نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی

سال ششم، شمارهٔ دوم/ تابستان ۱۳۹۵/ صفحه ۴۶_۵۹

بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر عملکرد یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی صفحهٔ تخت آبی

فريده يزداني فرد'، مهران عامري منه، احسان ابراهيمنيا بجستان "

^۱ 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 ۱۳ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، ameri_mm@uk.ac.ir

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

چکیده: سیستم فتوولتاییک/حرارتی ترکیبی از فناوری فتوولتاییک و فناوری حرارتی خورشیدی است که بهوسیلهٔ آن، انرژی الکتریکی و حرارتی به طور همزمان تولید می شود. در این تحقیق، یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی صفحهٔ تخت آبی در دو حالت با پوشش شیشهای و بدون آن مدل سازی شده و کارایی سیستم فتوولتاییک/حرارتی از دیدگاه انرژی و اگزرژی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. تأثیر چهار متغیر تابش خورشید، دمای محیط، دبی جرمی و ضریب فشردگی بر راندمان انرژی و اگرزژی برسی ست. براساس نتایج به دست آمده پیشنهاد شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبار سنجی و تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده شده است. براساس نتایج به دست آمده پوشش شیشهاد در بیشتر موارد از نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبار سنجی و تطابق مناسبی بین نتایج مشاهده شده است. براساس نتایج به دست آمده پوشش شیشهاد در بیشتر موارد از سیستم بدون پوشش شیشه مهمواره بیشتر از سیستم بدون پوشش شیشه ای است؛ اما بازده اگزرژی سیستم بازده انرژی و پوشش شیشه ای در بیشتر موارد از سیستم بدون پوشش شیشه ای کمتر است. افزایش تابش و ضریب فشردگی سبب افزایش بازده انرژی و بازده اگزرژی می شود، اما افزایش دمای محیط سبب افزایش بازده انرژی و کاهش بازده اگزرژی می گردد. همچنین یک دبی جرمی بهینه وجود دارد که به ازای آن، بازده اگزرژی ماکزیمم می شود. این دبی بهینه برای سیستم بدون پوشش شیشه ای بیشتر از سیستم بای هر شیشه ای بدست می آی .

واژههای کلیدی: فتوولتاییک/حرارتی، فتوولتاییک، پوشش شیشهای، بازده انرژی، بازده اگزرژی.

^{*} نويسندهٔ مسئول

مقدمه

سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی ترکیبی از سیستمهای فتوولتاییک و گردآورند،های خورشیدی هستند. این سیستمها قادرند که بـهصورت همزمان از تابش خورشیدی دریافتی، انرژی الکتریکی و حرارتی تولید کنند. طبق تحقیقاتی که تاکنون دربارهٔ این سیستمها صورت گرفته، میتوان گفت که این سیستمها قادرند بـه رانـدمانی بالاتر از سیستم فتوولتاییک و سیستم حرارتی خورشیدی دست یابنـد. در زمینهٔ سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی مطالعات آزمایشگاهی و عـددی 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 جـامع طراحیهای کردهاند. مکی و همکاران [۲] در یک بررسی جـامع طراحیهای فناوریهای فتوولتاییک/حرارتی خورشیدی در سراسر جهان دا بررسی فناوریهای فتوولتاییک/حرارتی خورشیدی در سراسر محان دا بررسی کردهاند. مکی و همکاران [۲] در یک بررسی جـامع طراحیهای

سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی هوایی کمتـرین هزینـهٔ کـارکرد 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 بهصورت عددی و آزمایشگاهی تحت شرایط جابه جایی آزاد و اجباری و شهسوار و همکاران [۴] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی هوایی را بهصورت عددی و آزمایشگاهی تحت شرایط جابهجایی آزاد، در حالت با پوشش شیشهای و بدون آن بررسی کردهاند. آنها نشان دادهاند کـه قـرار دادن پوشـش شیشـهای بـر روی ماژول،های فتوولتاییک منجر به افـزایش رانـدمان حرارتـی و کـاهش راندمان الکتریکی سیستم میشود. شهسوار و همکاران [۵] یک گردآورندهٔ فتوولتاییـک/حرارتـی هـوایی را بـهصـورت عـددی و آزمایشگاهی در حالت جابهجایی آزاد بررسی کردهاند. طبق نتایج آنها بازده انرژی در سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشـش شیشـهای بـرای شش متغیر عملیاتی تابش، عمق کانال، طول گردآورنده و بازده سلول فتوولتاييک بهتر از سيستم فتوولتاييک/حرارتي بدون پوشش شيشـهاي

دستهای دیگر از سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی، سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی آبی هستند که بهعلت کمک به توزیع دمای همگن در سطح ماژول فتوولتاییک، عملکرد بهتری نسبت به سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی هوایی دارند. آسته و همکاران [۶] مقالهٔ مروری جامعی دربارهٔ سیستمهای فتوولتاییک/حرارتی صفحهٔ تخت آبی ارائه کرده و همهٔ اجزای تشکیلدهندهٔ آن را با معرفی متغیرهای مهم در

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 صورت گرفت، کارایی سیستم فتوولتاییک/حرارتی آبی با گردآورندهٔ 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 می دهد که بازده صرفه جویی انرژی اولیهٔ سیستم فتوولتاییک/حرارتی از آبگرمکن خورشیدی و سیستم فتوولتاییک بیشتر است. باتارای و همکاران [۹] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی صفحه و لوله و گردآورندهٔ خورشیدی معمولی را شبیه سازی کردهاند. طبق بررسی آن ها بازده حرارتی گردآورنده تورشیدی تقریباً ۱۸درصد بالاتر از سیستم فتوولتاییک/حرارتی است. آسته و همکاران [۱۰] یک گردآورندهٔ فتوولتاییک/حرارتی است. آسته و همکاران [۱۰] یک گردآورندهٔ فتوولتاییک/حرارتی است. موشش شیشهای، شامل فناوری فتوولتاییک فیلم نازک و جاذب صفحهٔ پوشش شیشهای، شامل فناوری فتوولتاییک فیلم نازک و جاذب صفحهٔ می دهد که فناوری زولتاییک/حرارتی دارای بازده کار بالاتر اما تولید می دهد که فناوری فتوولتاییک/حرارتی دارای بازده کار بالاتر اما تولید

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 فتوولتاييک/حرارتی نصبشده بـر ديـوار بـهصـورت عـددی بررسـی کردهاند. نتایج آنها نشان میدهد که یک دبی جرمی بهینه وجود دارد که سیستم در آن دبی جرمی، به کارایی مطلوب دست مییابد. چـو و همکاران [۱۲] تأثیر متغیرهای مختلف بر بازده انرژی و اگزرژی یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی از نوع ترموسیفون بدون پوشش شیشـهای و همراه با آن را بهصورت آزمایشگاهی و عـددی بررسـی کـردهانـد. نویسندگان نشان دادهاند که از دیدگاه قانون اول، یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشش شیشهای زمانی مناسب است که بهدست آوردن بازده کل یا بازده حرارتی بیشتری مورد نظر باشد. صبحنمایان و همکاران [۱۳] یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی را بهصورت عددی مورد بررسی قرار داده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، قطر بهینه و سرعت جریان ورودی بهینه را بـرای دسـتیابی بـه بيشترين بازده اگزرژي بهدست آوردهاند. همچنين نتايج مدلسازي آنها تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی هوانگ و همکاران [۸] داشته

است. توفک و همکاران [۱۴] بهصورت آزمایشگاهی و عـددی یـک سيستم فتوولتاييك/حرارتي صفحه و لوله با جـاذب جديـد صـفحه و لولهٔ فولادی گالوانیزه را مورد بررسی قرار دادهاند. طبق نتایج آنها تابش خورشید تأثیر گذارترین متغیر برشمرده شده است. فودهـولی و همکاران [1۵] کارایی حرارتے و الکتریکے یے گردآورندہ فتوولتاييك/حرارتمي أبمي را تحت سطوح تابش مختلف محاسبه کردهاند. نتایج آنها نشان داد که جاذب مارپیچ کارایی بیشتری در بالاترین سطح تابش و دبی جرمی دارد. اولا و مارلتا [۱۶]، بـا بررسـی یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی آبی از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک نشان دادهاند که در هر نوع شرایط کارکردی، می توان دمای ورودی آب بهینه که منجر به حداکثر اگزرژی سیستم میشود را از طریق یک سیستم کنترل فرمان ساده محاسبه کرد. رجب و همکاران [۱۷]، یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی صفحه و لوله را بررسمی کردهاند. نتایج عددی آنها نشان میدهد که یک پوشش شیشـهای، انتخـابی مناسـب برای حفظ بازده الکتریکی و حرارتی است. همچنین در ادامه کارهای انجام شده، ضیاپور و همکاران [۱۸]، بهصورت عددی اثر نوع جاذب و وانگ و همکاران [۱۹]، بهصورت عددی و آزمایشگاهی اثـر سـایه قاب را بر روی سیستم فتوولتاییک/حرارتی بررسی کردهاند.

همچنین مقایسه عملکرد سیستم های فتوولتاییک/حرارتی آبی مختلف نیز توجه محققان را به خود معطوف داشته است. کالوگیرو و تریپاناگنوستوپولوس [۲۰]، دو سیستم فتوولتاییک/حرارتی آبی شامل ماژولهای فتوولتاییک سیلیکونی پلیکریستالی^۱ و سیلیکونی آمورف^۲ را در نرم افزار ترنسیس شبیهسازی کردهاند. نتایج آنها نشان میدهد که سیستم با سلول خورشیدی پلیکریستالی تولید الکتریسیتهٔ بیشتری دارد، اما سهم حرارتی خورشیدی آن اندکی کمتر است. دوبی و تای [۲۱]، دو سیستم مختلف فتوولتاییک/حرارتی، یکی فتوولتاییک از نوع آنها در این بررسی به طور متوسط راندمان حرارتی و راندهان نقوولتاییک را برای ماژول فتوولتاییک/حرارتی نوع اول ۲۰/۲ و آنها در این بررسی به طور متوسط راندمان حرارتی و راندمان مازول دولتاییک/حرارتی دوع اول ۲۰/۲ و مازور داداد.

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

ارائه نشده است. در نتیجه هدف پژوهش حاضر، ارائهٔ یک مدل ریاضی ساده برای شبیهسازی یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی صفحهٔ 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 ارائهٔ یک مدل ریاضی، سیستم فتوولتاییک/حرارتی نشاندادهشده در شکل (۱) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. این سیستم شامل ماژول فتوولتاییک 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 لولهٔ مسی به جاذب صفحهٔ تخت مسی ایجاد شده است و سیال خنککن آب درون لوله ها جریان دارد. برای کاهش اتلافات حرارتی از ماژول فتوولتاییک به محیط می توان از یک پوشش شیشهای که توسط شکاف هوا از ماژول فتوولتاییک جدا شده، استفاده كرد. براي نوشتن معادلات انرژي براي اجزاي مختلف سيستم، المان دیفرانسیلی به طول dx و عرض w در نظر گرفته می شود. فرضیاتی که برای نوشتن معادلات انرژی استفاده شده، عبارتاند از: انتقال حرارت پایا و یکبعدی (در راستای z)، ثابت درنظر گرفتن خواص ترموفيزيكي همهٔ اجزاي سيستم فتوولتاييك/حرارتي أبي، چشمپوشيي از ظرفیت گرمایی ویژهٔ همهٔ اجزا بهجز آب درون لولهها بهدلیل ناچیز بودن آن در مقابل ظرفیت گرمایی آب. با این فرضیات معادلات انرژی برای هریک از اجزا نوشته می شود.

۱.۲ سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشش شیشهای

معــادلات موازنـــهٔ انـــرژی بـــرای هریــک از اجـــزای سیســتم فتوولتاییک/حرارتی به شرح زیر است:. _ یوشش شیشهای

$$I\alpha_{g}wdx = (h_{c,g-a} + h_{r,g-s})(T_{g} - T_{a})wdx + (h_{r,pv-g} + h_{c,pv-g})(T_{g} - T_{pv})wdx$$
(1)

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

$$h_{c.g-a} = 3v_w + 2.8 \tag{(Y)}$$

رابطهٔ (۲) در مرجع [۲۲] برای مساحت ²۰۳۰ پیشنهاد شده است، اما مراجع [۹، ۱۱، ۱۵و 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. ضریبانتقال حرارت تابشی بین پوشش شیشهای و آسمان به صورت زیر است [۲۲]:

^{1.} Polycrystalline Silicon

^{2.} Amorphous Silicon



ے جاذب حرارتی

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

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

$$())$$

در این رابطه، ضریبانتقال حرارت بین جاذب و لوله و اتصال آن بهصورت زیر محاسبه میشود [۷]:

$$h_{abs-t}dA_{abs-t} = \frac{8k_{abs}}{w - D_o} \frac{\delta_{abs}}{w} wdx \tag{11}$$

ضریبانتقال حرارت بین جاذب و لایهٔ عایق از رابطهٔ زیر بهدست می آید [۷]:

$$h_{abs-i} dA_{abs-i} = \frac{2k_i}{\delta_i} \left(1 - \frac{D_o}{w} \right) w dx \tag{17}$$

_ لوله و اتصال أن

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

در این رابطـه، ضریبانتقـال حـرارت بـین لولـه و آب درون آن بهصورت زیر محاسبه می شود [۲۲]:

$$h_{t-w}dA_{t-w} = \frac{wdx}{\frac{w}{h_w\pi D_i} + \frac{w}{c_b}}$$
(10)

$$h_{w} = \operatorname{Nu}_{w} \frac{k_{w}}{D_{i}} \tag{19}$$

با توجه به طول لوله، جریـان داخـل لولـه در حالـت آرام از نظـر هیدرودینامیکی توسعه یافته و از نظر حرارتی در حال توسعه است، اما

$$h_{r,g-s} = \frac{\mathcal{E}_g \sigma(T_g^4 - T_s^4)}{(T_g - T_a)} \tag{(4)}$$

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

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

$$h_{r,pv-g} = \frac{\sigma(T_g^2 + T_{pv}^2)(T_g + T_{pv})}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_{pv}} - 1}$$
(Δ)

$$h_{c,pv-g} = \frac{\mathrm{Nu}_a k_a}{\delta_a} \tag{9}$$

عدد ناسلت (لایهٔ هوا از رابطهٔ زیر به دست می آید [۲۳]:
$$Nu_{a} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{\text{Ra}\cos\varphi} \right]^{*} \left(1 - \frac{1708(\sin 1.8\varphi)^{1.6}}{\text{Ra}\cos\varphi} \right)$$

$$+\left[\left(\frac{\operatorname{Ra}\cos\varphi}{5830}\right)^{1/3} - 1\right]^{*}$$
(V)

همهٔ خصوصیات لایهٔ هوا در دمای میانگین پوشش شیشهای و صفحهٔ فتوولتاییک محاسبه میشود. منظور از علامت * در رابطهٔ (۷) این است که اگر حاصل عبارات اشارهشده منفی شود، باید با صفر جایگزین شوند.

_ ماژول فتوولتاييک

$$I\tau_{g}\alpha_{pv}[1-\operatorname{pa}\times\eta_{r}(1-\beta_{r}(T_{pv}-T_{r}))]wdx$$

$$=(h_{r,pv-g}+h_{c,pv-g})(T_{pv}-T_{g})wdx$$

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

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

در رابطـهٔ (۸) pa نشـاندهنـدهٔ ضـریب فشـردگی یعنـی نسـبت مساحت فتوولتاییک به مساحت گردآورنـده اسـت. همچنین در ایـن رابطه، ضریبانتقال حرارت بین صفحهٔ فتوولتاییک و جاذب بهصورت زیر محاسبه می شود [۷]:

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

ضریبانتقال حرارت بین صفحهٔ فتوولتاییک و لوله و اتصال آن از رابطهٔ زیر بهدست میآید [۷]:

$$h_{pv-t} dA_{pv-t} = \frac{\delta_{pv}}{\frac{w^2}{8k_{pv}} + \frac{\delta_{ad}}{k_{ad}} \frac{\delta_{pv}w}{D_o}} w dx \qquad (1\cdot)$$

^{1.} Nusselt Number

در حالت جریان مغشوش، از نظر هیـدرودینامیکی و حرارتـی توسـعه یافته است. عدد ناسلت بـرای جریـان آرام در حـال توسـعهٔ حرارتـی داخل لوله به شکل زیر محاسبه میشود [۲۴]:

$$\mathbf{x}^* = \frac{L}{\operatorname{Re}\operatorname{Pr} D_i} \tag{1V}$$

$$Nu_{_{W}} = \begin{cases} 1.953(x^{*})^{-1/3} & x^{*} \leq 0.03 \\ 4.364 + \frac{0.0722}{x^{*}} & x^{*} > 0.03 \end{cases} \tag{11}$$

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

$$Nu_{w} = \frac{(f/8)(Re-1000) Pr}{1+12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)}$$
(14)

ضریبانتقال حرارت بین لوله و لایهٔ عایق از رابطهٔ زیـر بـهدسـت می آید [۷]:

$$h_{i-i}dA_{i-i} = \frac{2k_i}{\delta_i} \left(\frac{\pi}{2} + 1\right) \frac{D_o}{w} w dx \tag{(7.)}$$

$$\begin{aligned} h_{abs-i} dA_{abs-i} (T_{abs} - T_i) + h_{t-i} dA_{t-i} (T_t - T_i) \\ &= h_{i-a} (T_i - T_a) w dx \end{aligned} \tag{Y1}$$

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

_ سيال خنککن داخل لوله

$$h_{t-w}dA_{t-w}(T_t - \overline{T}_w) = \dot{m}c_p dT_w$$
(TT)

۲.۲. سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشهای

تابش در یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشهای مستقیماً به صفحهٔ فتوولتاییک میرسد. معادلات موازنهٔ انرژی این سیستم، روابط (۲۲) تا (۲۶) هستند که در مدلسازی ارائهشده، جایگزین روابط (۱) تا (۸) میشوند که برای موازنهٔ انرژی با حضور پوشش شیشهای است.

$$\begin{split} I\alpha_{pv}[1-\mathrm{pa}\times\eta_{r}(1-\beta_{r}(T_{pv}-T_{r}))]wdx \\ &=(h_{c,pv-a}+h_{r,pv-s})(T_{pv}-T_{a})wdx \\ &+h_{pv-abs}dA_{pv-abs}(T_{pv}-T_{abs}) \\ &+h_{pv-t}dA_{pv-t}(T_{pv}-T_{t}) \end{split} \tag{74}$$

زير است [٢٢]:
$$h_{c,pv-a} = 3v_w + 2.8$$
 (٢۵)

$$h_{r,pv-s} = \frac{\mathcal{E}_{pv}\sigma(T_{pv}^4 - T_s^4)}{(T_{pv} - T_a)} \tag{(YF)}$$

موازنهٔ انرژی برای اجزای دیگر یعنی روابط (۹) تا (۲۳) برای سیستم بدون پوشش شیشهای نیز صادق است.

در این پژوهش، نرمافزار متلب برای شبیهسازی بهکار گرفته شـده است. برای حل معادلات موازنهٔ انرژی از روش رانگ کوتـا` مرتبـهٔ ۴ استفاده شده است. دمای میانگین آب درون لولـه بـا اسـتفاده از روش انتگرال عددی ذوزنقهای به شکل زیر محاسبه شده است:

$$\overline{T}_{w} = \frac{1}{L} \int_{0}^{L} T_{w}(x) dx \tag{YV}$$

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

برای سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشهای در معادلهٔ (۲۸)، ضریب عبور شیشه T_g حذف می شود. برای محاسبهٔ بازده حرارتی، الکتریکی و بازده کلی سیستم بهترتیب از روابط زیر استفاده می شود [۶]:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}c_p \left(T_{w,out} - T_{w,in}\right)}{IA_c} \tag{Y9}$$

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

 $\eta_{PV/T} = \eta_{ih} + \eta_{ele} \tag{(11)}$

$$\sum \dot{X}_{in} - \sum \dot{X}_{out} = \sum \dot{X}_{dest} \tag{(YY)}$$

$$\dot{X}_{in} = \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_a}{T_{sun}}\right)^4 - \frac{4T_a}{3T_{sun}}\right] IA_c \tag{(77)}$$

1. Runge-Kutta Method

در این رابطه، T_{sun} دمای تابش خورشید و برابر بـ ۶۰۰۰ کلـوین است [۵، ۶ و ۱۲]. اگزرژی خروجی سیستم شامل اگزرژی حرارتی و الکتریکی است:

$$\sum \dot{X}_{out} = \sum \left(\dot{X}_{thermal} + \dot{X}_{electrical} \right)$$
(٣4)
it is in the initial of the initial initiali

$$\dot{X}_{thermal} = \dot{m}c_{p}\left(T_{w,out} - T_{w,in}\right)\left(1 - \frac{T_{a}}{T_{w,out}}\right) \tag{73}$$

$$\dot{X}_{electrical} = \dot{E}_{PV} - P_{pump} \tag{(4.5)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{th} = \frac{\dot{X}_{thermal}}{\dot{X}_{in}} \tag{(YV)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{ele} = \frac{\dot{X}_{electrical}}{\dot{X}_{in}} \tag{(matrix})$$

$$\dot{\mathcal{E}}_{PV/T} = \dot{\mathcal{E}}_{th} + \dot{\mathcal{E}}_{ele} \tag{(4.4)}$$

۵.۲. محاسبة توان پمپ

برای محاسبهٔ افت فشار از رابطهٔ زیر استفاده می شود:
$$\Delta P = P_1 - P_2 =
ho g \left(L \sin \varphi + h_l
ight)$$
 (۴۰)

در ایـن رابطـه، Lsinφ فاصـلهٔ عمـودی بـین ورودی و خروجـی سیستم فتوولتاییک/حرارتی و h_l افت هد کل است کـه مجمـوع افـت اصطکاکی در لوله و افتهای موضعی است.

$$h_{l} = \frac{8\dot{m}^{2}}{\rho^{2}g\pi^{2}D_{i}^{4}} \left(f \frac{L}{D_{i}} + K_{1} + K_{2} \right)$$
(*1)

در این رابطه، K_I ضریب افت فرعی در ورودی لولـه و K₂ ضریب افت فرعی در خروجی لوله هستند که بهترتیب برابر ۰/۵ و یک در نظر گرفته میشوند [۲۷]. ضریب اصطکاک بـرای جریـان آرام توسـعهیافتـهٔ هیدرودینامیکی را می توان با استفاده از رابطهٔ زیر بهدست آورد [۲۸]:

$$f = \frac{64}{Re}$$
(fr)

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

$$f = \frac{1}{\left(0.79\ln(\text{Re}) - 1.64\right)^2}$$
(47)

$$P_{pump} = \frac{n\dot{m} \times \Delta P}{\rho \times \eta_{pump}} \tag{FF}$$

در این رابطه، *ش*دبی جرمی در هر لوله و n تعداد لولههاست.

۲. اعتبار سنجی
 مدل پیشنهادشده در پژوهش حاضر، با استفاده از نتایج تجربی پژوهش مدل پیشنهادشده در پژوهش حطح مایان و همکاران [۸] و نتایج عددی پژوهش صبح نمایان و همکاران [۳] اعتبار سنجی شده است. در جدول (۱) شرایط مورد استفاده برای اعتبار سنجی مشاهده می شود. شکل (۲) مقایسهٔ نتایج تجربی ارائه شده در پژوهش صبح نمایان [۳] را با نتایج مددی ارائه شده در پژوهش موانگ محمد مدل سازی حاضر نشان می دهد. با توجه به شکل (۲) تطابق مناسبی بین نتایج تجربی موانگ شدان از ۸] و نتایج عددی ارائه شده در پژوهش مدان از ۸] معایسهٔ نتایج تجربی ارائه شده در پژوهش موانگ مناسبی بین نتایج تجربی موجود در پژوهش هوانگ شکل (۲) تطابق مناسبی بین نتایج تجربی موجود در پژوهش هوانگ

رم و تعییم عصر رسان عصر و بود درد. سه مدل پیشنهاد شده شبیه سازی پژوهش حاضر نسبت به نتایج عددی مدل پیشنهاد شده توسط صبح مایان [۱۳] به نتایج تجربی نزدیک تر است.

جدول (۱): مقادیر مورد استفاده برای اعتبارسنجی [۸ و ۱۳]				
واحد	مقدار	متغير		
	سولاركس MSX60	ماژول فتوولتاييک		
°C ⁻¹	•/••40	ضريب دمايي مرجع		
m ²	1/1·0×·/49V	مساحت گردآورنده		
	پلى كربنات	جنس کانال		
m	•/••۶	قطر هيدروليكي		
m	•/•17	فاصله كانالها		
m.s ⁻¹	١	سرعت باد		



۳. نتایج و بحث

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

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 بقیهٔ متغیرها مطابق با جدول (۲) ثابت در نظر گرفته شدهاند.

جدول (۲): متغیرهای مورد نیاز برای شبیهسازی [۱۵، ۱۷، ۲۱ و ۲۹]			
واحد	مقدار	متغير	جزء
m	•/••*	ضخامت	پوشش شيشهاي
	•/97	ضريب عبور	
	•/•۴	ضريب جذب	
	٠/٩	ضريب جذب	صفحة فتوولتاييك
	٠/٩	ضريب انتشار	
$W.m^{-1}.K^{-1}$	١٠٠	ضريب هدايت حرارتي	
%	۱۵	بازده سلول مرجع	
K^{-1}	•/••*۵	ضریب دمایی بازده در شرایط مرجع	
Κ	291	دمای مرجع	
mm	۰/۵	ضخامت	صفحهٔ جاذب(مسی)
$W.m^{\text{-}1}.K^{\text{-}1}$	۳۱.	ضريب هدايت حرارتي	
m	•/••٨	قطر خارجي	لوله (مسي)
m	•/••17	ضخامت	
m	۲	طول	
	١٠	تعداد	
m	•/1	فاصله بين لوله ها	
$W.m^{-1}.K^{-1}$	۳۱.	ضريب هدايت حرارتي	
m	•/•۵	ضخامت	لاية عايق
$W.m^{-1}.K^{-1}$	•/•٣	ضريب هدايت حرارتي	
К	291	دمای ورودی	آب درون لوله
m.s ⁻¹	١/۵	سرعت باد	ساير متغيرها
	۳.°	شيب گردآورنده	
Kg.s ⁻¹	•/•۵	دبی جرمی کل	
°C	۲۵	دمای محیط	
W.m ⁻²	۸	تابش	
	٠/٩	ضريب فشردكي	
	•/A	بازده پمپ	

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

شکل (۵) تأثیر میزان تابش را بر بازده اگزرژی نشان میدهند. با توجه به شکل (۳) مشخص است که با افزایش تابش میزان انرژی دریافتی توسط ماژول فتوولتاییک افزایش مییابد، سلولهای فتوولتاییک قادرند که طول موجهای مشخصی از تابش دریافتی را به الکتریسیته تبدیل کنند و بقیهٔ طول موجهای تابش دریافتی صرف افزایش دمای ماژول فتوولتاییک میشوند و درنتیجه، میزان انتقال حرارت به سیال خروجی نیز افزایش مییابد، پس هر دو دمای ماژول فتوولتاییک و دمای خروجی سیال عامل افزایش مییابند و درنتیجه، 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 فتوولتاییک و دمای سیال خروجی





44

44

۴.

۳۸

۳۶

٣۴

٣٢

·/1 ·/7 ·/٣

دما (C) دما



دمای پانل فتوولتاییک – بدون پوشش شیشه ای ----

دمای سیال خروجی - بدون پوشش شیشه ای ----

دمای پانل فتـوولتاييک - با پوشـش شيشـه اي

دمای سیال خـروجـی - با پوشـش شیشـه ای - - -

منتقل مىشود.

الکتریسیته شده و مقدار کمتری از آن بهصورت حرارت به سیال عامل



استفاده از پوشش شیشهای سبب می شود که اتلاف حرارت بین ماژول فتوولتاییک و محیط کاهش یابد و همچنین از تشعشع دریافتی نیز کمی کاسته شود که درنهایت دمای ماژول فتوولتاییک و دمای سیال خروجی در حالت با پوشش شیشهای بیشتر از حالت بدون پوشش شیشهای می شود. همین امر سبب می شود که با توجه به نتایج شکل (۴) و (۵)، بازده حرارتی سیستم با پوشش شیشهای بیشتر و بازده الکتریکی آن کمتر از سیستم بدون پوشش شیشهای باشد.

با توجه به شکل ها مشخص است که در هر دو حالت با پوشش شیشهای و بدون آن، بازده انرژی و اگزرژی حرارتی با تابش افزایش می یابند، چون میزان تابش بیشتری جذب ماژول می شود و درنتیجه، 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 فتوولتاییک موجب کاهش توان الکتریکی خروجی با توجه به رابطهٔ (۲۸) می شود. دلیل این امر کاهش شکاف انرژی بین لایهٔ 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 مقایسه با سیستم بدون پوشش شیشه ای است.

شکل (۶) تأثیر ضریب فشردگی را بر دمای مازول فتوولتاییک و دمای سیال خروجی نشان میدهد. همانطور که از شکل مشخص است، با افزایش ضریب فشردگی دماها کاهش مییابند، زیرا با افزایش ضریب فشردگی میزان بیشتری از تابش دریافتی صرف تولید

خروجی شکل (۷) و شکل (۸) بهترتیب تغییر بازده انرژی و اگزرژی را با ضریب فشردگی نشان میدهند. همانطورکه از شکلها مشخص است، بازده انرژی و اگزرژی حرارتی بهدلیل کاهش دمای سیال عامل کاهش مییابند، درحالیکه بازده انرژی و اگزرژی الکتریکی بهدلیل کاهش دمای ماژول فتوولتاییک و افزایش سطح فتوولتاییک افزایش مییابند. درنتیجه بهدلیل 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 مییابند.

.14 .10 .19

ضريب فشردكي

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

•/v

·/A ·/9



www.SID.ir

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



شکل (۱۱) تغییر بازده اگزرژی را با دبی جرمی نشان میدهد. بازده اگزرژی الکتریکی با افزایش دبی جرمی افزایش می یابد، این افزایش در دبی های جرمی کم چشمگیرتر است. بازده اگزرژی حرارتی در ابتدا به دلیل افزایش انتقال حرارت به سرعت افزایش می یابد، اما از نقطه ای به بعد اثر کاهش دمای سیال خروجی بر اثر افزایش انتقال حرارت غلبه می کند و باعث کاهش بازده اگزرژی حرارتی می شود. بازده اگزرژی کلی سیستم نیز که مجموع بازده اگزرژی حرارتی و الکتریکی است، با افزایش دبی جرمی ابتدا افزایش می یابد تا به یک دبی جرمی بهینه می رسد و سپس در اثر کاهش شدید در بازده اگزرژی حرارتی کاهش می یابد.

بازده اگزرژی کلی سیستم با پوشش شیشهای تا دبی جرمی مشخصی بیشتر از سیستم بدون پوشش شیشهای است و پس از آن روند برعکس می شود. دلیل این امر را این گونه می توان توضیح داد که

۵۱ نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی



بازده اگزرژی سیستم با پوشش شیشهای تا ضریب فشردگی حدود ۸/۳ بزرگتر از سیستم بدون پوشش شیشهای است و بعد از آن کوچکتر میشود. علت این امر نیز کاهش تفاوت بازده اگزرژی حرارتی در حالت با پوشش شیشهای و بدون آن بهدلیل کاهش تفاوت دمای سیال خروجی و افزایش تفاوت بازده اگزرژی الکتریکی در این دو حالت بهدلیل افزایش سطح ماژول فتوولتاییک با افزایش ضریب فشردگی است.

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



در دبیهای جرمی پایین به علت دمای بسیار بالاتر سیال خروجی در سیستم با پوشش شیشهای نسبت به سیستم بدون پوشش شیشهای بازده اگزرژی حرارتی به اندازهٔ قابل توجهی بیشتر است که منجر به بیشتر شدن بازده کلی اگزرژی در آن نیز می شود، اما با افزایش دبی جرمی این تفاوت دمای سیال خروجی در حالت با پوشش شیشهای و بدون آن کاهش می یابد و افزایش بازده اگزرژی الکتریکی در سیستم بدون پوشش شیشهای بر افزایش بازده اگزرژی حرارتی در سیستم با پوشش شیشهای غلبه می کند و منجر به بیشتر شدن بازده کلی اگزرژی سیستم بدون پوشش شیشهای می شود.

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 اگزرژی کلی بالاتری نسبت به سیستم بدون پوشش شیشهای دارد. پس از این نظر می توان گفت از دیدگاه قانون دوم سیستم با پوشش شیشهای در دبی جرمی بهینه مطلوب تر عمل میکند.



شکل (۱۲) تغییر دمای ماژول فتوولتاییک و دمای سیال خروجی را با دمای محیط نشان می دهد. مشخص است که با افزایش دمای محیط دمای ماژول فتوولتاییک و دمای سیال خروجی افزایش می یابد، زیرا اتلاف حرارت به محیط کم می شود. همچنین با افزایش دمای محیط تفاوت دمای ماژول فتوولتاییک و دمای خروجی سیال در حالت با پوشش شیشهای و بدون پوشش شیشهای کاهش می یابد، زیرا تأثیر کاهش اتلافات حرارتی به محیط ناشی از وجود شیشه کم می شود.

شکل (۱۳) و شکل (۱۴) بهترتیب تغییر بازده انرژی و اگزرژی را با دمای محیط نشان میدهند. همان طور 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 بهدلیل افزایش دمای ماژول فتوولتاییک با کاهش روبه و می شود. بازده انرژی کلی سیستم که مجموع این دو بازده است، به علت سهم عمدهٔ بازده حرارتی در آن و غلبهٔ میزان افزایش آن نسبت به کاهش در بازده الکتریکی افزایش مییابد.



بازده اگزرژی الکتریکی نیز بهعلت افزایش دمای ماژول فتوولتاییک کاهش می یابد. همچنین بازده اگزرژی حرارتی با افزایش دمای محیط و در نتیجه کاهش اختلاف بین دمای محیط و دمای سیال خروجی کم می شود و از جایی به بعد که دمای محیط بیشتر از دمای سیال خروجی می گردد، بازده اگزرژی حرارتی منفی می شود. البته باید توجه داشت این امر ناشی از ثابت درنظر گرفتن دمای سیال ورودی برابر با ۲۵°۲ است. بازده اگزرژی کل نیز که مجموع بازده اگزرژی الکتریکی و حرارتی است، با افزایش دمای محیط کاهش می یابد. بازده پوشش شیشهای است و با افزایش دمای محیط تفاوت بین آنها افزایش می یابد، زیرا با افزایش دمای محیط تفاوت بین آنها حرارتی به علت کاهش تفاوت دمای سیال خروجی در حالت با پوشش شیشهای و بدون آن کاهش می یابد و سهم اگزرژی الکتریکی در اگزرژی کل بیشتر می شود.



۴. نتیجه گیری

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

نتیجه یک دبی جرمی بهینه وجود دارد که به موجب آن بازده اگزرژی ماکزیمم می گردد 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 اگزرژی بهعلت افزایش دمای ماژول فتوولتاییک می شود.

همچنین نتایح نشان میدهد که بازده انرژی سیستم فتوولتاییک/حرارتی با پوشش شیشهای همواره بیشتر از سیستم فتوولتاییک/حرارتی بدون پوشش شیشهای است، اما بازده اگزرژی 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.

لائم	فهرست ع
مساحت (m ²)	A
مساحت گردآورنده (m ²)	A_{c}
هدایت حرارتی اتصال فلزی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	C _b
ظرفیت حرارتی ویژه (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	C _p
قطر داخلی (m)	D_i
قطر خارجی (m)	D_o
توان خروجی ماژول فتوولتاییک (W)	$\dot{E}_{_{pv}}$
ضريب اصطكاك	f
شتاب گرانش (m.s ⁻²)	g
ضريبانتقال حرارت جابهجايي ('.m ⁻² .K	h_{c}
ضريبانتقال حرارت تابشي (W.m ⁻² .K ⁻¹)	h_r
افت هد	h_l
شدت تابش ورودی (W.m ⁻²)	Ι
رسانايي حرارتي (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	k
ضريب افت فرعي	K
طول سیستم (m)	L
a -1.	

(W

- (kg.s^{-1}) دبی جرمی \dot{m}
 - n تعداد لولهها

۵۷

مرجع

بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر عملکرد یک سیستم فتوولتاییک/حرارتی...

ر ضريبانتقال

abs جاذب حرارتی

ad لايه چسب b اتصال لوله

dest تخريب شده

ele الکتریکی

i لايه عايق

in ورودی

out خروجی

pump پمپ

pv

g پوشش شیشهای

صفحه فتوولتاييك

س سیال عامل انتقال حرارت W

PV/T فتوولتاييك/حرارتي

s آسمان

t لوله

th حرارتی

a هوا

ø شيب گردآورنده

σ ثابت استفان بولتزمن (W.m⁻².K⁻⁴)

فريب فشردگی ورشيدی در شرايط
$$\eta_r$$

(K) دمای اسمان
$$T_s$$

) اگزرژی حرارتی
$$\dot{X}_{thermal}$$

علائم يوناني

$$(ext{kg.m}^{ ext{-3}})$$
 ضریب انعکاس، چگالی ho

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] Shahsavar, 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، «شبیه سازی و آزمایش سیستم های فتوولتاییک/حرارتی هوایی در حالت جابهجایی آزاد»، مجله امیر کبیر مهندسی مکانیک، سال ۴۳، شماره ۱، ص.۳۱–۴۰، تابستان ۱۳۹۰.
- [5] Shahsavar, 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.