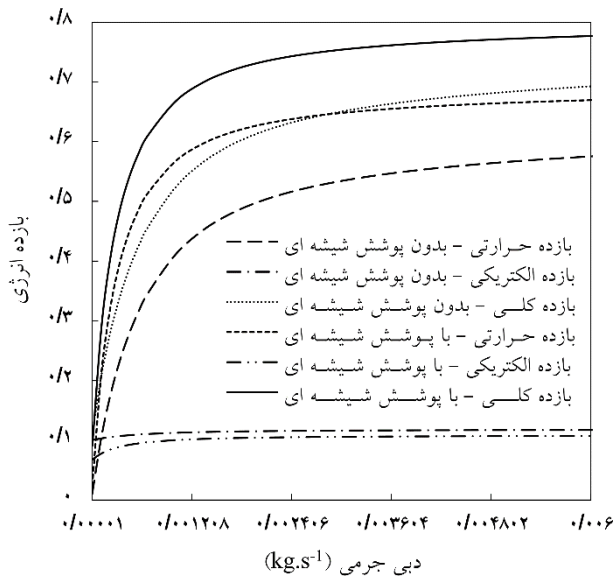
شکل (۸): اثر تابش بر بازده اگزرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی

استفاده از پوشش شیشه ای سبب می شود که اتلاف حرارت بین ماژول فتوولتائیک و محیط کاهش یابد و همچنین از تشعشع دریافتی نیز کمی کاسته شود که در نهایت دمای ماژول فتوولتائیک و دمای سیال خروجی در حالت با پوشش شیشه ای بیشتر از حالت بدون پوشش شیشه ای می شود. همین امر سبب می شود که با توجه به نتایج شکل (۴) و (۵)، بازده حرارتی سیستم با پوشش شیشه ای بیشتر و بازده الکتریکی آن کمتر از سیستم بدون پوشش شیشه ای باشد. با توجه به شکل ها مشخص است که در هر دو حالت با پوشش شیشه ای و بدون آن، بازده انرژی و اگزرژی حرارتی با تابش افزایش می یابند، چون میزان تابش بیشتری جذب ماژول می شود و در نتیجه، حرارت بیشتری به سیال عامل منتقل می شود و دمای آن افزایش می یابد، در حالی که بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی کاهش می یابند، زیرا افزایش دمای ماژول فتوولتائیک موجب کاهش توان الکتریکی خروجی با توجه به رابطه (۲۸) می شود. دلیل این امر کاهش شکاف انرژی بین لایه ظرفیت و رسانش ماده در اثر افزایش دماست. از آنجایی که از دیدگاه اگزرژی ارزش انرژی الکتریکی به دلیل کیفیت بالاتر آن بیشتر از انرژی حرارتی است، می توان گفت که سیستم با پوشش شیشه ای دارای بازده انرژی بیشتر و بازده اگزرژی کمتری در مقایسه با سیستم بدون پوشش شیشه ای است.

شکل (۶) تأثیر ضریب فشردگی را بر دمای ماژول فتوولتائیک و دمای سیال خروجی نشان می دهد. همان طور که از شکل مشخص است، با افزایش ضریب فشردگی دماها کاهش می یابند، زیرا با افزایش ضریب فشردگی میزان بیشتری از تابش دریافتی صرف تولید



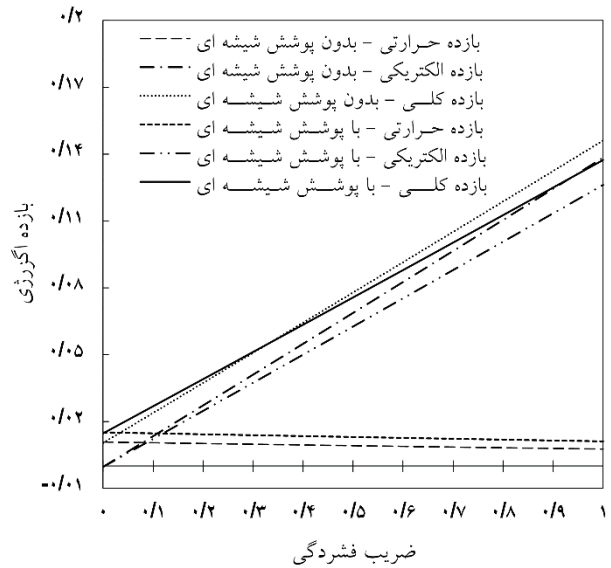
با توجه به شکل مشخص است که ابتدا با افزایش دبی جرمی هر دو دما به شدت کاهش می‌یابند، اما به تدریج از میزان کاهش کم می‌شود. با افزایش دبی جرمی نرخ انتقال حرارت به سیال عامل افزایش می‌یابد و در نتیجه، دمای ماژول فتوولتاییک کم می‌شود، اما چون دبی سیال داخل لوله نیز افزایش یافته، دمای سیال خروجی کاهش می‌یابد. در نتیجه کاهش دمای ماژول فتوولتاییک بازده الکتریکی افزایش می‌یابد و از طرف دیگر، افزایش دبی جرمی سبب افزایش بازده حرارتی می‌شود. این امر در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): اثر دبی جرمی بر بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتاییک/حرارتی

شکل (۱۱) تغییر بازده انرژی را با دبی جرمی نشان می‌دهد. بازده انرژی الکتریکی با افزایش دبی جرمی افزایش می‌یابد، این افزایش در دبی‌های جرمی کم چشمگیرتر است. بازده انرژی حرارتی در ابتدا به دلیل افزایش انتقال حرارت به سرعت افزایش می‌یابد، اما از نقطه‌ای به بعد اثر کاهش دمای سیال خروجی بر اثر افزایش انتقال حرارت غلبه می‌کند و باعث کاهش بازده انرژی حرارتی می‌شود. بازده انرژی کلی سیستم نیز که مجموع بازده انرژی حرارتی و الکتریکی است، با افزایش دبی جرمی ابتدا افزایش می‌یابد تا به یک دبی جرمی بهینه می‌رسد و سپس در اثر کاهش شدید در بازده انرژی حرارتی کاهش می‌یابد.

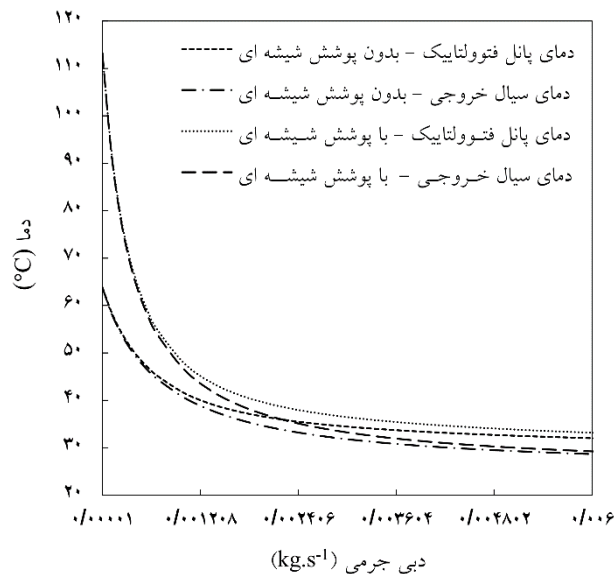
بازده انرژی کلی سیستم با پوشش شیشه‌ای تا دبی جرمی مشخصی بیشتر از سیستم بدون پوشش شیشه‌ای است و پس از آن روند برعکس می‌شود. دلیل این امر را این‌گونه می‌توان توضیح داد که



شکل (۸): اثر ضریب فشردگی بر بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتاییک/حرارتی

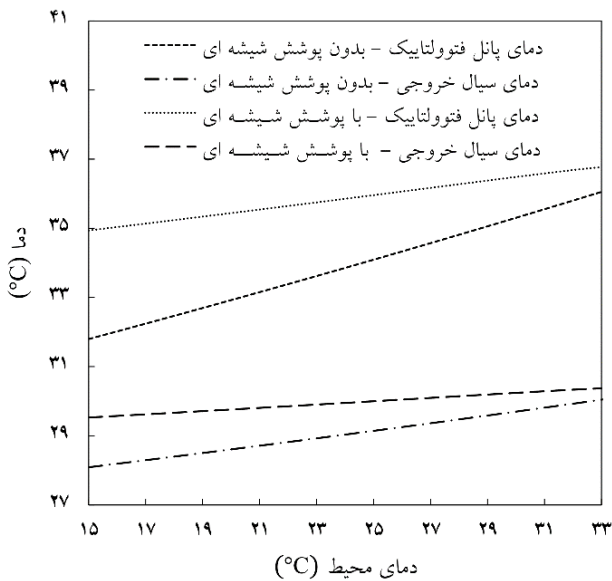
بازده انرژی سیستم با پوشش شیشه‌ای تا ضریب فشردگی حدود ۰/۳ بزرگ‌تر از سیستم بدون پوشش شیشه‌ای است و بعد از آن کوچک‌تر می‌شود. علت این امر نیز کاهش تفاوت بازده انرژی حرارتی در حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن به دلیل تفاوت دمای سیال خروجی و افزایش تفاوت بازده انرژی الکتریکی در این دو حالت به دلیل افزایش سطح ماژول فتوولتاییک با افزایش ضریب فشردگی است.

شکل (۹) تغییرات دمای ماژول فتوولتاییک و سیال خروجی را با دبی جرمی نشان می‌دهد.

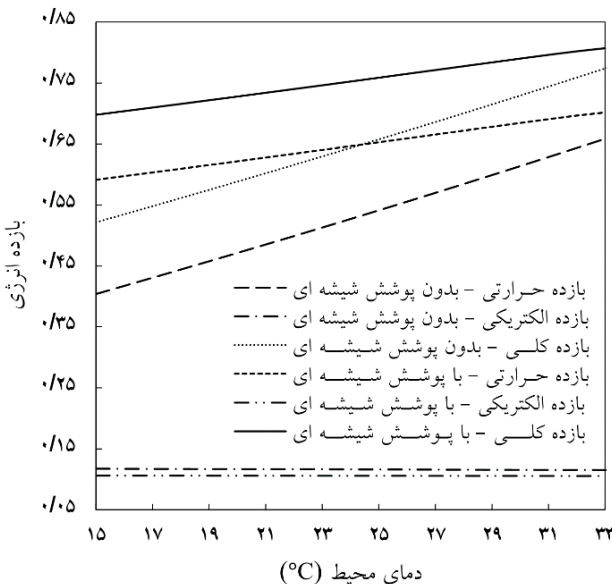


شکل (۹): اثر دبی جرمی بر دمای ماژول فتوولتاییک و دمای سیال خروجی

شکل (۱۳) و شکل (۱۴) به ترتیب تغییر بازده انرژی و آگزرژی را با دمای محیط نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل (۱۳) مشخص است، بازده انرژی حرارتی با افزایش دمای محیط به سبب افزایش دمای سیال خروجی افزایش می‌یابد، در حالی که بازده انرژی الکتریکی به دلیل افزایش دمای مازول فتوولتائیک با کاهش روبه‌رو می‌شود. بازده انرژی کلی سیستم که مجموع این دو بازده است، به علت سهم عمده بازده حرارتی در آن و غلبه میزان افزایش آن نسبت به کاهش در بازده الکتریکی افزایش می‌یابد.



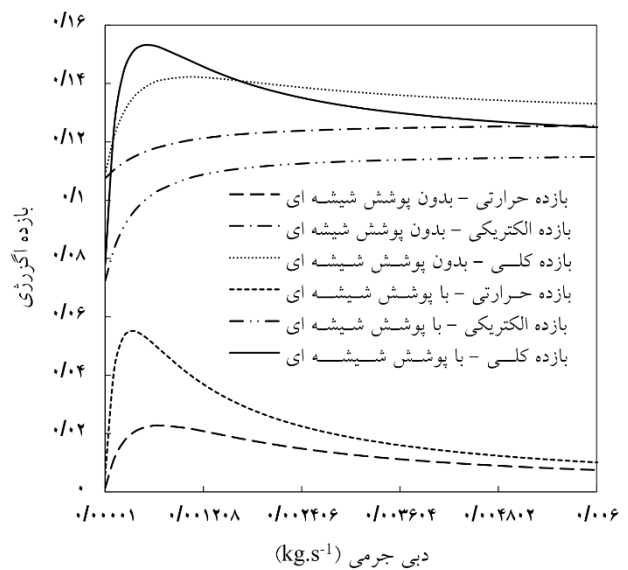
شکل (۱۲): اثر دمای محیط بر دمای مازول فتوولتائیک و دمای سیال خروجی



شکل (۱۳): اثر دمای محیط بر بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی

در دبی‌های جرمی پایین به علت دمای بسیار بالاتر سیال خروجی در سیستم با پوشش شیشه‌ای نسبت به سیستم بدون پوشش شیشه‌ای بازده آگزرژی حرارتی به اندازه قابل توجهی بیشتر است که منجر به بیشتر شدن بازده کلی آگزرژی در آن نیز می‌شود، اما با افزایش دبی جرمی این تفاوت دمای سیال خروجی در حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن کاهش می‌یابد و افزایش بازده آگزرژی الکتریکی در سیستم بدون پوشش شیشه‌ای بر افزایش بازده آگزرژی حرارتی در سیستم با پوشش شیشه‌ای غلبه می‌کند و منجر به بیشتر شدن بازده کلی آگزرژی سیستم بدون پوشش شیشه‌ای می‌شود.

همچنین با توجه به شکل مشخص است که دبی جرمی بهینه در سیستم با پوشش شیشه‌ای در دبی‌های جرمی کمتری که پمپ توان کمتری مصرف می‌کند رخ می‌دهد و همچنین بازده آگزرژی کلی بالاتری نسبت به سیستم بدون پوشش شیشه‌ای دارد. پس از این نظر می‌توان گفت از دیدگاه قانون دوم سیستم با پوشش شیشه‌ای در دبی جرمی بهینه مطلوب‌تر عمل می‌کند.



شکل (۱۴): اثر دبی جرمی بر بازده آگزرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتائیک/حرارتی

شکل (۱۲) تغییر دمای مازول فتوولتائیک و دمای سیال خروجی را با دمای محیط نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش دمای محیط مازول فتوولتائیک و دمای سیال خروجی افزایش می‌یابد، زیرا اتلاف حرارت به محیط کم می‌شود. همچنین با افزایش دمای محیط تفاوت دمای مازول فتوولتائیک و دمای خروجی سیال در حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون پوشش شیشه‌ای کاهش می‌یابد، زیرا تأثیر کاهش اتلافات حرارتی به محیط ناشی از وجود شیشه کم می‌شود.

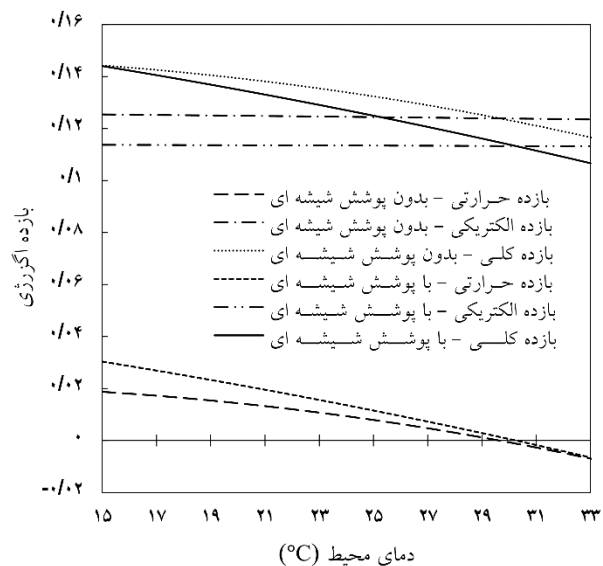
نتیجه یک دبی گرمی بهینه وجود دارد که به موجب آن بازده انرژی ماکزیمم می‌گردد و عملکرد سیستم از دیدگاه قانون دوم بهبود می‌یابد. افزایش دمای محیط موجب افزایش بازده انرژی به سبب افزایش دمای سیال خروجی و باعث کاهش بازده انرژی به علت افزایش دمای مازول فتوولتاییک می‌شود.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشش شیشه‌ای همواره بیشتر از سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشه‌ای است، اما بازده انرژی آن در اغلب شرایط کمتر از سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشه‌ای می‌باشد. در نتیجه می‌توان استدلال کرد که از دیدگاه قانون اول ترمودینامیک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشش شیشه‌ای عملکرد بهتری دارد، در حالیکه از دیدگاه قانون دوم سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشه‌ای مطلوب‌تر است.

### فهرست علائم

|                |   |
|----------------|---|
| $A$            | مساحت ( $m^2$ )                                   |
| $A_c$          | مساحت گردآورنده ( $m^2$ )                         |
| $c_b$          | هدایت حرارتی اتصال فلزی ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )     |
| $c_p$          | ظرفیت حرارتی ویژه ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )          |
| $D_i$          | قطر داخلی (m)                                     |
| $D_o$          | قطر خارجی (m)                                     |
| $\dot{E}_{pv}$ | توان خروجی مازول فتوولتاییک (W)                   |
| $f$            | ضریب اصطکاک                                       |
| $g$            | شتاب گرانش ( $m.s^{-2}$ )                         |
| $h_c$          | ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) |
| $h_r$          | ضریب انتقال حرارت تابشی ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )     |
| $h_f$          | افت هد  |
| $I$            | شدت تابش ورودی ( $W.m^{-2}$ )                     |
| $k$            | رسانایی حرارتی ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )              |
| $K$            | ضریب افت فرعی                                     |
| $L$            | طول سیستم (m)                                     |
| $\dot{m}$      | دبی گرمی ( $kg.s^{-1}$ )                          |
| $n$            | تعداد لوله‌ها                                     |

بازده انرژی الکتریکی نیز به علت افزایش دمای مازول فتوولتاییک کاهش می‌یابد. همچنین بازده انرژی حرارتی با افزایش دمای محیط و در نتیجه کاهش اختلاف بین دمای محیط و دمای سیال خروجی کم می‌شود و از جایی به بعد که دمای محیط بیشتر از دمای سیال خروجی می‌گردد، بازده انرژی حرارتی منفی می‌شود. البته باید توجه داشت این امر ناشی از ثابت در نظر گرفتن دمای سیال ورودی برابر با  $25^\circ C$  است. بازده انرژی کل نیز که مجموع بازده انرژی الکتریکی و حرارتی است، با افزایش دمای محیط کاهش می‌یابد. بازده کلی انرژی برای سیستم بدون پوشش شیشه‌ای بیشتر از سیستم با پوشش شیشه‌ای است و با افزایش دمای محیط تفاوت بین آن‌ها افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش دمای محیط تفاوت بازده انرژی حرارتی به علت کاهش تفاوت دمای سیال خروجی در حالت با پوشش شیشه‌ای و بدون آن کاهش می‌یابد و سهم انرژی الکتریکی در انرژی کل بیشتر می‌شود.



شکل (۱۴): اثر دمای محیط بر بازده انرژی حرارتی، الکتریکی و کلی سیستم فتوولتاییک/حرارتی

### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی صفحه تخت آبی مدل‌سازی شد و اثر متغیرهای تابش، دبی گرمی، ضریب فشردگی و دمای محیط بر دمای مازول فتوولتاییک، دمای سیال خروجی، بازده انرژی و بازده انرژی بررسی گردید. نتایج نشان داد که افزایش شدت تابش و ضریب فشردگی باعث افزایش بازده انرژی و انرژی می‌شود. همچنین افزایش دبی گرمی سبب افزایش بازده انرژی می‌شود؛ اما بازده انرژی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و در

|           |   |                        |   |
|-----------|---|------------------------|---|
| $\eta$    | بازده انرژی                               | Nu                     | عدد ناسلت   |
| $\eta_r$  | بازده سلول خورشیدی در شرایط مرجع          | pa                     | ضریب فشردگی   |
| $\sigma$  | ثابت استفان بولتزمن ( $W.m^{-2}.K^{-4}$ ) | P                      | فشار (Pa)   |
| $\tau$    | ضریب انتقال                               | $P_{pump}$             | توان پمپ (W)  |
| $\varphi$ | شیب گردآورنده                             | $P_r$                  | عدد پرائتل  |
| a         | هوا                                       | Ra                     | عدد رایلی   |
| abs       | جاذب حرارتی                               | Re                     | عدد رینولدز   |
| ad        | لایه چسب                                  | T                      | دما (K)   |
| b         | اتصال لوله                                | $T_s$                  | دمای آسمان (K)  |
| dest      | تخریب شده                                 | $T_{sun}$              | دمای خورشید (۶۰۰۰K)   |
| ele       | الکتریکی                                  | $v_w$                  | سرعت باد ( $m.s^{-1}$ )   |
| g         | پوشش شیشه‌ای                              | w                      | عرض کانال (m)   |
| i         | لایه عایق                                 | $\dot{X}$              | اگرزری (W)  |
| in        | ورودی                                     | $\dot{X}_{dest}$       | اگرزری تخریب شده (W)  |
| out       | خروجی                                     | $\dot{X}_{electrical}$ | اگرزری الکتریکی (W)   |
| pump      | پمپ                                       | $\dot{X}_{thermal}$    | اگرزری حرارتی (W)   |
| pv        | صفحه فتوولتائیک                           | <b>علائم یونانی</b>    |   |
| PV/T      | فتوولتائیک/حرارتی                         | $\alpha$               | ضریب جذب  |
| s         | آسمان                                     | $\beta_r$              | ضریب دمایی بازده سلول‌های فتوولتائیک در شرایط مرجع ( $K^{-1}$ ) |
| t         | لوله                                      | $\delta$               | ضخامت (m)   |
| th        | حرارتی                                    | $\Delta P$             | افت فشار (Pa)   |
| w         | سیال عامل انتقال حرارت                    | $\varepsilon$          | ضریب انتشار   |
|           |   | $\varepsilon$          | بازده اگرزری  |
|           |   | $\rho$                 | ضریب انعکاس، چگالی ( $kg.m^{-3}$ )                              |

## مراجع

- [1] Kumar, A., Baredar, P., Qureshi, U., "Historical and Recent Development of Photovoltaic Thermal (PVT) Technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 42, pp. 1428-1436, 2015.
- [2] Makki, A., Omer, S., Sabir, H., "Advancements in Hybrid Photovoltaic Systems for Enhanced Solar Cells Performance", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 41, pp. 658-684, 2015.
- [3] Shahsavari, A., Ameri, M., "Experimental Investigation and Modeling of a Direct-Coupled PV/T Air Collector", Solar Energy, Vol. 84, No. 11, pp. 1938-1958, 2010.

- [۴] شهسوار، امین، عامری، مهران، محمود آبادی، محمد مهدی، «شبه سازی و آزمایش سیستم های فتوولتائیک/حرارتی هوایی در حالت جابه جایی آزاد»، مجله امیر کبیر مهندسی مکانیک، سال ۴۳، شماره ۱، ص ۳۱-۴۰، تابستان ۱۳۹۰.
- [5] Shahsavari, A., Ameri, M., Gholampour, M., "Energy and Exergy Analysis of a Photovoltaic-Thermal Collector with Natural Air Flow", Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 134, No. 1, pp. 011014, 2012.
- [6] Aste, N., Del Pero, C., Leonforte, F., "Water Flat Plate PV-Thermal Collectors: a Review", Solar Energy, Vol. 102, pp. 98-115, 2014.
- [7] Chow, T., "Performance Analysis of Photovoltaic-Thermal Collector by Explicit Dynamic Model", Solar Energy, Vol. 75, No. 2, pp. 143-152, 2003.
- [8] Huang, B., Lin, T., Hung, W., Sun, F., "Performance Evaluation of Solar Photovoltaic/Thermal Systems", Solar energy, Vol. 70, No. 5, pp. 443-448, 2001.
- [9] Bhattarai, S., Oh, J. H., Euh, S. H., Kafle, G. K., Kim, D. H., "Simulation and Model Validation of Sheet and Tube Type Photovoltaic Thermal Solar System and Conventional Solar Collecting System in Transient States", Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 103, pp. 184-193, 2012.
- [10] Aste, N., Leonforte, F., Del Pero, C., "Design, Modeling and Performance Monitoring of a Photovoltaic-Thermal (PVT) Water Collector", Solar Energy, Vol. 112, pp. 85-99, 2015.
- [11] Ji, J., Han, J., Chow, T. T., Yi, H., Lu, J., He, W., Sun, W., "Effect of Fluid Flow and Packing Factor on Energy Performance of a Wall-Mounted Hybrid Photovoltaic/Water-Heating Collector System", Energy and Buildings, Vol. 38, No. 12, pp. 1380-1387, 2006.
- [12] Chow, T. T., Pei, G., Fong, K., Lin, Z., Chan, A., Ji, J., "Energy and Exergy Analysis of Photovoltaic-Thermal Collector with and without Glass Cover", Applied Energy, Vol. 86, No. 3, pp. 310-316, 2009.
- [13] Sobhnamayan, F., Sarhaddi, F., Alavi, M. A., Farahat, S., Yazdanpanahi, J., "Optimization of a Solar Photovoltaic Thermal (PV/T) Water Collector Based on Exergy Concept", Renewable Energy, Vol. 68, No. 0, pp. 356-365, 2014.
- [14] Touafek, K., Khelifa, A., Adouane, M., "Theoretical and Experimental Study of Sheet and Tubes Hybrid PVT Collector", Energy Conversion and Management, Vol. 80, pp. 71-77, 2014.
- [15] Fudholi, A., Sopian, K., Yazdi, M. H., Ruslan, M. H., Ibrahim, A., Kazem, H. A., "Performance Analysis of Photovoltaic Thermal (PVT) Water Collectors", Energy Conversion and Management, Vol. 78, pp. 641-651, 2014.
- [16] Evola, G., Marletta, L., "Exergy and Thermoeconomic Optimization of a Water-Cooled Glazed Hybrid Photovoltaic/Thermal (PVT) Collector", Solar Energy, Vol. 107, pp. 12-25, 2014.
- [17] Rejeb, O., Dhaou, H., Jemni, A., "A Numerical Investigation of a Photovoltaic Thermal (PV/T) Collector", Renewable Energy, Vol. 77, pp. 43-50, 2015.
- [18] Ziapour, B. M., Palideh, V., Baygan, M., "Performance Comparison of Four Passive Types of Photovoltaic-Thermal Systems", Energy Conversion and Management, Vol. 88, pp. 732-738, 2014.
- [19] Wang, Y., Pei, G., Zhang, L., "Effects of Frame Shadow on the PV Character of a Photovoltaic/Thermal System", Applied Energy, Vol. 130, pp. 326-332, 2014.
- [20] Kalogirou, S. A., Tripanagnostopoulos, Y., "Hybrid PV/T Solar Systems for Domestic Hot Water and Electricity Production", Energy Conversion and Management, Vol. 47, No. 18, pp. 3368-3382, 2006.
- [21] Dubey, S., Tay, A. A., "Testing of Two Different Types of Photovoltaic-Thermal (PVT) Modules with Heat Flow Pattern Under Tropical Climatic Conditions", Energy for Sustainable Development, Vol. 17, No. 1, pp. 1-12, 2013.
- [22] Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2nd edition, New York, John Wiley and Sons, Inc., 1991.
- [23] Hollands, K., Unny, T., Raithby, G., Konicek, L., "Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers", Journal of Heat Transfer, Vol. 98, No. 2, pp. 189-193, 1976.
- [24] Shah, R. K., London, A. L., Irvine, T. F., Hartnett, J. P., *Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data*, Elsevier Science, 2014.
- [25] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th Edition, John Wiley & Sons, 2011.
- [26] Petela, R., "Exergy of Heat Radiation", Journal of Heat Transfer, Vol. 86, No. 2, pp. 187-192, 1964.
- [27] Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J., *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons New York, 1985.
- [28] Kalogirou, S. A., *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Elsevier Science, 2013.
- [29] Zondag, H., De Vries, D. D., Van Helden, W., Van Zolingen, R., Van Steenhoven, A., "The Thermal and

*Electrical Yield of a PV-Thermal Collector*", Solar energy, Vol. 72, No. 2, pp. 113-128, 2002.