



مقایسه تئوری عملکرد حرارتی و الکتریکی طرح‌های مختلف کلکتور فتوولتائیک - حرارتی نوع ورق و لوله برای سیال آب

سید امیر به‌مونس، فرزاد جعفر کاظمی*

دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۹
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۹/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۲۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۱/۰۳

کلمات کلیدی:

مدول فتوولتائیک،
کلکتور خورشیدی،
کلکتور فتوولتائیک - حرارتی
راندمان الکتریکی،
راندمان حرارتی.

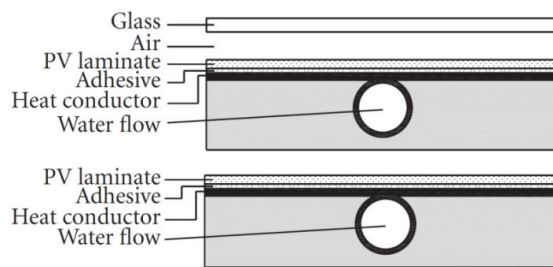
خلاصه: هدف از این مقاله، مقایسه عملکرد الکتریکی و حرارتی طرح‌های مختلفی از کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی است. مزیت مهم کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی نسبت به مدول‌های فتوولتائیک مرسوم، کاهش دمای مدول و افزایش راندمان تولید الکتریسیته آن است. از طرفی استفاده از این روش منجر به تولید حرارت و الکتریسیته در یک دستگاه و در نتیجه کاهش سطح مورد نیاز برای نصب کلکتور و مدول می‌شود. در تحقیق حاضر راندمان الکتریکی و حرارتی چند طرح متفاوت از یک کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی که از آب برای خنک کردن آن استفاده شده مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بررسی و تعیین اثرات پارامترهای هندسی بر عملکرد کلکتور فتوولتائیک - حرارتی، مدل‌سازی حرارتی مدول فتوولتائیک و هشت طرح متفاوت از کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی نوع ورق و لوله با طرح‌های لوله مارپیچی (مقطع گرد) و لوله موازی (مقاطع گرد، مربعی و مستطیلی) به صورت تئوری و به کمک نرم‌افزار متلب انجام شده است. بر طبق نتایج به دست آمده از این تحقیق، طرح ورق و لوله با مقطع گرد کمترین و مقطع مستطیلی دارای بیشترین راندمان حرارتی و کل است. همچنین وجود پوشش شیشه‌ای سبب کاهش راندمان الکتریکی و افزایش راندمان حرارتی و انرژی حرارتی کل می‌شود.

۱- مقدمه

است بنابراین عملکرد حرارتی و الکتریکی یک کلکتور پی‌وی تی نوع مایع به طراحی مناسب جاذب بستگی دارد. در شکل ۱ شماتیک مقطع عرضی دو نمونه کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی با سیال عامل آب نشان داده شده است. شکل بالایی نشان‌دهنده یک نمونه کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی دارای پوشش شیشه‌ای و شکل پایینی فاقد پوشش است

یکی از مشکلات مدول‌های فتوولتائیک افزایش قابل توجه دمای سطح آن‌ها در اثر تابش خورشیدی است. این افزایش دما بسته به نوع مدول، می‌تواند باعث کاهش راندمان تولید الکتریسیته شود. یکی از روش‌های کاهش دمای مدول‌های فتوولتائیک، دفع حرارت از پشت مدول به‌واسطه یک سیال هم‌چون آب یا هوا است. به وسایلی که بر این مبنا عمل می‌کند کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی (پی‌وی تی) گفته می‌شود. راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک با افزایش دمای سلول‌های خورشیدی در آن‌ها کاهش می‌یابد بنابراین با ایده کلکتور پی‌وی تی، می‌توان این راندمان را به‌واسطه گردش یک سیال با دمای پایین‌تر بهبود بخشید. معمولاً کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی با سیال عامل آب از سلول فتوولتائیک سیلیکونی به همراه کلکتور حرارتی (ورق فلزی متصل شده به لوله‌های گردش آب) به منظور جلوگیری از تماس مستقیم سیال با سطح پشت مدول فتوولتائیک ساخته می‌شوند. جاذب (ورق - لوله) به دلیل دفع حرارت از مدول فتوولتائیک به سیال بسیار حائز اهمیت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f_jafarkazemi@azad.ac.ir



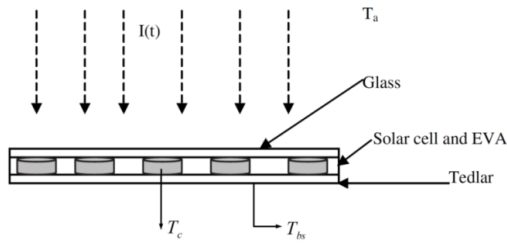
شکل ۱. نمای مقطع عرضی کلکتور پی‌وی‌تی نوع ورق و لوله پوشش‌دار و بدون پوشش [۱]

Fig. 1. Cross-section of glazed and unglazed sheet and tube PV/T collector [1]

کلکتور حرارتی نوع ورق - لوله و نوع دوم شامل مدول سیلیکونی پلی کریستالی یکپارچه شده با کلکتور حرارتی نوع صفحه موازی را تحت شرایط آب و هوای گرمسیری سنگاپور ارزیابی کردند. در آزمایش آن‌ها، راندمان حرارتی و الکتریکی متوسط کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی نوع اول به ترتیب برابر ۴۰/۷٪ و ۱۱/۸٪ و برای نوع دوم برابر ۳۹/۴٪ و ۱۱٪ حاصل شد. همچنین بازده الکتریکی مدول فتوولتائیک نیز در شرایط وجود و عدم وجود کلکتور حرارتی مقایسه شد و مشخص گردید که میانگین بازده الکتریکی کلکتور پی‌وی‌تی حدود ۰/۴٪ بالاتر از مدول فتوولتائیک عادی است. اوساما رجب و همکاران [۱۴] به صورت عددی یک کلکتور پی‌وی‌تی نوع ورق و لوله را تحلیل کردند و یک مدل ریاضی را برای پیش‌بینی رفتار دینامیکی کلکتور بر اساس تعادل انرژی شش مؤلفه اصلی (پوشش شفاف، مدول فتوولتائیک، جاذب، لوله، سیال و عایق) توسعه دادند که نتایج حاصل توافق خوبی را با مقادیر تجربی نشان می‌داد. جیمز آلن و همکاران [۱۵] دریافتند که کلکتور پی‌وی‌تی نوع مارپیچی، بالاترین بازده ترکیبی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها داراست. ایندراجیت سینگ و همکاران [۱۶] از یک مدل شبیه‌ساز و توسعه یافته ریاضی برای ارزیابی عملکرد کلکتور پی‌وی‌تی ساخته شده با مدول فیلم نازک و جاذب حلزونی شکل استفاده کردند. و تأثیر پارامترهای مختلف بر راندمان حرارتی و الکتریکی کلکتور پی‌وی‌تی را به دست آوردند. حسین کاظم [۱۷] عملکرد الکتریکی کلکتور پی‌وی‌تی و مدول فتوولتائیک را تحت تاثیر شرایط محیطی و تابش خورشیدی در طی سه روز آزمایش مقایسه کرد و نشان داد که کلکتور پی‌وی‌تی عملکرد الکتریکی مناسب‌تری دارد. همچنین توان الکتریکی خروجی مدول پی‌وی‌تی، ۶٪ بالاتر از مدول فتوولتائیک مجزا است.

بر طبق بررسی‌های انجام شده تاکنون تحقیقات اندکی در خصوص مقایسه عملکرد حرارتی و الکتریکی طرح‌های متفاوت از کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی نوع ورق - لوله در حالت دارای پوشش (شیشه) و بدون پوشش انجام شده است. در این تحقیق، مدل‌سازی حرارتی مدول فتوولتائیک و ۸ نمونه متفاوت از کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی پی‌وی‌تی بدون پوشش و دارای یک پوشش با سیال عامل آب به کمک معادلات تعادل انرژی انجام شده و تاثیر پارامترهای متفاوت هندسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. محاسبات تئوری با نرم‌افزار متلب انجام شد. داده‌های آب و هوایی (میزان تابش،

است. فلوجوتز [۴] تعمیمی از مدل هاتل - ویلیر [۵] را برای تحلیل سیستم‌های پی‌وی‌تی پیشنهاد کرد و در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که برای مقاصد عملی، مقادیر به کار رفته در کلکتور فتوولتائیک - حرارتی می‌توانند مشابه همان مقادیر در کلکتورهای حرارتی در نظر گرفته شوند. برگنی و لوویک [۶] مدلی مشابه مدل دافی و بکمن [۷] ارائه دادند که این مدل راندمان کل کلکتور فتوولتائیک - حرارتی را در حدود ۸۲/۶۲٪ پیش‌بینی می‌کرد. زنداگ و همکاران [۸] مدل‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی را برای تحلیل عملکرد کلکتور پی‌وی‌تی توسعه دادند و نشان دادند که مدل یک بعدی دائمی به خوبی دو مدل دیگر می‌تواند عملکرد کلکتور پی‌وی‌تی را پیش‌بینی کند. زنداگ و همکاران [۹] یک مدول فتوولتائیک معمولی، کلکتور پی‌وی‌تی بدون پوشش و کلکتور پی‌وی‌تی پوشش‌دار را مقایسه کردند. نتایج نشان می‌داد که راندمان الکتریکی متوسط سالیانه به ترتیب برابر ۷/۲٪، ۷/۶٪ و ۶٪ است. تیواری و سودا [۱۰] افزایش ۱۸٪ را در بازده کلی سیستم ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی مشاهده کردند. آنالیز انرژی و انرژی کلکتورهای پی‌وی‌تی دارای پوشش و بدون پوشش، توسط آزمایش چو و همکاران [۱۱] محاسبه کردند که برای دو حالت پوشش‌دار و بدون پوشش، افزایش راندمان مدول فتوولتائیک و دمای محیط، منجر به افزایش راندمان کلکتور پی‌وی‌تی می‌شود. در مقابل، تابش و سرعت باد بالاتر سبب کاهش کلکتور پی‌وی‌تی می‌شود. همچنین افزایش فاکتور تراکم منجر به افزایش کلکتور پی‌وی‌تی در حالت بدون پوشش و کاهش کلکتور پی‌وی‌تی در حالت پوشش‌دار می‌شود. سرحدی و همکاران [۱۲] راندمان انرژی حرارتی، الکتریکی و کل کلکتورهای پی‌وی‌تی هوا را به ترتیب برابر ۱۷/۸٪، ۱۰/۰۱٪ و ۴۵٪ محاسبه کردند. سواینیل و اندرو [۱۳] دو نمونه مختلف از کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی که در آن نوع اول شامل مدول سیلیکونی منو کریستالی یکپارچه شده با



شکل ۲. نمای مقطع عرضی مدول فتوولتائیک [۲۰]

Fig. 2. Cross-section of the photovoltaic module [20]

که در آن ضخامت پوسته محافظ و K_T هدایت حرارتی پوسته محافظ است. U_t ضریب کلی انتقال حرارت از سلول خورشیدی به محیط از طریق شیشه فتوولتائیک است [۱۹]:

$$U_t = \left[\frac{L_G}{K_G} + \frac{1}{h_i + h_r} \right]^{-1} \quad (3)$$

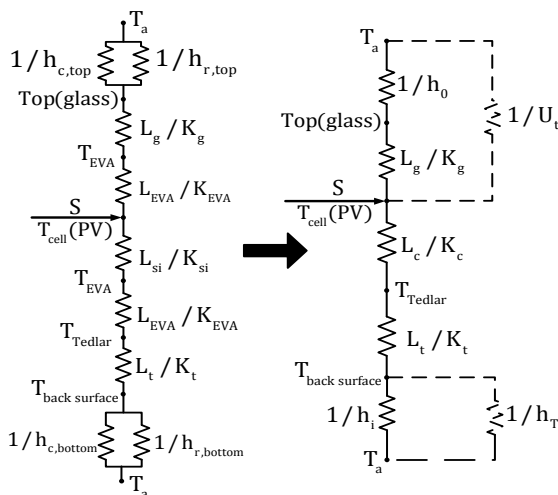
و در آن L_G و K_G به ترتیب ضخامت و هدایت حرارتی شیشه پی‌وی هستند. h_i و h_r به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی و تشعشع بین آسمان و سلول خورشیدی می‌باشند که برابر با [۱۲]:

$$h_i = 2.8 + 3.0 V_w \quad (4)$$

$$h_r = \epsilon_G \sigma (T_{sky} + T_c)(T_{sky}^2 + T_c^2) \quad (5)$$

که V_w سرعت جریان باد روی سطح کلکتور پی‌وی تی، ϵ_G ضریب نشر کلکتور پی‌وی تی و T_{sky} دمای آسمان می‌باشد همچنین به جای عبارت $h_i + h_r$ می‌توان از رابطه (۶) استفاده نمود [۱۹]:

$$h_o = 5.7 + 3.8 V_w \quad (6)$$



شکل ۳. شبکه دمایی برای یک مدول خورشیدی به صورت عبارت‌هایی از مقاومت‌های هدایت، جابجایی و تشعشع [۲۰]

Fig. 3. Thermal network for a solar PV module in terms [of conduction, convection and radiation resistances][20]

دمای هوا، سرعت باد، دمای آب ورودی و پارامترهای فیزیکی (جنس و ضخامت سلول، پوسته محافظ، پوشش شیشه‌ای، عایق پشتی، جاذب ورق و لوله و ...) به عنوان ورودی نرم‌افزار هستند و بازده حرارتی، الکتریکی و کل به عنوان خروجی محاسبه می‌شوند.

۲- مدل‌سازی حرارتی

به منظور نوشتن معادله تعادل انرژی برای هر جزء کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

الف- انتقال حرارت یک بعدی فرض می‌شود.

ب- سیستم در حالت شبه پایدار است.

ج- ظرفیت حرارتی سلول، پوسته محافظ و عایق ناچیز است.

د- ضریب عبوردهی روکش شفاف تقریباً ۱۰۰٪ است.

ه- تلفات اهمی در مدول فتوولتائیک قابل اغماض است.

و- دمای سطح صفحه پوسته محافظ، روکش شفاف، شیشه مدول فتوولتائیک، پوشش شیشه‌ای پی‌وی تی و صفحه جاذب میانگین فرض می‌شود.

ز- جریان هوای گذرنده از کلکتور پی‌وی تی آرام فرض می‌شود.

۲-۱- مدل‌سازی حرارتی مدول خورشیدی

شکل ۲ مقطع عرضی مدول فتوولتائیک (کلکتور پی‌وی تی فاقد جریان سیال) را نمایش می‌دهد که در معرض تابش خورشیدی است. اگر b عرض و dx المان طولی مدول فتوولتائیک باشد، تعادل انرژی مدول فتوولتائیک برای المان طولی $b dx$ برابر معادله (۱) است [۱۰]:

$$\tau_G \alpha_c \beta_c I(t) b dx + \tau_G (1 - \beta_c) \alpha_T I(t) b dx = [U_t (T_c - T_a) + U_T (T_c - T_{bs})] b dx + \tau_G \eta_c \beta_c I(t) b dx \quad (1)$$

که در آن T_c دمای سلول خورشیدی، T_a دمای محیط، T_{bs} دمای صفحه پشتی مدول فتوولتائیک (پوسته محافظ)، $I(t)$ تابش خورشیدی در زمان t ، τ_G ضریب عبور شیشه مدول فتوولتائیک، α_c ضریب جذب سلول خورشیدی، α_T ضریب جذب پوسته محافظ، β_c فاکتور تراکم سلول خورشیدی و η_c راندمان سلول خورشیدی (تابعی از دمای سلول) هستند. U_t ضریب انتقال حرارت هدایت پوسته محافظ است [۱۸]:

$$U_T = \left[\frac{L_T}{K_T} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$\tau_G [\alpha_c \beta_c I(t) + (1 - \beta_c) \alpha_T I(t)] b dx = [U_i (T_c - T_a) + U_T (T_c - T_{bs})] b dx + \tau_G \eta_c \beta_c I(t) b dx \quad (13)$$

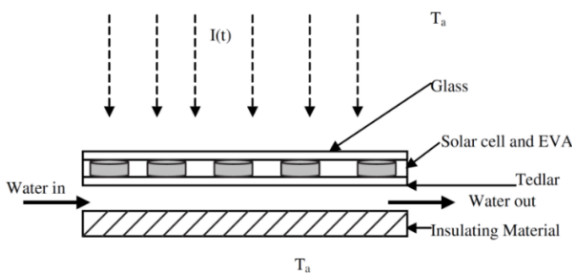
با تقسیم دوطرف رابطه (۱۳) به $b dx$ و مرتب سازی آن، رابطه (۱۴) حاصل می‌شود [۱۰]:

$$U_T (T_c - T_{bs}) = h_{p1} (\alpha \tau)_{eff} I(t) - U_{iT} (T_{bs} - T_a) \quad (14)$$

رابطه (۱۴) نرخ انرژی حرارتی انتقال یافته از سلول‌های خورشیدی به صفحه پشتی پوسته محافظ تعریف می‌شود. $h_{p1} = \frac{U_T}{U_T + U_i}$ [۲۱] فاکتور جریمه به علت پوسته محافظ از طریق شیشه، سلول خورشیدی و روکش شفاف است و همچنین U_{iT} ضریب کلی انتقال حرارت بین شیشه فتوولتائیک و پوسته محافظ می‌باشد که برابر رابطه (۱۵) است [۲۲]:

$$U_{iT} = \left[\frac{1}{U_i} + \frac{1}{U_T} \right]^{-1} = \frac{U_i U_T}{U_i + U_T} \quad (15)$$

شکل ۵ شبکه دمایی برای کلکتور پی‌وی تی بدون شیشه را نشان می‌دهد. سمت چپ شکل، مقاومت اجزای مختلف کلکتور پی‌وی تی را نشان می‌دهد. در سمت راست شکل، قسمت‌هایی که با خط چین مشخص شده است، مقاومت‌های سری و موازی معادل هستند. در کلکتورهای پی‌وی تی برای اتصال صفحه جاذب به پوسته محافظ از یک چسب سیلیکونی به ضخامت L_{glue} و هدایت حرارتی K_{glue} استفاده می‌گردد. بنابراین عبارت L_{glue}/K_{glue} مقاومت انتقال حرارت هدایت از صفحه پشتی پوسته محافظ به صفحه جاذب می‌باشد. h_i ضریب انتقال حرارت از صفحه جاذب به سیال است. عادل انرژی برای صفحه پشتی پوسته محافظ مدول فتوولتائیک برای المان طولی $b dx$ برابر است با [۱۰]:



شکل ۴. مقطع عرضی کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش شیشه‌ای [۱۰]

Fig. 4. Cross-section of the unglazed PV/T collector [10]

که در آن h_o ضریب کلی انتقال حرارت رابط بین سطح خارجی و هوای محیط است. بنابراین معادله (۳) برابر [۱۹]:

$$U_i = \left[\frac{L_G}{K_G} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (7)$$

که h_o ضریب انتقال حرارت (جابجایی و تشعشع) شیشه به محیط می‌باشد. با ساده سازی معادله (۱) دمای سلول خورشیدی به صورت معادله (۸) به دست می‌آید [۱۹]:

$$T_c = \frac{(\alpha \tau)_{eff} I(t) + U_i T_a + U_T T_{bs}}{U_T + U_i} \quad (8)$$

$$(\alpha \tau)_{eff} = \tau_G [\alpha_c \beta_c + \alpha_T (1 - \beta_c) - \eta_c \beta_c] \quad (9)$$

$(\alpha \tau)_{eff}$ حاصل ضرب ضریب جذب - عبور موثر می‌باشد. شکل ۳ شبکه دمایی برای یک مدول فتوولتائیک را نشان می‌دهد. در سمت راست شکل به جهت ساده سازی روابط، مقاومت تشعشع پایینی مدول، $h_{r, bottom} / 1$ فرض می‌شود. مقاومت سلول پی‌وی نیز برابر:

$$\frac{L_c}{K_c} = \frac{L_{EVA}}{K_{EVA}} + \frac{L_{si}}{K_{si}} \quad (10)$$

است. K_{si} و L_{si} به ترتیب ضخامت و هدایت حرارتی سلول خورشیدی (سیلیکون) است. تعادل انرژی برای صفحه پشتی پوسته محافظ مدول فتوولتائیک برای المان طولی $b dx$ برابر است با:

$$U_T (T_c - T_{bs}) b dx = h_i (T_{bs} - T_a) b dx \quad (11)$$

با جایگزینی T_c از معادله (۱) دمای صفحه پشتی با معادله (۱۲) بیان می‌شود [۱۰]:

$$T_{bs} = \frac{h_{p1} (\alpha \tau)_{eff} I(t) + U_{iT} T_a + h_i T_a}{U_{iT} + h_i} \quad (12)$$

۲-۲- مدل سازی حرارتی کلکتور پی‌وی تی بدون شیشه

شکل ۴ مقطع عرضی کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش را نشان می‌دهد. اگر b عرض و dx المان طولی کلکتور خورشیدی فتوولتائیک - حرارتی پی‌وی تی باشد، معادله تعادل انرژی مدول فتوولتائیک برای المان طولی $b dx$ به شرح رابطه (۱۳) است [۱۸]:

m_f و C_f به ترتیب دبی جرمی و گرمای ویژه سیال، h_T برابر ضریب انتقال از پشت مدول فتوولتائیک (صفحه پشتی پوسته محافظ) به سیال است و U_b ضریب کلی انتقال حرارت از زیر کلکتور به محیط آن می‌باشد که برابر معادله (۲۱) است [۲۱]:

$$U_b = \left[\frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_i} \right]^{-1} \quad (21)$$

h_i ضریب انتقال حرارت بین سطح زیرین و محیط می‌باشد. با انتگرال گیری و مرتب سازی رابطه (۲۰) حاصل می‌شود: انرژی مفید دریافتی \dot{Q}_u به ازای واحد طول جریان سیال در کلکتور پی‌وی تی که از طریق آب انتقال می‌یابد به صورت [۱۰]:

$$\begin{aligned} \dot{q}_u &= WF \left[h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_{nw} (T_f - T_a) - U_b (T_f - T_a) \right] \\ &= WF \left[h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_L (T_f - T_a) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

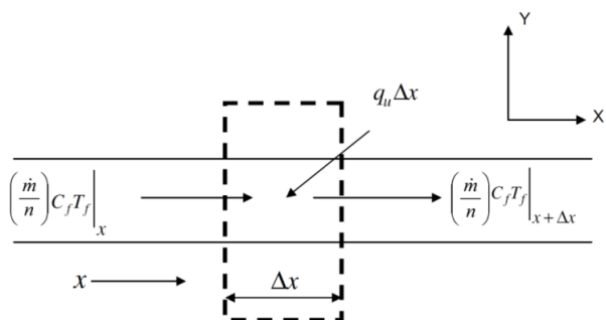
که در آن U_L ضریب کلی انتقال حرارت از سلول خورشیدی به محیط از سطح بالا و عایق پشت می‌باشد که برابر [۲۱]:

$$U_L = U_{nw} + U_b \quad (23)$$

است. F راندمان پره، W فاصله بین دو مجرای جریان و \dot{Q}_u انرژی مفید دریافتی به ازای واحد طول جریان است که از طریق سیال انتقال می‌یابد. سیال در دمای T_{fin} وارد کلکتور می‌شود و دمای آن در خروجی تا $T_{f,out}$ افزایش می‌یابد. شکل ۶ موازنه انرژی بر روی سیال عبور کننده از یک لوله واحد با طول Δx را نشان می‌دهد به طوری که [۲۳]:

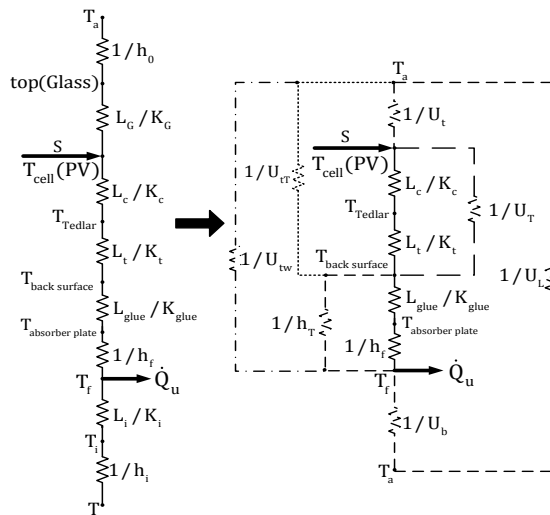
$$\left(\frac{\dot{m}}{n} \right) C_f T_{f,x+\Delta x} - \left(\frac{\dot{m}}{n} \right) C_f T_{f,x} - \dot{q}_u \Delta x = 0 \quad (24)$$

که n تعداد لوله‌های موازی است. با تقسیم معادله فوق به Δx و



شکل ۶. تعادل جریان گرمایی در زیر پوسته محافظ برای المان طولی Δx [۱۰].

Fig. 6. Heat flow balance over an elemental length Δx below tedlar [10]



شکل ۵. شبکه دمایی برای کلکتور پی‌وی تی بدون شیشه [۲۰]
Fig. 5. Thermal network for an unglazed PV/T collector [20]

$$U_T (T_c - T_{bs}) b dx = h_T (T_{bs} - T_f) b dx \quad (16)$$

به کمک معادله (۱۶) و جایگزینی معادله (۱۵) در معادله (۱۴)،

معادله (۱۷) دست می‌آید [۲۱]:

$$\begin{aligned} h_T (T_{bs} - T_f) &= \frac{h_T}{h_T + U_{IT}} h_{p1} (\alpha\tau)_{eff} I \\ (t) - \frac{h_T U_{IT}}{h_T + U_{IT}} (T_f - T_a) \end{aligned} \quad (17)$$

معادله (۱۷) نرخ انرژی حرارتی انتقال یافته از سطح پشتی پوسته محافظ

به سیال در شرایطی می‌باشد که در آن دمای سیال عامل، h_T ضریب انتقال حرارت صفحه پشتی پوسته محافظ به سیال و $h_{p1} = \frac{h_T}{h_T + U_{IT}}$ [۱۰] فاکتور جریمه به علت سطح مشترک بین پوسته محافظ و سیال می‌باشد. U_{tw} ضریب کلی انتقال حرارت بین پوشش شیشه‌ای و جریان سیال است که برابر [۲۱]:

$$U_{tw} = \left[\frac{1}{h_f} + \frac{1}{U_{IT}} \right]^{-1} = \frac{h_T U_{IT}}{h_T + U_{IT}} \quad (18)$$

می‌باشد. در نهایت معادله (۱۸)، به صورت رابطه (۱۹) نوشته

می‌شود [۲۳]:

$$h_T (T_{bs} - T_f) = h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_{nw} (T_f - T_a) \quad (19)$$

با توجه به الگوی جریان نشان داده شده در شکل ۶، معادله تعادل

انرژی برای جریان آب داخل لوله به شکل رابطه (۲۰) است [۱۳]:

$$F h_T (T_{bs} - T_f) b dx = \dot{m}_f C_f \frac{dT_f}{dx} dx + U_b (T_f - T_a) b dx \quad (20)$$

$$\tau_g \tau_G [\alpha_c \beta_c I(t) + (1 - \beta_c) \alpha_T I(t)] b dx = [U_t (T_c - T_a) + U_T (T_c - T_{bs})] b dx + \tau_g \tau_G \eta_c \beta_c I(t) b dx \quad (29)$$

جذب - عبور موثر برابر:

$$(\alpha \tau)_{eff} = \tau_g \tau_G [\alpha_c \beta_c + \alpha_T (1 - \beta_c) - \eta_c \beta_c] \quad (30)$$

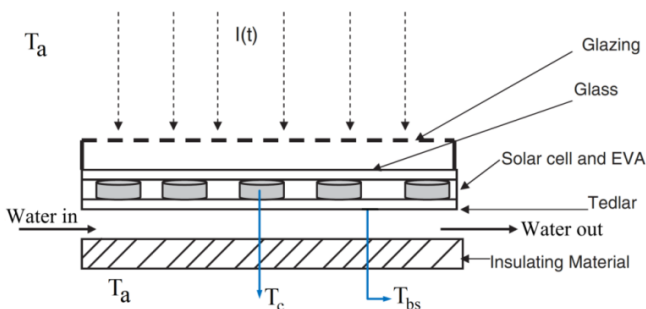
نشان می‌دهد. در شکل سمت چپ، مقاومت اجزای مختلف کلکتور پی‌وی‌تی و در سمت راست، مقاومت‌های ترکیبی (قسمت‌هایی که با خط چین مشخص شده) نشان داده شده است. تفاوت روابط انتقال حرارت در کلکتور پی‌وی‌تی دارای پوشش شیشه‌ای با نوع بدون شیشه در مقدار U_t می‌باشد که دارای یک ترم اضافی به دلیل وجود شیشه اضافی است که برابر معادله (۳۱) می‌باشد [۱۸]:

$$K_g \text{ و } L_g \text{ ضخامت و هدایت حرارتی پوشش هستند.} \quad U_t = \left[\frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_{c,G-g} + h_{r,G-g}} + \frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1} \quad (31)$$

$h_{r,G-g}$ و $h_{c,G-g}$ به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابجایی و تشعشع بین شیشه فتوولتائیک و پوشش می‌باشند. روش محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی $h_{c,G-g}$ و تشعشع $h_{r,G-g}$ به این صورت است که ابتدا دمای پوشش T_g تخمین زده می‌شود سپس در دمای میانگین شیشه فتوولتائیک و پوشش / $T_m = (T_g + T_c) / 2$ ، خواص هوا هم‌چون μ ، k_{air} ، C_p ، ρ و از جدول خوانده می‌شود که نفوذ گرمایی و لزجت سینماتیکی به ترتیب برابر [۷]:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}, \quad v = \frac{\mu}{\rho} \quad (32)$$

به صورت روابط (۳۳) و (۳۴) بیان می‌شود [۹]:



شکل ۷. مقطع عرضی کلکتور پی‌وی‌تی داری شیشه [۱۸]

Fig. 7. Cross-section of the glazed PV/T collector [18]

یافتن حد زمانیکه $\Delta x \rightarrow 0$ و جایگزینی معادله (۲۴) برای \dot{q}_u ، انرژی خالص حرارتی در دسترس سیال بین پوسته محافظ و عایق زیرین بیان می‌شود با [۲۳]:

$$WF' [h_{p1} h_{p2} (\alpha \tau)_{eff} I(t) - U_L (T_f - T_a)] = \frac{m}{n} C_f \frac{dT_f}{dx} \quad (25)$$

معادله (۲۵) مشابه عبارت کلکتور صفحه تخت معمولی به جز ترم‌های h_{p1} و h_{p2} است. وجود h_{p1} و h_{p2} راندمان کلکتور پی‌وی‌تی را در مقایسه با یک کلکتور صفحه تخت معمولی کاهش می‌دهد. از معادله (۱۳) عبارت دمای سلول خورشیدی بر حسب دمای صفحه پشتی مدول فتوولتائیک و پارامترهای آب و هوایی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۲۳]:

$$T_c = \frac{(\alpha \tau)_{eff} I(t) + U_t T_a + U_T T_{bs}}{U_T + U_t} \quad (26)$$

هم اکنون، با جایگزینی عبارت T_c از رابطه (۲۶) در رابطه (۱۶)، عبارت دمای صفحه پشتی مدول فتوولتائیک به صورت معادله (۲۷) به دست می‌آید [۲۱]:

$$T_{bs} = \frac{h_{p1} (\alpha \tau)_{eff} I(t) + U_{iT} T_a + h_r T_w}{U_{iT} + h_r} \quad (27)$$

با بازنویسی معادله (۲۴) و انتگرال‌گیری از آن در شرط اولیه $x=0$ و $T_f = T_{f,in}$ ، دمای سیال خروجی در زیر پوسته محافظ به صورت معادله (۲۸) حاصل می‌شود [۱۹]:

$$T_{f,out} = T_f|_{x=L} = \left(\frac{h_{p1} h_{p2} (\alpha \tau)_{eff} I(t)}{U_L} + T_a \right) \times \left(1 - \exp \left(- \frac{A U_L F}{m C_f} \right) \right) + T_{f,in} \exp \left(- \frac{A U_L F}{m C_f} \right) \quad (28)$$

که $A_c = bL = NWL$ مساحت سلول خورشیدی و N تعداد مجرا است.

۲-۳- مدل‌سازی حرارتی کلکتور پی‌وی‌تی دارای پوشش شیشه‌ای

معادلات تعادل انرژی برای هر جزء کلکتور خورشیدی فتوولتائیک - حرارتی پی‌وی‌تی دارای پوشش شیشه‌ای مشابه نوع بدون پوشش می‌باشد. شکل ۷ مقطع عرضی کلکتور پی‌وی‌تی دارای پوشش شیشه‌ای را نشان می‌دهد. اگر b عرض و dx امان طولی کلکتور پی‌وی‌تی باشد، معادله تعادل انرژی مدول فتوولتائیک برای امان طولی $b dx$ برابر رابطه (۲۹) است:

که τ_g ضریب عبور پوشش شیشه‌ای می‌باشد. حاصل ضرب ضریب

نیست در غیر این صورت مقدار جدید T_g به کار برده می‌شود و روش تکرار خواهد شد. از آنجایی که محاسبه با این روش کار طاقت‌فرسایی است، حل این مساله با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد به گونه‌ای که متلب مرحله به مرحله داده‌ها را از کاربر دریافت کرده، مقادیر را محاسبه و نمایش می‌دهد.

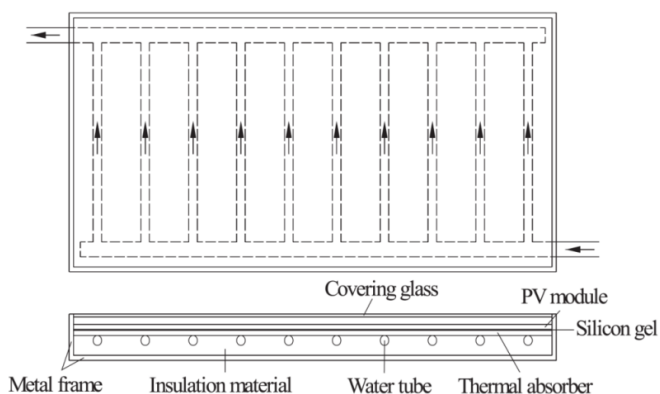
۲-۴- توزیع دما بین لوله‌ها و ضریب بازدهی کلکتور پی‌وی تی

مدول فتوولتائیک خود می‌تواند به صورت یک صفحه جاذب عمل نماید بنابراین می‌توان کلکتور پی‌وی تی را در حالتی که دارای صفحه جاذب و یا فاقد آن باشد، مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق فرض می‌شود که لوله‌ها واقع در زیر صفحه جاذب می‌باشند. مقطع لوله‌ها نیز در حالت گرد یا مستطیلی و به شکل موازی یا مارپیچی تحلیل می‌شوند.

۲-۴-۱- در حالت لوله موازی

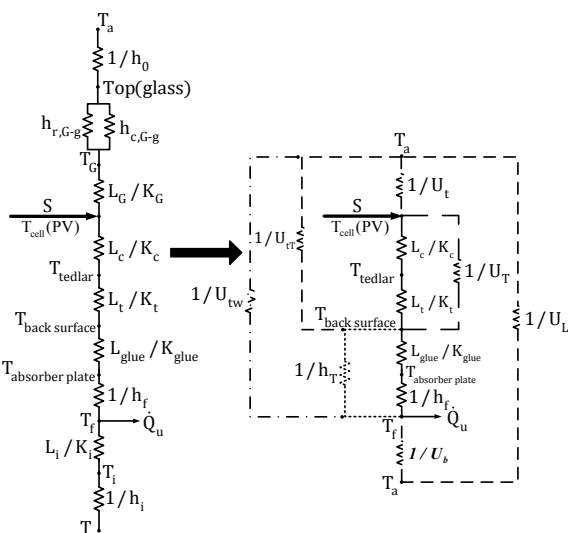
شکل ۹ کلکتور پی‌وی تی دارای پوشش را نشان می‌دهد که مدول فتوولتائیک به قسمت بالایی صفحه جاذب اتصال یافته است. لوله‌های موازی شکل در قسمت زیرین صفحه جاذب و به آن جوش شده است. جریان آب از پایین (سمت راست) کلکتور پی‌وی تی وارد و از بالا (سمت چپ) خارج می‌شود.

اگر فرض شود که گرادیان دما در جهت جریان صرف نظر می‌شود، در آن صورت می‌توان توزیع دمای بین لوله‌ها را به دست آورد. ترکیبی برای مدول فتوولتائیک و صفحه مطابق آنچه که در شکل ۱۰ نشان داده شده در نظر گرفته می‌شود. W فاصله بین لوله‌ها و D قطر خارجی لوله است. ضخامت سلول سیلیکونی و صفحه



شکل ۹. نمای بالایی مقطع عرضی کلکتور پی‌وی تی [۲۴]

Fig. 9. Top view of the PV/T collector cross-section [24]



شکل ۸. شبکه دمایی برای کلکتور پی‌وی تی دارای یک پوشش شیشه‌ای
Fig. 8. Thermal network for a glazed PV/T collector

با توجه به روابط فوق، ضریب انتقال حرارت تشعشع و جابجایی

$$R_a = \frac{g(T_G - T_g)L_{G-g}^3}{T_m \nu \alpha} \quad (33)$$

و [۱۴]

$$Nu = 1 + 0.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{R_a \cos \beta} \right] \times \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos \beta} \right] + \left[\left(\frac{R_a \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (34)$$

برابر معادله (۳۵) و (۳۶) هستند [۷]:

که در آن ρ و μ ، ν ، k_{air} ، C_p ، pr و ρ به ترتیب لزجت دینامیکی،

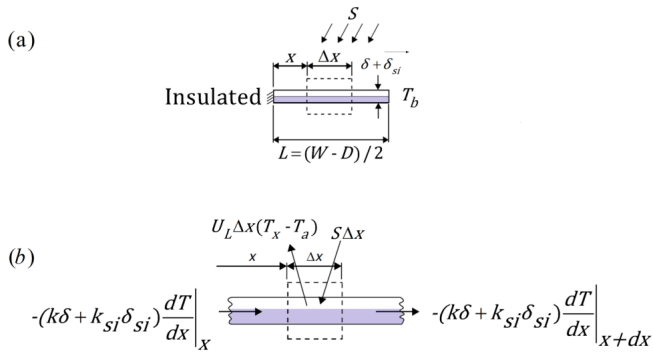
$$h_{r,G-g} = \frac{\sigma(T_G + T_g)(T_G^2 + T_g^2)}{\frac{1}{\epsilon_G} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} \quad (35)$$

$$h_{c,G-g} = \frac{k_{air} Nu}{L_{G-g}} \quad (36)$$

لزجت سینماتیکی، هدایت حرارتی، گرمای ویژه، پرنتل و چگالی هوا در دمای میانگین T_m می‌باشند. همچنین فاصله بین شیشه فتوولتائیک با پوشش، β زاویه کلکتور پی‌وی تی است. ϵ_g و ϵ_G نیز به ترتیب ضریب نشر شیشه فتوولتائیک و پوشش می‌باشد. با این ضرایب انتقال حرارت و مقادیر h_0 و h_r محاسبه شده از روابط (۵) و (۶) ضریب اتلاف حرارت بالایی U_L از معادله (۳۱) محاسبه می‌گردد. آن‌گاه این نتایج برای محاسبه T_g به شکل معادله (۳۷) به کار می‌رود [۷]:

اگر T_g نزدیک به حدس اولیه باشد، به محاسبات بیشتر نیازی

$$T_g = T_G - \frac{U_L(T_G - T_a)}{h_{G,c-g} + h_{r,G-g}} \quad (37)$$



شکل ۱۱. موازنه انرژی برای المان پره
Fig. 11. The energy balance for fin element

می‌باشد. برای سادگی می‌توان متغیر m را به فرم معادله (۴۲)

$$S = h_{p1} h_{p2} (\alpha \tau)_{eff} I(t) \quad (41)$$

تعریف کرد [۱۶]:

در صورتی که $\frac{(k_{si} + k_{glue})m}{U_L} = \frac{1}{m}$ باشد برای دو سمت انرژی جمع شده

$$m = \sqrt{U_L / (k \delta + k_{si} \delta_{si})} \quad (42)$$

مساوی است با:

استفاده از مفهوم کارایی پره برای نوشتن معادله بالا مناسب است

$$q'_{fin} = (W-D) [S - U_L (T_b - T_a)] \times \tanh \left[\frac{m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \right] \quad (43)$$

به طوری که:

انرژی مفید به دست آمده در بالای لوله نیز برابر است با:

$$q'_{fin} = (W-D) F [S - U_L (T_b - T_a)] \quad (44)$$

مجموع انرژی کسب شده توسط کلکتور در ازای واحد طول در

$$q'_{tube} = D [S - U_L (T_b - T_a)] \quad (45)$$

جهت جریان، مجموع روابط (۴۴) و (۴۵) است. مقدار F از رابطه (۴۶) قابل محاسبه است [۲۵]:

و انرژی مفید دریافتی برای لوله و پره به ازای واحد طول در جهت

$$F = \tanh \left[\frac{m(W-D)/2}{m(W-D)/2} \right] \quad (46)$$

جاذب به ترتیب δ و δ_{si} می‌باشد. از آن جایی که سیلیکون و صفحه جاذب‌های خوبی هستند، از گرایان دما در طول صفحه سیلیکون و جاذب صرف نظر می‌شود. فرض خواهیم کرد که قسمت پایین سلول سیلیکونی تقریباً در دمای مبنای محلی T_b است. ناحیه بین خط مرکزی جدا کننده لوله‌ها و پایه لوله می‌تواند به عنوان یک مسئله پره کلاسیک مورد بررسی قرار گیرد.

مقاومت‌های جاذب، چسب بین پوسته محافظ و جاذب، روکش شفاف، پوسته محافظ و سلول به شکل موازی می‌باشند بنابراین توجه به یک بعدی بودن جهت انتقال حرارت از نقطه x تا $x+\Delta x$ انتقال حرارت کل با رابطه (۳۸) تعریف می‌شود:

همان‌طوری که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، طول پره برابر

$$q = q_{abs} + q_{glue} + q_{tedlar} + q_{EVA} + q_{si} \quad (38)$$

$(W-D)/2$ است و یک ناحیه المانی با عرض $x\Delta$ و طول واحد در جهت جریان در نظر گرفته می‌شود. موازنه انرژی بر روی این المان نتیجه می‌دهد:

که برابر رابطه (۴۰) است:

$$S\Delta x - U_L \Delta x (T - T_a) + q\Delta x = 0 \quad (39)$$

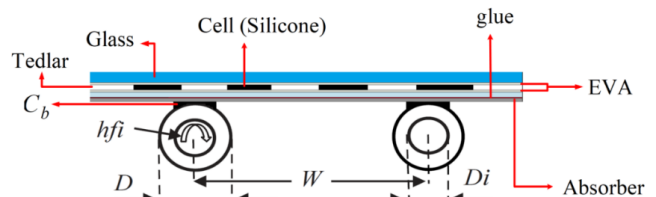
در معادله (۴۰) از تاثیر چسب، روکش شفاف و پوسته محافظ

$$S\Delta x - U_L \Delta x (T - T_a) + \left[\left(-k_{si} \delta_{si} \frac{dT}{dx} \right) \Big|_x - \left(-k_{si} \delta_{si} \frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x+\Delta x} \right] + \left[\left(-k\delta \frac{dT}{dx} \right) \Big|_x - \left(-k\delta \frac{dT}{dx} \right) \Big|_{x+\Delta x} \right] = 0 \quad (40)$$

صرف‌نظر شده است زیرا ترم‌های زیر برابر صفر هستند:

انرژی خورشیدی جذب شده S برابر

$$k_{glue} \delta_{glue} = k_{tedlar} \delta_{tedlar} = k_{EVA} \delta_{EVA} \approx 0$$



شکل ۱۰. شکل شماتیک نحوه اتصال لوله و صفحه جاذب [۲۰]

Fig. 10. Schematic diagram of the connection between absorber and tube [20]

صفحه جاذب می‌باشد که برابر است با [۹]:

$$h_{ca} = \left(\frac{L_{EVA}}{K_{EVA}} + \frac{L_{glue}}{K_{glue}} + \frac{L_{tedlar}}{K_{tedlar}} \right)^{-1} \quad (50)$$

ضریب هدایت اتصال C_b می‌تواند با آگاهی از ضریب هدایت گرمایی اتصال، k_b ، ضخامت متوسط اتصال γ و عرض اتصال b بر مبنای واحد طول برآورد شود [۷]:

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma} \quad (51)$$

با حل معادله (۴۸) برای T_b و جایگزینی آن در معادله (۴۷) و حل نتیجه حاصل، انرژی مفید دریافتی با معادله (۵۲)

$$q'_{u'} = WF' [S - U_L (T_f - T_a)] \quad (52)$$

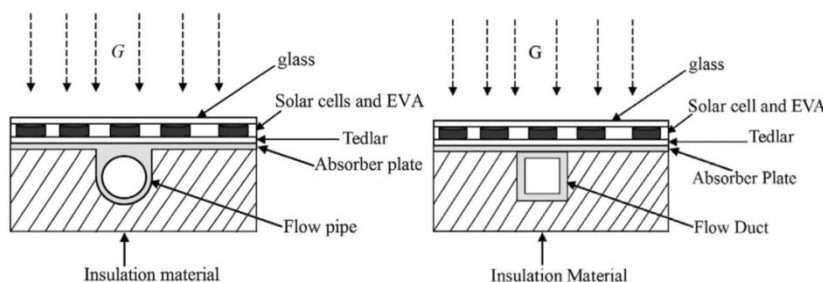
به دست می‌آید که ضریب کارایی کلکتور F' با رابطه (۵۳) ارائه می‌شود [۲۶]:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} + \frac{1}{Wh_{ca}} + \frac{1}{C_b} \right]} \quad (53)$$

برای مجرا با مقطع مستطیلی یا مربعی (شکل ۱۳ سمت راست) با استفاده از مفهوم قطر هیدرولیکی $D_h = 2ab/(a+b)$ که در آن a و b به ترتیب طول و عرض مقطع داخلی مجرا هستند شکل ۱۴، ضریب کارایی کلکتور F' با معادله (۵۴) بیان می‌شود:

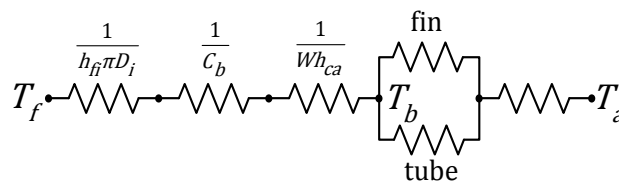
$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D_h + (W - D_h)F]} + \frac{1}{2(a+b)h_{fi}} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{Wh_{ca}} \right]} \quad (54)$$

کمیتی که انرژی مفید دریافتی واقعی یک کلکتور را در حالی که



شکل ۱۳. نمای مقطع عرضی کلکتور پی‌وی تی: لوله با مقطع گرد (سمت چپ) و مجرای با مقطع مستطیلی (سمت راست)

Fig. 13. Schematic diagram of PV/T collector - rectangular tube section (left side); circular tube section (right side)



شکل ۱۲. مقاومت‌های ایجاد شده در مقابل جریان گرما به سیال

Fig. 12. Thermal resistance network for the heat flow into the fluid

جریان برابر رابطه (۴۷) است:

با توجه به محل و نحوه اتصال لوله، صفحه جاذب و فتوولتائیک

$$q'_{u'} = [(W - D)F + D][S - U_L (T_b - T_a)] \quad (47)$$

ترتیب قرارگیری مقاومت‌هایی که در مسیر انتقال انرژی مفید کسب شده و سیال قرار دارند، متفاوت خواهد بود. حال با توجه به اینکه اتصال لوله در زیر صفحه جاذب قرار دارد، این مقاومت‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. انرژی مفید دریافتی می‌تواند به صورت عبارت‌های مربوط به چهار مقاومت بیان شود.

برای لوله با مقطع گرد (شکل ۱۳ سمت چپ):

D_i قطر داخلی لوله و h_{fi} ضریب انتقال حرارت بین سیال و دیواره

$$q'_{u'} = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{h_{fi} \pi D_i} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{Wh_{ca}}} \quad (48)$$

لوله است که برابر [۱۴]

است و در آن k هدایت حرارتی سیال داخل لوله در دمای میانگین

$$h_{fi} = Nu_{D_i} \frac{k}{D_i}, \quad Nu_{D_i} = \begin{cases} 4.364 & Re < 2300 \\ 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} & Re > 2300 \end{cases} \quad (49)$$

ورودی و خروجی سیال می‌باشد. h_{ca} ضریب انتقال حرارت از سلول به

کل سطح کلکتور در دمای ورودی سیال باشد به انرژی مفید دریافتی مرتبط کند ضریب تفکیک گرمایی کلکتور F_R نامیده می‌شود. که برابر است با [۱۶]:

۱-۱-۱ در حالت لوله مارپیچی

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p(T_{f0} - T_{fi})}{A_c \left[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_L(T_{fi} - T_a) \right]} = \frac{\dot{m}C_f \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{\dot{m}C_f}\right) \right]}{A_c U_L} \quad (55)$$

زنداگ و لاوان [۲۷] نشان دادند که F_R برای لوله مارپیچی در کلکتور حرارتی به صورت عباراتی از سه پارامتر بی بعد F_1 ، F_2 و F_3 تعیین می‌شود (پارامترهای F_4 ، F_5 و F_6 تنها به صورت تابعی از F_2 می‌باشند). با توجه به شکل ۱۵ ضریب تفکیک گرمایی بهبود یافته F_R برای کلکتور پی‌وی‌تی از معادله (۵۴) حاصل می‌شود [۲۷]:

$$F_R = F_1 F_3 F_5 \left[\frac{2F_4}{F_6 \exp\left[-\sqrt{1-F_2^2}/F_3\right] + F_5} - 1 \right] \quad (56)$$

ضریب کارایی کلکتور F' از رابطه (۵۵) به شکل رابطه (۵۷) حاصل

$$F_1 = \frac{\kappa}{U_L W} \frac{\kappa R(1+\gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}{[\kappa R(1+\gamma) - 1]^2 - (\kappa R)^2},$$

$$F_2 = \frac{1}{\kappa R(1+\gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R},$$

$$F_3 = \frac{\dot{m}C_f}{F_1 A_c U_L}, F_4 = \left(\frac{1 - F_2^2}{F_2^2} \right)^{1/2},$$

$$F_5 = \frac{1}{F_2} + F_4 - 1, F_6 = 1 - \frac{1}{F_2} + F_4,$$

$$\kappa = \frac{[(K\delta + K_{si}\delta_{si})U_L]^{1/2}}{\sinh\left[(W-D)(U_L / (K\delta + K_{si}\delta_{si}))^{1/2}\right]},$$

$$R = \frac{1}{h_f \pi D_i} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{Wh_{ca}}$$

$$\gamma = -2\cosh\left[(W-D)(U_L / (K\delta + K_{si}\delta_{si}))^{1/2}\right] - \frac{DU_L}{\kappa}$$

می‌شود.

از معادله (۲۵) انرژی مفید حرارتی کلکتور پی‌وی‌تی برای جریان

$$F' = -\frac{\dot{m}C_f}{A_c U_L} \ln\left(1 - \frac{A_c U_L F_R}{\dot{m}C_f}\right) \quad (57)$$

سیال آب به صورت زیر معادله (۵۸) دست می‌آید [۱۳].

معادله (۲۵) مشابه معادله نرخ انرژی مفید برای کلکتور صفحه

$$\dot{Q}_u = A_c F_R \left[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff} I(t) - U_L(T_{f, in} - T_a) \right] \quad (58)$$

تخت است. راندمان حرارتی لحظه‌ای کلکتور پی‌وی‌تی برای جریان سیال آب در حالت تئوری و تجربی به ترتیب با معادله (۵۹) و (۶۰) تعریف می‌شود [۲۱].

راندمان حرارتی لحظه‌ای ماکزیمم کلکتور پی‌وی‌تی، زمانی است

$$\eta_i (theo) = \frac{\dot{Q}_u (theo)}{A_c \times I(t)} = F_R \left[h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff} - U_L \frac{T_{f, in} - T_a}{I(t)} \right] \quad (59)$$

و [۱۴]:

$$\eta_i (exp) = \frac{\dot{Q}_u (exp)}{A_c \times I(t)} = \frac{\dot{m}C_f (T_{f, out} - T_{f, in})}{A_c I(t)} \quad (60)$$

که $T_{f, in} = T_a$ باشد بنابراین از رابطه (۶۱) به دست می‌آید.

$$\eta_{i, max} = F_R h_{p1}h_{p2}(\alpha\tau)_{eff} \quad (61)$$

۳- مدل سازی الکتریکی

توان الکتریکی خروجی کلکتور پی‌وی‌تی و مدول فتوولتائیک

$\dot{Q}_{u, electrical}$ با رابطه (۶۲) به دست می‌آید [۲۲].

که در آن A_c مساحت کلکتور و $\eta_{el} = \eta_{pv}$ بازده الکتریکی مدول به

$$\dot{Q}_{u, electrical} = \begin{cases} PV : t_G \eta_{ec} \beta_c A_c I(t) \\ PV/T : t_G \eta_{ec} \beta_c A_c I(t) \\ PV/T_{one cover} : t_G t_G \eta_{ec} \beta_c A_c I(t) \end{cases} \quad (62)$$

عنوان تابعی از دما می‌باشد که برابر است با [۲۲]:

η_{ec} و η_{eo} به ترتیب راندمان الکتریکی سلول خورشیدی و راندمان

$$\eta_{el} = \eta_{eo} [1 - \gamma(T_c - T_o)] \quad (63)$$

مرجع مدول فتوولتائیک در دمای 298 K و تابش 1000 W/m^2

است. γ ضریب دمای راندمان سیلیکون (0.0045 K^{-1})، T_c دمای

سلول و T_o دمای مرجع می‌باشد. همچنین این مقادیر برای سیلیکون

۴- راستی آزمایی مدل سازی حرارتی و الکتریکی

مونو کریستال برابرند با [۸]:

با هدف اعتبار بخشیدن به نتایج مدل سازی تئوری که در بخش های ۱ تا ۳ ذکر شد، دمای آب خروجی و راندمان حرارتی لحظه ای با مراجع [۹ و ۱۳] مقایسه شدند. در مرجع [۱۳] مدول به طور مکانیکی و بدون هیچ گونه چسبی به کلکتور حرارتی متصل گردیده است. مشخصات فیزیکی این دو مرجع در جدول ۱ آمده است:

$$\eta_o = 0.12 \quad T_o = 25^\circ\text{C} \quad \gamma = 0.0045^\circ\text{C}^{-1}$$

۳-۱ راندمان حرارتی و الکتریکی کل

راندمان کل و راندمان حرارتی کل کلکتور پی وی تی به ترتیب برابر معادلات (۶۴) و (۶۵) هستند [۲۲].

بهره انرژی حرارتی کل کلکتور پی وی تی بر اساس قانون اول

$$\eta_{overall} = \eta_{thermal} + \eta_{electrical} \quad (64)$$

$$\eta_{overall, thermal} = \eta_{thermal} + \frac{\eta_{electrical}}{0.38} \quad (65)$$

مقادیر به دست آمده در این دو مرجع از تست تجربی حاصل شده است بنابراین با حل روابط این مطالعه و مقایسه آن با نتایج دو مرجع [۹ و ۱۳] صحت روابط تئوری اثبات می شود. نتایج به همراه درصد خطا در جدول ۲ ذکر شده اند.

در ادامه دو عدد مدول فتوولتائیک ۴۰ W خریداری شد که یکی به عنوان شاهد و دیگری در ساخت کلکتور پی وی تی بدون پوشش بکار رفت. در این آزمایش از صفحه و لوله مسی با مقطع گرد استفاده گردید به صورتی که لوله به زیر صفحه مسی جوش داده شده و قسمت بالایی صفحه توسط چسب هل به زیر مدول فتوولتائیک

ترمودینامیک تعریف می شود که برابر معادله (۶۶) است [۲۸].

$$\Sigma \dot{Q}_{u, total} = \Sigma \dot{Q}_{u, thermal} + \Sigma \frac{\dot{Q}_{u, electrical}}{0.38} \quad (66)$$

جدول ۱. مقادیر پارامترهای کلکتور فتوولتائیک - حرارتی در مراجع [۹ و ۱۳]

Table 1. Photovoltaic - thermal collector parameters as mentioned in [9, 13]

مقدار	واحد	نماد	شرح	مقدار	واحد	نماد	شرح
۰/۰۰۸	m	D_i	قطر داخلی لوله			سواپنیل و اندرو [۱۳]	
۰/۰۰۰۲	m	δ	ضخامت صفحه جاذب	۱/۲۶۷	m ²	A_c	مساحت کلکتور پی وی تی
۴۰۰	W/m K	K	هدایت حرارتی صفحه جاذب	۰/۹۵۶	-	F'	ضریب کارایی کلکتور
۰/۰۲	Kg/s	\dot{m}	دبی جرمی آب	۰/۹۴۸	-	F_R	ضریب تکنیک گرمایی
۰/۰۰۳	m	L_G	ضخامت شیشه فتوولتائیک	۰/۰۰۳	m	L_G	ضخامت شیشه فتوولتائیک
۱/۰	W/m ² K	h_{ins}	ضریب انتقال حرارت عایق	۰/۰۴۲	m	L_i	ضخامت عایق پشتی
۰/۰۰۰۱	m	L_T	ضخامت پوسته محافظ	۰/۰۰۰۲۲	m	L_T	ضخامت پوسته محافظ
۰/۰۰۰۳۵	m	L_{si}	ضخامت حرارتی سلول (سیلیکون)	۱/۰	W/m K	K_G	هدایت حرارتی شیشه فتوولتائیک
۰/۰۰۰۰۵	m	L_{glue}	ضخامت چسب	۰/۰۳۵	W/m K	K_i	هدایت حرارتی عایق
۰/۰۰۰۰۵	m	L_{EVA}	ضخامت روکش شفاف	۰/۰۳۳	W/m K	K_T	هدایت حرارتی پوسته محافظ
۱۴۰	W/m K	K_{si}	هدایت حرارتی سلول (سیلیکون)	۰/۹۰	-	α_c	ضریب جذب سلول خورشیدی
۰/۹	W/m K	K_G	هدایت حرارتی شیشه فتوولتائیک	۰/۵۰	-	α_T	ضریب جذب پوسته محافظ
۰/۲	W/m K	K_T	هدایت حرارتی پوسته محافظ	۰/۸۰	-	β_c	فاکتور تراکم سلول خورشیدی
۰/۱۸۵	W/m K	K_{glue}	هدایت حرارتی چسب	۰/۱۵	-	η_o	راندمان مرجع مازول فتوولتائیک
۰/۳۵	W/m K	K_{EVA}	هدایت حرارتی روکش شفاف	۰/۹۶	-	τ_G	ضریب عبوردهی شیشه فتوولتائیک
۰/۶۹۸	-	$(\alpha\tau)_{eff}$	ضریب جذب - عبور موثر کلکتور پی وی تی بدون پوشش	۴۵	W/m ² K	h_T	ضریب انتقال حرارت صفحه پشتی پوسته محافظ به سیال
۱/۰	m/s	V_w	سرعت باد	۱/۰	m/s	V_w	سرعت باد
۰/۰۰۳۲	m	L_g	ضخامت پوشش شیشه ای	۰/۰۰۴۵	°C ⁻¹	γ	ضریب دما
۰/۹	W/m K	K_g	هدایت حرارتی پوشش شیشه ای	۰/۰۰۲	m	δ	ضخامت صفحه جاذب
۰/۰۲	m	L_{G-g}	فاصله شیشه فتوولتائیک تا پوشش شیشه ای	۲۰۴	W/m K	K	هدایت حرارتی صفحه جاذب
۰	-	β	زاویه کلکتور پی وی تی	۰/۰۳	Kg/s	\dot{m}	دبی جرمی آب
۰/۹	-	ϵ_g	ضریب نشر پوشش شیشه ای			زندگ و همکاران [۹]	
۰/۹	-	ϵ_G	ضریب نشر شیشه فتوولتائیک	۱/۱۲	m ²	A_c	مساحت کلکتور پی وی تی
۰/۶۶	-	$(\alpha\tau)_{eff, one cover}$	ضریب جذب - عبور موثر کلکتور پی وی تی یک پوشش	۰/۰۹۵	m	W	فاصله بین مراکز دو لوله
				۰/۰۱	m	D	قطر خارجی لوله

جدول ۲. اعتبارسنجی راندمان حرارتی لحظه‌ای و دمای آب خروجی با مراجع [۹ و ۱۳]

Table 2. Validation of instantaneous thermal efficiency and outlet water temperature with references [9, 13]

راندمان حرارتی لحظه‌ای (%)			
شرح	مطالعه حاضر	زنداگ و همکاران [۹]	$\text{خطا} (\%) = \frac{X_{Pre} - X_{Exp}}{X_{Pre}} \times 100$
کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش	۵۳/۸	۵۳/۰	۱/۴۹
کلکتور پی‌وی تی دارای پوشش	۵۷/۰	۵۸/۰	-۱/۷۵
کلکتور حرارتی	۸۲/۵	۸۳/۰	-۰/۶
دمای آب خروجی (°C)			
شرح	مطالعه حاضر	سواپنیل و اندرو [13]	$\text{خطا} (\%) = \frac{X_{Pre} - X_{Exp}}{X_{Pre}} \times 100$
کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش	۳۱/۳۲	۳۱/۳۰	-۰/۰۶
	۳۵/۲۸	۳۵/۲۶	-۰/۰۶
	۴۰/۳۵	۴۰/۳۲	-۰/۰۷
	۴۵/۲۰	۴۵/۱۶	-۰/۰۹
راندمان حرارتی لحظه‌ای (%)			
شرح	مطالعه حاضر	سواپنیل و اندرو [13]	$\text{خطا} (\%) = \frac{X_{Pre} - X_{Exp}}{X_{Pre}} \times 100$
کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش	۴۹/۴۲	۴۹/۰۳	-۰/۸۰
	۵۰/۰	۴۹/۶۶	-۰/۶۸
	۵۰/۵۰	۵۰/۱۰	-۰/۸۰
	۵۰/۱۲	۵۰/۱۱	-۰/۰۲

تحت کنترل قرار دارند. مخزن مورد استفاده از نوع گالوانیزه و به ظرفیت ۱۵۰ لیتر می‌باشد. به منظور کنترل دمای ورودی و خروجی کلکتور، از سنسورهای دما از نوع پی‌تی ۱۰۰ استفاده شده است که مشاهده دما به صورت دیجیتالی توسط کنترلر آتونیکس صورت می‌گیرد. پمپ مورد استفاده به منظور گردش سیال در سیستم از نوع گروندفوس ۶۰-۲۵ است که به کمک یک روتامتر با دقت ۱/۶% و توسط یک شیر میزان دبی سیال عبوری کنترل می‌گردد. مقدار ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه تولیدی توسط پی‌وی تی و پانل فتوولتائیک به وسیله مولتی‌متر مدل ویکتور وی‌سی ۹۷ با دقت ۱% ± خوانده می‌شود. نتایج حاصل از این مقایسه در جدول ۴ وارد شده است.

چسبانده شده بود. مشخصات کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش نوع ماریپچی در جدول ۳ وارد شده است.

آزمون تجربی کلکتور پی‌وی تی و مدول فتوولتائیک شاهد در محل آزمایشگاه خورشیدی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب انجام شد. سیستم به کار گرفته شده در آزمایشگاه یک سیستم مدار باز- اجباری است. تجهیزات هواشناسی شامل پیرانومتر، دماسنج و بادسنج به منظور اندازه گیری میزان تشعشع، دمای محیط و سرعت باد به کار گرفته شد که همگی ساخت شرکت SolData می‌باشند. دقت دماسنج برابر $0/15^{\circ}\text{C} \pm$ در 0°C است. هیترهای برقی که به منظور گرم کردن آب مخزن به کار گرفته می‌شوند، شامل ۲ عدد هیتر ۲ کیلووات و ۱ عدد هیتر ۱ کیلووات می‌باشند و توسط یک کنترلر اس‌اس‌ار

جدول ۳. مشخصات کلکتور پی‌وی تی ساخته شده در آزمایش

Table 3. Parameters of the tested PV/T collector

شرح	نماد	واحد	مقدار	شرح	نماد	واحد	مقدار
ضخامت سلول (سیلیکون)	L_{si}	m	۰/۰۰۰۲۳۵	ضریب جذب سلول خورشیدی	α_c	-	۰/۹۰
ضخامت شیشه فتوولتائیک	L_G	m	۰/۰۰۲	ضریب جذب پوسته محافظ	α_T	-	۰/۵۰
ضخامت عایق پشتی	L_i	m	۰/۰۵	راندمان سلول خورشیدی (تابعی از دمای سلول)	η_c	-	۰/۰۹
ضخامت پوسته محافظ	L_T	m	۰/۰۰۰۲	ضریب عبوردهی شیشه فتوولتائیک	τ_G	-	۰/۹۵
ضخامت چسب بین فتوولتائیک و صفحه جاذب	L_{gtue}	m	۰/۰۰۱	ضریب انتقال حرارت صفحه پشتی پوسته محافظ به سیال	h_T	$\text{W/m}^2 \text{K}$	۵۰۰
ضخامت روکش شفاف	L_{EVA}	m	۰/۰۰۰۳	فاصله بین مراکز دو لوله	W	m	۰/۰۵
هدایت حرارتی سلول (سیلیکون)	K_{si}	W/m K	۱۴۸	تعداد قسمت‌ها	N	-	۹
هدایت حرارتی شیشه فتوولتائیک	K_G	W/m K	۱/۱	قطر خارجی لوله مسی	D	m	۰/۰۱
هدایت حرارتی عایق	K_i	W/m K	۰/۰۴۲	قطر داخلی لوله مسی	D_i	m	۰/۰۰۷
هدایت حرارتی پوسته محافظ	K_T	W/m K	۰/۰۳۳	ضخامت صفحه جاذب	δ	m	۰/۰۰۰۵
هدایت حرارتی چسب	K_{gtue}	W/m K	۰/۱	هدایت حرارتی صفحه جاذب مسی	K	W/m K	۲۸۵
هدایت حرارتی روکش شفاف	K_{EVA}	W/m K	۰/۳۵	ضریب انتقال حرارت داخل لوله برای لوله ماریپچی	h_{fi}	$\text{W/m}^2 \text{K}$	۱۰۰۰

جدول ۴. ارزیابی تئوری و تجربی توان الکتریکی خروجی، راندمان حرارتی و دمای آب خروجی در کلکتور پی‌وی‌تی و مدول فتوولتائیک شاهد به منظور اعتبارسنجی معادلات تئوری

Table 4. Theoretical and experimental evaluation of output electric power, thermal efficiency and outlet water temperature; in PV/T collector and PV module for validation of theoretical equations

توان الکتریکی خروجی (W)			راندمان حرارتی پی‌وی‌تی			دمای آب خروجی		
مدول فتوولتائیک شاهد			کلکتور پی‌وی‌تی					
آزمایش	تئوری	خطا %	آزمایش	تئوری	خطا %	آزمایش	تئوری	خطا %
۲۲/۳۲	۲۲/۹۶	۲/۷۹	۲۷/۰۳	۲۶/۳۱	-۲/۷۳	۵۶/۹۰	۵۶/۶۳	-۰/۴۸
۲۲/۸۷	۲۳/۷۰	۳/۵۰	۲۸/۱۵	۲۷/۳۵	-۲/۹۲	۵۶/۱۸	۵۶/۶۱	-۰/۷۶
۲۳/۸۶	۲۴/۷۰	۳/۴۸	۲۹/۵۳	۲۸/۷۱	-۲/۸۶	۵۶/۷۵	۵۶/۰۰	-۱/۳۴
۲۴/۵۶	۲۵/۴۰	۳۳/۳۱	۳۰/۰۳	۲۹/۷۲	-۱/۰۴	۵۵/۶۷	۵۶/۰۵	-۰/۶۸
۲۵/۶۴	۲۶/۰۰	۱/۳۸	۳۱/۱۴	۳۰/۴۲	-۲/۳۷	۵۴/۲۸	۵۵/۰۰	۱/۳۱

جدول ۵. پارامترهای طراحی کلکتور فتوولتائیک - حرارتی و کلکتور حرارتی
Table 5. Design parameters of photovoltaic - thermal collector and thermal collector

شرح	نماد	واحد	مقدار	شرح	نماد	واحد	مقدار
کلکتور فتوولتائیک - حرارتی				ضریب عبوردهی شیشه فتوولتائیک [۲۱]	τ_G	-	۰/۹۵
ضخامت سلول (سیلیکون)	L_{Si}	m	۰/۰۰۰۳۵	ضریب انتقال حرارت (جابجایی و تشعشع) از شیشه به محیط [۲۱]	h_o	$W/m^2 K$	$5/7 + 3/8 V_w$
ضخامت شیشه فتوولتائیک	L_G	m	۰/۰۰۳	ضریب انتقال حرارت جابجایی بین کلکتور پی‌وی‌تی و محیط [۲۹]	h_i	$W/m^2 K$	$2/8 + 3/0 V_w$
ضخامت عایق پشتی [۱۸]	L_i	m	۰/۰۵	ضریب انتقال حرارت صفحه پشتی پوسته محافظ به سیال [۳۰]	h_T	$W/m^2 K$	۵۰۰
ضخامت پوسته محافظ	L_T	m	۰/۰۰۰۵	سرعت باد	V_w	m/s	۱/۰
ضخامت چسب بین فتوولتائیک و صفحه جاذب	L_{glue}	m	۰/۰۰۰۰۵	ضریب دما	γ	$^{\circ}C^{-1}$	۰/۰۰۴۵
ضخامت روکش شفاف [۳۱]	L_{EVA}	m	۰/۰۰۰۵	کلکتور حرارتی زیر مدول فتوولتائیک			
هدایت حرارتی سلول (سیلیکون)	K_{Si}	W/m K	۱۴۰	طول کلکتور پی‌وی‌تی	L	m	۱/۲
هدایت حرارتی شیشه فتوولتائیک	K_G	W/m K	۱/۰	فاصله بین مراکز دو لوله	W	m	۰/۰۶
هدایت حرارتی عایق	K_i	W/m K	۰/۰۳۵	تعداد قسمت‌ها	N	-	۹
هدایت حرارتی پوسته محافظ [۲۱]	K_T	W/m K	۰/۰۳۳	قطر خارجی لوله مسی	D	m	۰/۰۱۵
هدایت حرارتی چسب	K_{glue}	W/m K	۰/۸۵	قطر داخلی لوله مسی	D_i	m	۰/۰۰۹
هدایت حرارتی روکش شفاف [۳۱]	K_{EVA}	W/m K	۰/۳۵	ضخامت صفحه جاذب	δ	m	۰/۰۰۰۶
ضریب جذب سلول خورشیدی [۲۱]	α_c	-	۰/۹	هدایت حرارتی صفحه جاذب آلومینیومی	K	W/m K	۲۰۴
ضریب جذب پوسته محافظ [۲۱]	α_T	-	۰/۵۰	دبی جرمی آب	\dot{m}	Kg/s	۰/۰۱
فانکتور تراکم سلول خورشیدی	β_c	-	۰/۹	گرمای ویژه آب	C_f	J/Kg K	۴۱۹۰
راندمان مرجع مدول فتوولتائیک	η_o	-	۰/۱۲	ضریب انتقال حرارت داخل لوله (لوله موازی [۳۲])	h_{fi}	W/m ² K	۳۰۰
راندمان سلول پی‌وی‌تی	$\eta_{c PV/T}$	-	۰/۱۰	ضریب انتقال حرارت داخل لوله (لوله مارپیچی)	h_{fi}	W/m ² K	۱۰۰۰
راندمان سلول فتوولتائیک [۲۱]	$\eta_{c PV}$	-	۰/۰۹				

۵- نتایج

با توجه به مطالب ذکر شده در این تحقیق، مدول فتوولتائیک و ۸ مدل کلکتور پی‌وی‌تی نوع ورق و لوله در شرایط یکسان تابش $112 W/m^2$ ، دمای محیط $35^{\circ}C$ و آب ورودی $43^{\circ}C$ به صورت تحلیلی بررسی و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. پارامترهای مرتبط با کلکتور پی‌وی‌تی و کلکتور حرارتی جهت خنک سازی مدول فتوولتائیک در جدول ۵ آمده است:

جدول ۴ دمای آب خروجی، راندمان الکتریکی و حرارتی را در حل تئوری و تست تجربی برای کلکتور پی‌وی‌تی و مدول فتوولتائیک به همراه درصد خطا نشان می‌دهد. نتایج نشان دهنده انطباق مناسب بین پارامترهای محاسبه شده در کار حاضر و تست تجربی است و نظر به اینکه خطا در هر تست کمتر از ۴٪ به دست آمده بنابراین مدل سازی ریاضی به کار رفته درست است.

جدول ۶. مقایسه راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک و کلکتور پی‌وی تی

Table 6. Comparison of the electrical efficiency of photovoltaic modules and PV/T collector

شرح	نماد	مدول فتوولتائیک	پی‌وی تی بدون پوشش	پی‌وی تی پوشش دار
تابش خورشیدی	$I(t) (W/m^2)$	۸۱۲	۸۱۲	۸۱۲
دمای محیط	$T_a (°C)$	۳۵	۳۵	۳۵
دمای آب ورودی	$T_{f,in} (°C)$	-	۴۳	۴۳
دمای صفحه پشتی مدول	$T_{bs} (°C)$	۷۳/۰	۴۳/۹۰	۴۴/۰۲
دمای سلول خورشیدی	$T_c (°C)$	۷۶/۳۲	۵۰/۶۸	۵۱/۷۰
راندمان الکتریکی	$\eta_{el} (\%)$	۹/۲۲	۱۰/۶۱	۱۰/۵۶
انرژی الکتریکی خروجی	$\dot{Q}_{el} (W)$	۴۸/۵۱	۵۵/۸۳	۵۲/۷۹

لوله مسی به صورت کامل به صفحه آلومینومی جوش داده شده است و فرض بر این است که $C_p = \infty$ می‌باشد. در جدول ۵ ضریب انتقال حرارت داخل لوله برای لوله مارپیچی برابر $1000 W/m^2 K$ و برای لوله موازی برابر $300 W/m^2 K$ قرار داده شده است. دلیل این اختلاف یک‌تکه بودن لوله در طرح مارپیچی و سرعت بالاتر سیال داخل لوله است (دبی جرمی یکسان در طرح موازی و مارپیچی) که خود سبب افزایش عدد رینولدز جریان و در نتیجه بیشتر شدن ضریب انتقال حرارت داخل لوله می‌شود (معادله (۴۹)). از مقادیر جدول ۵ نتایج دمای سلول خورشیدی، دمای آب خروجی، انرژی مفید حرارتی، انرژی مفید الکتریکی، بازده الکتریکی، بازده حرارتی (لحظه‌ای)، بهره انرژی حرارتی، راندمان کل و راندمان حرارتی کل برای مدول فتوولتائیک، کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش و دارای پوشش در دو جدول ۶ و جدول ۷ می‌توان نمایش داد:

با نگاهی به جدول ۶ می‌توان دریافت که دمای صفحه پشتی مدول فتوولتائیک برابر $73/0 °C$ شده است در حالی که این دما برای کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش برابر $43/90 °C$ به دست آمده است که در حدود $29 °C$ کمتر است. دمای سلول خورشیدی برای

کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش در مقایسه با مدول فتوولتائیک مجزا در حدود $26/5 °C$ کاهش یافته و موجب افزایش راندمان الکتریکی به میزان $1/4\%$ و افزایش انرژی الکتریکی خروجی برابر $7/32 W$ شده است. این افزایش راندمان می‌تواند با پایین بودن دمای آب ورودی و محیط افزایش بیشتری داشته باشد. با این تفاسیر استفاده از پی‌وی تی به جای فتوولتائیک مقرون به صرفه است چرا که در عمل از چندین پی‌وی تی برای مصارف خانگی و صنعتی استفاده می‌شود که به شکل سری یا موازی به یکدیگر متصل شده‌اند. با اضافه کردن یک پوشش به کلکتور پی‌وی تی دمای سلول خورشیدی در حدود $0/4 °C$ و انرژی الکتریکی خروجی در حدود $3 W$ کاهش می‌یابد. در حقیقت اضافه کردن یک پوشش (شیشه) با هدف بهره‌گیری بیشتر از راندمان حرارتی (انرژی حرارتی) می‌باشد که این خود سبب افزایش دمای سلول و افت راندمان الکتریکی می‌شود اما راندمان کل پی‌وی تی را افزایش می‌دهد یعنی می‌توان در یک تابش خورشیدی یکسان مقدار انرژی بیشتری در واحد سطح کسب کرد.

پارامترهای تاثیرگذار بر خروجی حرارتی و الکتریکی کلکتور پی‌وی تی شامل میزان تابش خورشیدی، سرعت باد، دمای هوای

جدول ۷. مقایسه راندمان حرارتی و دمای آب خروجی برای چهار ساختار ورق و لوله در کلکتور فتوولتائیک - حرارتی در تابش $812 W/m^2$ ، دمای محیط $35 °C$ و دمای آب ورودی $43 °C$

Table 7. Comparison of Thermal Efficiency and outlet water temperature for the four sheet and tube photovoltaic - thermal collector designs at radiation $812 W/m^2$, ambient temperature $35 °C$ and inlet water temperature $43 °C$

کلکتور پی‌وی تی بدون پوشش شیشه‌ای				کلکتور پی‌وی تی دارای پوشش شیشه‌ای				نماد	شرح
لوله موازی و مقطع گرد	لوله موازی و مقطع مستطیلی	لوله موازی و مقطع مربعی	لوله موازی و مقطع گرد	لوله مارپیچی و مقطع گرد	لوله موازی و مقطع مستطیلی	لوله موازی و مقطع مربعی	لوله موازی و مقطع گرد		
۰/۹۲۱	۰/۹۳۴	۰/۹۳۰	۰/۹۱۸	۰/۸۵۲۵	۰/۸۵۷۲	۰/۸۴۸۸	۰/۸۲۶	F'	ضریب کارایی کلکتور
۰/۹۰۷۶	۰/۹۱۰	۰/۹۰۶	۰/۸۹۴۸	۰/۸۰۶	۰/۸۱۰۱	۰/۸۰۲۶	۰/۷۸۲۲	F_R	ضریب تفکیک گرمایی
۲۹۶/۰	۲۹۶/۷۸	۲۹۵/۴۸	۲۹۱/۸۲	۲۳۲/۱۵	۲۳۳/۳۲	۲۳۱/۱۷	۲۲۵/۳۰	$\dot{Q}_{u,th}$	انرژی مفید حرارتی (W)
۴۳۴/۹۲	۴۳۵/۷۰	۴۳۴/۴۰	۴۳۰/۷۴	۳۷۹/۰۷	۳۸۰/۳۵	۳۷۸/۰۹	۳۷۲/۲۲	$\dot{Q}_{u,total}$	بهره انرژی حرارتی کلی (W)
۵۰/۰۶	۵۰/۰۸	۵۰/۰۵	۴۹/۹۶	۴۸/۵۴	۴۸/۵۷	۴۸/۵۲	۴۸/۳۸	$T_{f,out}$	دمای آب خروجی (°C)
۵۶/۲۵	۵۶/۴۰	۵۶/۱۰	۵۵/۴۰	۴۴/۱۲	۴۴/۳۴	۴۳/۹۴	۴۲/۸۲	η_i	بازده حرارتی لحظه‌ای (%)
۶۶/۸۱	۶۷/۰	۶۶/۶۰	۶۵/۹۰	۵۴/۷۳	۵۴/۹۵	۵۴/۵۴	۵۳/۴۳	η_o	راندمان کل (%)
۸۴/۰۴	۸۴/۲۰	۸۳/۹۰	۸۳/۲۰	۷۲/۰۴	۷۲/۲۶	۷۱/۸۶	۷۰/۷۴	$\eta_{o,th}$	راندمان حرارتی کل (%)

محیط، دمای سیال خنک کننده ورودی، دبی جرمی سیال خنک کننده، ضخامت و جنس عایق پشتی، ضخامت روکش شفاف، ضخامت و نوع سیلیکون، ضخامت پوسته محافظ، ضخامت شیشه و فاصله بین مدول فتوولتائیک و شیشه می باشد. در حالی که افزایش سرعت باد و دمای سیال ورودی موجب کاهش بازده حرارتی سیستم می شود. برای افزایش بازده حرارتی کلکتور فتوولتائیک - حرارتی باید میزان تابش خورشیدی جذب شده توسط مدول فتوولتائیک، دمای محیط و دبی سیال خنک کننده زیاد شود. انتخاب صحیح جنس و افزایش ضخامت عایق پشتی سبب کاهش انتقال حرارت از زیر کلکتور پی وی تی به محیط می شود و راندمان حرارتی را بالا می برد. ضریب کارایی کلکتور F' پارامتری است که به ساخت مناسب کلکتور مربوط می باشد و از ضریب انتقال حرارتی کل، ضریب انتقال حرارت داخل لوله، ضریب انتقال حرارت جوش و اتصال مناسب لوله به صفحه جاذب و صفحه جاذب به پشت مدول فتوولتائیک تاثیر می پذیرد. بنابراین با انتخاب موادی که دارای رسانندگی حرارتی بالایی هستند و همچنین ساخت مناسب کلکتور پی وی تی به طوری که هیچ گونه هوایی بین صفحه جاذب و مدول نفوذ نکند می توان مقدار F' را افزایش داد. ضریب تفکیک گرمایی F_R نیز پارامتری است که به مساحت کلکتور، ضریب کارایی کلکتور، دبی جرمی جریان و ظرفیت حرارتی سیال داخل لوله مربوط می شود. در واقع این ضریب مقدار راندمان حرارتی داده شده به سیال را نشان می دهد. در جدول ۷ ضریب کارایی کلکتور F' و ضریب تفکیک گرمایی F_R برای کلکتورهای پی وی تی دارای پوشش بیشتر از نوع بدون پوشش به دست آمده است که علت آن می تواند به بالاتر رفتن استحصال حرارت در کلکتورهای دارای پوشش در مقایسه با نوع بدون پوشش مربوط شود. همچنین برای کلکتورهای با مقطع مستطیل مقدار ضریب کارایی کلکتور و ضریب تفکیک گرمایی نسبت به سه مدل دیگر بیشتر می باشد. از طرفی این دو ضریب برای طرح مارپیچی با مقطع دایره در دو مدل دارای پوشش و فاقد پوشش بیشتر از مقدار دایره ای و مربعی به دست آمده اند. همین قانون برای انرژی مفید حرارتی، بهره انرژی حرارتی کلی، دمای آب خروجی، بازده حرارتی لحظه ای، راندمان کل و راندمان حرارتی کل صادق است. بهره انرژی حرارتی کل و دمای آب خروجی در کلکتور کلکتور پی وی تی بدون پوشش در مقایسه با کلکتور کلکتور پی وی تی یک پوشش کمتر می باشد زیرا وجود پوشش سبب جذب بهتر تابش

خورشیدی و افزایش دمای سطح مدول فتوولتائیک می شود. با توجه به جدول ۷ طرح لوله موازی با مقطع گرد در پی وی تی بدون پوشش دارای کمترین راندمان و دمای آب خروجی می باشد. همچنین طرح لوله موازی با مقطع مستطیلی در پی وی تی پوشش دار دارای بیشترین مقدار راندمان و دمای آب خروجی است در صورتی که مقطع مربعی و مارپیچی گرد بازده پایین تری دارند. این اصل در پی وی تی بدون پوشش هم دیده می شود. با توجه به جدول ۶ و جدول ۷، کلکتور پی وی تی بدون پوشش عملکرد الکتریکی بالاتری دارد اما راندمان کل در نوع پوشش دار بالاتر می باشد بنابراین به واسطه وجود پوشش می توان به راندمان و بهره بالاتری از انرژی دست یافت که این راندمان برای کلکتور پی وی تی پوشش دار نوع مستطیلی برابر ۶۷٪ است. این راندمان کل در مقایسه با راندمان الکتریکی منفرد مدول فتوولتائیک به میزان ۵۷/۸٪ افزایش داشته است. ساخت دستگاه کلکتور پی وی تی خود می تواند مشکلاتی داشته باشد. انتخاب مناسب چسب، اتصال کامل لوله به صفحه جاذب و عدم تاب صفحه جاذب هنگام جوش، اتصال صحیح لوله ها، انتخاب جنس قاب کلکتور پی وی تی و آبندی صحیح آن و ... در کل به دلیل راندمان بالا و راحتی ساخت، استفاده از طرح لوله مارپیچ در ساخت کلکتور پی وی تی نوع ورق و لوله در اولویت می باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مطالعه ابتدا مدول فتوولتائیک فتوولتائیک و ۸ مدل کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی پی وی تی با استفاده از قانون اول ترمودینامیک مدل سازی شدند. سپس به منظور صحت سنجی، این روابط تئوری با دو مرجع معتبر مقایسه شدند. در ادامه از مدول فتوولتائیک شاهد و کلکتور پی وی تی بدون پوشش نوع مارپیچی در آزمایشگاه انرژی خورشیدی دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب تست تجربی به عمل آمد و نتایج آن با حل تحلیلی حاصل از روابط بیان شده در این تحقیق مقایسه شد. همچنین برای به دست آوردن بهترین مدل از نظر عملکرد حرارتی، الکتریکی و کل این ۸ مدل کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی در شرایط تابش 812 W/m^2 ، دمای محیط 35°C ، دمای آب ورودی 43°C و سرعت باد 1 m/s به کمک نرم افزار متلب مقایسه شدند. و نتایج آن در جدول ۶ و جدول ۷ ذکر گردید. به طور خلاصه با مطالعه مطالب و روابط بیان شده در بخش های ۱ تا

عدد رینولدز	Re	۳ می‌توان به نتایج زیر دست یافت: ۱- اضافه کردن پوشش شیشه‌ای
انرژی خورشیدی جذب شده (W/m^2)	S	در کلکتور پی‌وی‌تی موجب افزایش راندمان حرارتی می‌گردد در
دما (K)	T	حالی که در کلکتور پی‌وی‌تی بدون پوشش به دلیل خنک‌سازی بهتر
ضریب افت حرارت کلی ($W/m^2 K$)	U	مدول فتوولتائیک، راندمان الکتریکی در مقایسه با مدول فتوولتائیک
سرعت جریان هوا (m/s)	V	ساده و کلکتور پی‌وی‌تی دارای پوشش بیشتر می‌باشد. ۲- با افزایش
فاصله بین مراکز دو لوله (m)	W	دمای آب ورودی بازده حرارتی و الکتریکی پی‌وی‌تی کاهش می‌یابد
المان دیفرانسیلی در جهت طولی (m)	x	بنابراین برای رسیدن به حداکثر راندمان خروجی می‌بایست دمای
	یونانی	آب ورودی به دمای هوای محیط نزدیک باشد. ۳- طراحی، ساخت و
ضریب جذب	α	انتخاب مناسب مواد موجب افزایش ضریب کارایی و ضریب تفکیک
فاکتور تراکم مدول خورشیدی / زاویه کلکتور	β	گرمایی کلکتور پی‌وی‌تی می‌شود ۴- با افزایش ضخامت عایق پشتی
ضریب نشر	ϵ	اتلاف حرارتی از زیر کلکتور پی‌وی‌تی کاهش یافته و راندمان حرارتی
لزجت دینامیکی ($kg \cdot m^{-1} s^{-1}$)	μ	افزایش می‌یابد. ۵- کلکتور پی‌وی‌تی موازی با مقطع مستطیلی در
راندمان	η	حالت پوشش‌دار دارای حداکثر مقدار انرژی مفید حرارتی، بهره انرژی
ضخامت صفحه (m)	δ	حرارتی کلی، دمای آب خروجی، بازده حرارتی لحظه‌ای، راندمان کل
ضریب عبوردهی	τ	و راندمان حرارتی کل است در مقابل طرح لوله موازی و مقطع گرد
لزجت سینماتیکی (m^2/s)	ν	در حالت فاقد پوشش، حداقل مقادیر خروجی را داراست. ۶- ایده ورق
ضریب دما ($^{\circ}C^{-1}$)	γ	و لوله با مقطع مستطیلی به دلیل داشتن راندمان بالا می‌تواند طرح
	زیرنویس ها	ایده‌آلی جهت ساخت پی‌وی‌تی باشد اما به لحاظ هزینه و مشکلات
محیط	a	ساخت در آن و داشتن اختلاف بازده کمتر از ۲% با نوع مارپیچی
هوا	air	پیشنهاد می‌شود از طرح لوله مارپیچ با مقطع گرد در ساخت پی‌وی‌تی
اتصال	b	استفاده شود.
پشت مدول (صفحه پشتی پوسته محافظ)	bs	
جابجایی - سلول / مدول	c	
موثر	eff	
الکتریکی	el	
آزمون تجربی	Exp	
جریان سیال	f	
سیال داخل لوله	fi	
شیشه مدول فتوولتائیک	G	
پوشش شیشه‌ای	g	
هیدرولیکی	h	
از پایین / داخل لوله	i	
ورودی	in	
کل کلکتور	L	
مقدار متوسط	m	
حداکثر	max	
مرجع / از بالا / خارجی لوله	o	
یک پوشش	$one cov$	
خروجی	out	
حذف حرارت / مدول	p	
مطالعه حاضر	pre	
فتوولتائیک - حرارتی	pv/t	
تابش	r	
سیلیکون	si	
پوسته محافظ	T	
بالا	t	
حرارتی	th	
مفید	u	
باد / سیال آب	w	

۷- فهرست علائم

A	مساحت (m)
a	طول مقطع لوله (m)
b	عرض کلکتور پی‌وی‌تی (m) / عرض مقطع لوله (m)
C	گرمای ویژه سیال (J/Kg K)
D	قطر لوله (m)
g	گرانش زمین (m/s^2)
h	ضریب انتقال حرارت ($W/m^2 K$)
I	تابش خورشیدی برخوردی کل (W/m^2)
K	هدایت حرارتی ($W/m K$)
k	هدایت حرارتی سیال ($W/m K$)
L	ضخامت / طول کلکتور پی‌وی‌تی (m)
\dot{m}	نرخ جریان سیال (Kg/s)
$N.n$	تعداد قسمت‌ها
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
\dot{Q}	نرخ انتقال حرارت (W)
Ra	عدد رایلی

- [12] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, M.M. Adeli, An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, *Applied Energy*, 87(7) (2010) 2328-2339.
- [13] S. Dubey, A.A. Tay, Testing of two different types of photovoltaic-thermal (PVT) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions, *Energy for Sustainable Development*, 17(1) (2013) 1-12.
- [14] O. Rejeb, H. Dhaou, A. Jemni, A numerical investigation of a photovoltaic thermal (PV/T) collector, *Renewable Energy*, 77 (2015) 43-50.
- [15] J. Allan, Z. Dehouche, S. Stankovic, L. Mauricette, Performance testing of thermal and photovoltaic thermal solar collectors, *Energy Science & Engineering*, 3(4) (2015) 310-326.
- [16] I. Singh, D. Singh, M. Singh, Thermal Modeling and Performance Evaluation of Photovoltaic Thermal (PV/T) Systems: A Parametric Study, *International Journal of Green Energy*, 16(6) (2019) 483-489.
- [17] H.A. Kazem, Evaluation and analysis of water-based photovoltaic/thermal (PV/T) system, *Case Studies in Thermal Engineering*, 13 (2019) 100401.
- [18] A. Tiwari, M. Sodha, Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: experimental validation of theoretical model, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(1) (2007) 17-28.
- [19] B. Agrawal, G.N. Tiwari, Building integrated photovoltaic thermal systems: for sustainable developments, Royal Society of Chemistry, 2010.
- [20] S.A. Behmoonesi, F. Jafarkazemi, Computational and Experimental Evaluation of Thermal and Electrical Performance of PV Module and Solar PV/T Water Collector, *Modares Mechanical Engineering*, 20(6) (2020) 1661-1676.
- [21] A. Tiwari, M. Sodha, Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: a parametric study, *Renewable energy*, 31(15) (2006) 2460-2474.
- [1] J.-H. Kim, J.-T. Kim, The experimental performance of an unglazed PVT collector with two different absorber types, *International Journal of Photoenergy*, 2012 (2012).
- [2] Y. Tripanagnostopoulos, T. Nousia, M. Souliotis, P. Yianoulis, Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Solar energy*, 72(3) (2002) 217-234.
- [3] B. Huang, T. Lin, W. Hung, F. Sun, Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems, *Solar energy*, 70(5) (2001) 443-448.
- [4] L. Florschuetz, Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors, *Solar energy*, 22(4) (1979) 361-366.
- [5] H. Hottel, A. Whillier, Evaluation of flat-plate solar collector performance, in: *Trans. Conf. Use of Solar Energy*;(), 1955.
- [6] T. Bergene, O.M. Løvvik, Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells, *Solar energy*, 55(6) (1995) 453-462.
- [7] J.A. Duffie, W. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. Fourth, in, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [8] H.A. Zondag, D.d. de Vries, W. Van Helden, R.C. van Zolingen, A. Van Steenhoven, The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector, *Solar energy*, 72(2) (2002) 113-128.
- [9] H. Zondag, D. De Vries, W. Van Helden, R. Van Zolingen, A. Van Steenhoven, The yield of different combined PV-thermal collector designs, *Solar energy*, 74(3) (2003) 253-269.
- [10] A. Tiwari, M. Sodha, Performance evaluation of solar PV/T system: an experimental validation, *Solar energy*, 80(7) (2006) 751-759.
- [11] T.T. Chow, W. He, A. Chan, K. Fong, Z. Lin, J. Ji, Computer modeling and experimental validation of a building-integrated photovoltaic and water heating system, *Applied Thermal Engineering*, 28(11-12) (2008) 1356-1364.

- a serpentine absorber plate, Proc. Annu. Meet.-Am. Sect. Int. Sol. Energy Soc.:(United States), 6(CONF-830622-) (1983).
- [28] S. Dubey, G. Tiwari, Analysis of PV/T flat plate water collectors connected in series, Solar Energy, 83(9) (2009) 1485-1498.
- [29] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector, Energy and Buildings, 42(11) (2010) 2184-2199.
- [30] M. Rosli, K. Sopian, S.B. Mat, M.Y. Sulaiman, E. Salleh, Heat Removal Factor of an Unglazed Photovoltaic Thermal Collector with a Serpentine Tube, in: Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II, Springer, 2016, pp. 583-590.
- [31] S. Armstrong, W. Hurley, A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions, Applied Thermal Engineering, 30(11-12) (2010) 1488-1495.
- [32] G. Vokas, N. Christandonis, F. Skittides, Hybrid photovoltaic-thermal systems for domestic heating and cooling—a theoretical approach, Solar energy, 80(5) (2006) 607-615.
- [22] G.N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of photovoltaic modules and their applications, Royal Society of Chemistry, 2009.
- [23] F. Sobhnamayan, F. Sarhaddi, M. Alavi, S. Farahat, J. Yazdanpanahi, Optimization of a solar photovoltaic thermal (PV/T) water collector based on exergy concept, Renewable Energy, 68 (2014) 356-365.
- [24] L. Sun, M. Li, Y. Yuan, X. Cao, B. Lei, N. Yu, Effect of tilt angle and connection mode of PVT modules on the energy efficiency of a hot water system for high-rise residential buildings, Renewable Energy, 93 (2016) 291-301.
- [25] A. Fudholi, K. Sopian, M.H. Yazdi, M.H. Ruslan, A. Ibrahim, H.A. Kazem, Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors, Energy conversion and management, 78 (2014) 641-651.
- [26] P. Charalambous, S. Kalogirou, G. Maidment, K. Yiakoumetti, Optimization of the photovoltaic thermal (PV/T) collector absorber, Solar Energy, 85(5) (2011) 871-880.
- [27] M. Zhang, Z. Lavan, Thermal performance of

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

S. A. Behmoonesi, F. Jafarkazemi, *Theoretical Comparison of Thermal and Electrical Performance of Different Models of Sheet and Tube Type Solar Photovoltaic - Thermal Water Collector*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(5) (2021) 2903-2920.

DOI: [10.22060/mej.2020.17344.6578](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17344.6578)

