



## افزایش راندمان خروجی کل مدول فتوولتائیک با بکارگیری کلکتور فتوولتائیک - حرارتی

سید امیر به مونسى\*

\* ۱- دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، (behmoonesiamir@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹-۵-۱۶ تاریخ دریافت: ۱۳۹۹-۵-۱۰

**چکیده:** تابش خورشیدی دمای سطح مدول فتوولتائیک (PV) را افزایش می‌دهد که این افزایش دما، سبب کاهش راندمان الکتریکی و عمر مفید سلول‌های فتوولتائیک می‌شود. یکی از روش‌های کاهش دمای مدول‌های فتوولتائیک، کاهش حرارت سطح مدول به واسطه گردش سیالی همچون آب یا هوا است. به دستگاه‌هایی که بر این مبنا عمل می‌کنند کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی (PV/T) می‌گویند. معمولاً کلکتورهای ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی، از یکپارچه‌سازی مدول فتوولتائیک و کلکتور حرارتی به منظور جلوگیری از تماس مستقیم سیال خنک کننده با سطح مدول ساخته می‌شود. جاذب حرارتی به دلیل دفع حرارت از سطح مدول به سیال بسیار حائز اهمیت است بنابراین عملکرد حرارتی و الکتریکی یک کلکتور PV/T به طراحی مناسب جاذب وابسته است. در این تحقیق، ابتدا طبقه‌بندی و ساختارهای مختلفی از کلکتور PV/T بررسی شدند. در ادامه راندمان حرارتی و الکتریکی ۹ طرح کاربردی از کلکتور PV/T به صورت تئوری با یکدیگر مقایسه شدند. سپس راندمان الکتریکی کلکتور PV/T نوع ورق و لوله توسط مدول PV شاهد تحت آزمون قرار گرفت. بر طبق نتایج حاصل از این پژوهش، در صورتی که دمای سیال ورودی پایین باشد، کلکتور PV/T راندمان کل بالاتری در مقایسه با کلکتور حرارتی یا مدول PV مجزا خواهد داشت

**واژه‌های کلیدی:** انرژی خورشیدی، کلکتور فتوولتائیک - حرارتی، پی‌وی‌تی، مدول فتوولتائیک، برق خورشیدی

### ۱. مقدمه

یکی از امید دهنده‌ترین فن‌آوری‌ها در انرژی‌های تجدید پذیر<sup>۱</sup> تکنولوژی سلول‌های فتوولتائیک است. مدول‌های PV تابش خورشیدی را با راندمان ۵ تا ۳۰ درصد به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. این سیستم‌ها به سرعت در کشورهای توسعه یافته و یا در حال توسعه در حال گسترش هستند. عملکرد سیستم‌های فتوولتائیک به عوامل مختلف به ویژه شرایط آب و هوایی مانند تابش خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد بستگی دارد. شکل ۱ تاثیر افزایش دما را در ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه بر روی سلول‌های خورشیدی نشان می‌دهد. تاثیر اساسی افزایش دمای سلول بر روی ولتاژ مدار باز است که به صورت خطی با افزایش دمای سلول کاهش می‌یابد. در نتیجه بازده الکتریکی سلول PV افت می‌کند. یک کلکتور ترکیبی خورشیدی فتوولتائیک - حرارتی<sup>۲</sup> PV/T متشکل از یک مدول فتوولتائیک<sup>۳</sup> PV است که در آن مدول فتوولتائیک نه تنها به ابزاری جهت تولید

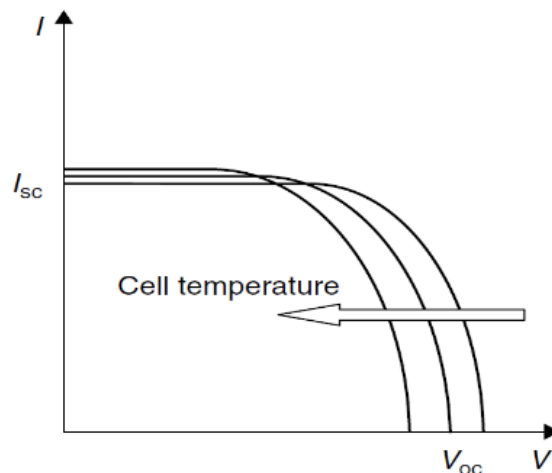
<sup>1</sup> Renewable Energy

<sup>2</sup> Photovoltaic Module

<sup>3</sup> Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector

الکتریسیته، بلکه به عنوان یک جاذب حرارتی نیز عمل می‌نماید. در این راه الکتریسیته و حرارت به طور همزمان تولید شده، راندمان خروجی و طول عمر مدول افزایش می‌یابد. کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی، نسبت به کلکتور حرارتی خورشیدی از مزایای زیر برخوردار است:

- (۱) راندمان تبدیل انرژی بالاتر نسبت به سیستم‌های متداول
- (۲) عدم نیاز به منبع الکتریکی خارجی برای گردش سیال
- (۳) بهینه کردن فضای نصب دستگاه به دلیل یکپارچه‌سازی کلکتور خورشیدی و مدول فتوولتائیک در یک سیستم واحد
- (۴) سطح تحت پوشش کلکتور PV/T، انرژی الکتریکی و حرارتی بیشتری نسبت به مساحت کلکتور PV/T دونیمه شده با مدول PV و کلکتور حرارتی تولید می‌کند.
- (۵) کلکتور PV/T نسبت به تجمیع کلکتور حرارتی و مدول PV ساده بر روی سقف منازل، از معماری متحدالشکلی بهره‌مند است.



شکل ۱: اثر افزایش دما بر روی ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه [۱]

در ۳۰ سال اخیر، تحقیقات بیشماری در زمینه کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی انجام شده است. فلور شوتس [۲] با استفاده از معادله هاتل - ویلیر [۳] سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی را مدل‌سازی کردند. کاکس و پاراکاش [۴، ۵] با تحقیق بر روی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی با سیال عامل هوا و آب بدین نتیجه رسیدند که راندمان این سیستم‌ها با سیال عامل آب بالاتر از سیال عامل هوا است، چرا که خواص حرارتی و فیزیکی آب از هوا بالاتر است ولی استفاده از هوا به دلیل هزینه‌های کمتر رایج‌تر است. سوپیان [۶] سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی تک کاناله و دو کاناله آبی و هوایی را از لحاظ حرارتی بررسی کرده و نشان داد که سیستم‌های دو کاناله دارای راندمان بیشتری هستند. طبق تحقیقات زونداگ و همکاران [۷] عملکرد الکتریکی و حرارتی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی نسبت به مدول‌های PV و کلکتورهای حرارتی مجزا، کمتر است. با این وجود آن‌ها تأکید کردند که دو کلکتور فتوولتائیک - حرارتی، نسبت به یک مدول PV و یک کلکتور حرارتی مجزا که در کنار هم قرار می‌گیرند، انرژی بر واحد سطح بیشتری را تولید می‌کنند. این مسأله مخصوصاً در جاهایی که مساحت در دسترس کم باشد بسیار حائز اهمیت خواهد بود. هگزی و سوپیان و همکاران [۸، ۹] با قرار دادن یک کانال شیشه‌ای بر روی مدول فتوولتائیک، از انرژی حرارتی ایجاد شده برای گرم نمودن محیط و خشک کردن محصولات کشاورزی بهره بردند. تریپانگ نستوپولک [۱۰] سیستم‌های ترکیبی خورشیدی فتوولتائیک - حرارتی را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داد و برای خروج حرارت از مدول فتوولتائیک، از دو سیال آب و هوا در پشت صفحه مدول استفاده نمود. در سیستمی که وی مورد آزمایش قرار داد، آب در لوله‌هایی جریان داشت که توسط یک صفحه صاف مسی به پشت مدول متصل بودند و بدین طریق، تماس حرارتی ایجاد می‌شد، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که وجود پوشش در جلوی کلکتور مقدار راندمان حرارتی را زیاد می‌کند. سندنک و رکستاد [۱۱] یک مدل کلکتور فتوولتائیک - حرارتی پلیمری را مورد آزمایش و ارزیابی قرار دادند و زونداگ و همکاران [۱۲] مدل‌های یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی را برای تحلیل عملکرد کلکتور PV/T توسعه دادند و نشان دادند که مدل یک بعدی دائم به خوبی دو مدل دیگر می‌تواند عملکرد کلکتور PV/T را پیش‌بینی کند. بازیلیان و پراساد [۱۳] یک مدل عددی برای سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی در حالت جابجایی آزاد ارائه کردند. هوانگ و همکاران [۱۴] دو نمونه کلکتور PV/T بدون پوشش بر اساس ساز و کار ورق و لوله ساختند که راندمان الکتریکی برابر ۹٪ و راندمان حرارتی ۳۸٪ حاصل شد. تیواری و سودا [۱۵]

یک مطالعه شبیه‌سازی بر روی کلکتور PV/T انجام دادند که ۳۵٪ راندمان حرارتی به همراه ۹٪ راندمان الکتریکی محاسبه شد. یک سیستم PV/T ترموسیفون به همراه یک مدول بر پایه جاذب نوع کانال آلومینیومی جهت بهینه‌سازی انتقال حرارت به سیال توسط چو و همکاران [۱۶] ساخته شد. جی و همکاران [۱۷] یک نمونه PV/T توسعه داده شده که در آن سطح کلکتور به طور کامل با سلول‌های PV پوشیده شده بود را ارائه کردند که در آن میانگین راندمان حرارتی روزانه بیش از ۴۵٪ و راندمان الکتریکی ۱۰٪ حاصل شد. علاوه بر این، محاسبات بر روی راندمان یک کلکتور PV/T با جاذب کانال به عنوان تابعی از عرض کانال که در آن اثرات ورودی نیز در نظر گرفته می‌شد، توسط جی و همکاران [۱۸] ارائه شد. کالگرو و تریپانگ نستوپولوس [۱۹] هر دو شیوه ترموسیفون و گردش اجباری آب را آزمایش نمودند و نشان دادند که از نظر اقتصادی سیستم‌های ترکیبی برای تولید انرژی الکتریکی و حرارتی به طور همزمان بسیار مناسب هستند. تونی و تریپانگ نستوپولوس [۲۰] اصلاحاتی بر روی سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی انجام دادند و آن را به دو صورت انتقال حرارت اجباری و آزاد مورد بررسی قرار دادند. جوشی و تیواری [۲۱] به بررسی انرژی و اگسرژی سیستم فتوولتائیک - حرارتی با استفاده از آب پرداختند. دابی و تیواری به مدلسازی و بررسی آزمایشگاهی عملکرد کلکتور PV/T مایعی پرداختند و بیانی تحلیلی برای معادله مشخصه کلکتور بر حسب پارامترهای جوی و طراحی به دست آوردند و نشان دادند که راندمان کلکتور PV/T نسبت به کلکتور حرارتی معمولی بیشتر است. تیواری و همکاران [۲۲] به بررسی عملکرد انرژی و اگسرژی یک کلکتور PV/T گرمایش آب با دبی جریان جرمی ثابت پرداختند و گزارش کردند که راندمان اگسرژی سیستم به ازای دبی جرمی آب مصرفی  $0.06 \text{ Kg/s}$  حداکثر است. ویلسون [۲۳] در تحقیق خود پیشنهاد نمود برای خنک کاری مدول فتوولتائیک از جریان آب در پشت مدول استفاده شود. نتایج آزمایش‌های او کاهش در دمای مدول، افزایش توان الکتریکی و راندمان الکتریکی را نشان داد. سرحدی و همکاران [۲۴] به ارزیابی و بهینه‌سازی عملکرد یک آرایه فتوولتائیک از منظر قانون دوم ترمودینامیک پرداختند و نشان دادند اگر گرما به نحوی از سطح مدول فتوولتائیک جذب شود، بازدهی اگسرژی آن بهبود می‌یابد. همچنین ملاحظه کردند بازدهی اگسرژی سیستم فتوولتائیک بسیار شبیه بازدهی الکتریکی آن است و حالت بهینه کارکرد سیستم زمانی رخ می‌دهد که دمای مدول فتوولتائیک نزدیک به دمای محیط اطراف آن باشد. چو [۲۵، ۲۶] یک مدل دینامیکی صریح براساس تفاضل محدود برای سیستم فتوولتائیک با کلکتور حاوی سیال عامل آب ارائه کرد. او گزارش کرد که در یک کلکتور مناسب بازده ترکیبی را می‌توان بالای ۷۲٪ نیز رساند، و در یک کلکتور نامناسب این میزان به زیر ۶۲٪ می‌رسد. نتایج بازدهی حرارتی و الکتریکی برای کلکتور با پوشش شیشه‌ای به ترتیب ۵۰٫۳٪ و ۹٫۳٪ و برای بدون پوشش ۴۰٫۸٪ و ۱۲٫۱٪ است. سوپنیل و اندرو [۲۷] دو نمونه مختلف از کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی که در آن نوع اول شامل مدول سیلیکونی منوکریستالی یکپارچه شده با کلکتور حرارتی نوع ورق و لوله و نوع دوم شامل مدول سیلیکونی پلی کریستالی یکپارچه شده با کلکتور حرارتی نوع صفحه موازی را ارزیابی کردند. 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 PV/T حدود ۰٫۴٪ بالاتر از مدول فتوولتائیک عادی است. سوهالی عبدالحمید و همکاران [۲۸] به ارائه نمای کلی کلکتور فتوولتائیک - حرارتی ترکیبی، با ترکیب مدول فتوولتائیک با اساس سیستم هوا و آب در یک سیستم پرداختند. این ایده دوسیالی نه تنها به تولید الکتریسیته بلکه به تولید هوا و آب داغ همزمان منجر شد. این ایده برای دستیابی به بازدهی کلی و بهتر انرژی به خصوص در تولید الکتریسیته در نظر گرفته شده است و این افزایش بازدهی به دلیل خروج همزمان گرمای مدول فتوولتائیک توسط سیال آب و هوا است. به مونسى و جعفر کاظمی [۲۹] مدول فتوولتائیک و هشت طرح متفاوت از کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی نوع ورق و لوله با طرح‌های لوله ماریچی (مقطع گرد) و لوله موازی (مقاطع گرد، مربعی و مستطیلی) را به صورت تئوری و به کمک نرم افزار متلب مدلسازی حرارتی کردند بر طبق نتایج به دست آمده از تحقیق آنان، 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.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته به وضوح می‌توان دریافت که عامل دما تاثیر اساسی بر روی راندمان مدول PV (هم در زمانی که به صورت مجزا و هم در مواقعی که در ساخت کلکتور PV/T مورد استفاده قرار گیرد) می‌گذارد. بنابراین نیاز است تا یک مقایسه جامع بین مکانیزم‌های مختلف دفع حرارت از مدول PV انجام شود و اثر این دفع حرارت توسط یک آزمایش تجربی دیده شود؛ که در آن راندمان الکتریکی مدول PV

<sup>4</sup> Monocrystalline Silicon Modulus

ساده با راندمان مدول PV یکپارچه شده توسط کلکتور حرارتی با یکدیگر مقایسه شود. به همین خاطر در این تحقیق، ابتدا ایده‌های مختلف برای کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی با بکارگیری سیال هوا، آب و یا ترکیبی از این دو طبقه‌بندی و سپس اشکال مختلف آن‌ها بررسی شده‌اند. در ادامه به کمک مرجع [۱۲]، راندمان حرارتی و الکتریکی ۹ طرح مختلف از کلکتور PV/T به صورت تئوری بررسی شده و سپس با استفاده از مرجع [۳۰]، راندمان الکتریکی کلکتور PV/T نوع ورق و لوله برای سیال آب به واسطه مدول PV شاهد تحت آزمایش تجربی قرار گرفتند. نتایج این دو مقایسه گویای آن هستند که در شرایطی که دمای سیال عامل پایین باشد، استفاده از کلکتور فتوولتائیک - حرارتی بجای کلکتور حرارتی یا مدول PV مجزا مفید واقع می‌شود

## ۲- بازده حرارتی و الکتریکی کلکتور PV/T

راندمان حرارتی لحظه‌ای کلکتور PV/T به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود: [۱۵، ۳۱]

$$\eta_i = F_R \left[ h_{p1} h_{p2} (\alpha\tau)_{eff} - U_L \frac{T_{f,in} - T_a}{G} \right] = \frac{\dot{Q}_u}{A_c \times G} \quad (1)$$

که در آن پارامترهای  $T_a$ ،  $T_{f,in}$  و  $G$  به ترتیب دمای سیال ورودی، دمای محیط و تابش خورشیدی است. ضرایب دیگر به ساخت کلکتور PV/T مربوط می‌شود که در آن  $A_c$  مساحت کلکتور و  $\dot{Q}_u$  توان مفید خروجی هستند.  $h_{p1}$  و  $h_{p2}$  به ترتیب برابر فاکتور جریحه در انتقال حرارت از بالا و پایین PV/T است. همچنین  $U_L$  ضریب انتقال حرارت کلی (از بالا و پایین)،  $F_R$  ضریب تفکیک گرمایی و  $(\alpha\tau)_{eff}$  ضریب جذب - عبور موثر است. در این رابطه راندمان حرارتی کلکتور PV/T به نسبت  $(T_{f,in} - T_a)/G$  وابسته است. بنابراین در صورتی که دمای سیال ورودی پایین باشد نسبت  $(T_{f,in} - T_a)/G$  به مقدار صفر میل کرده و راندمان حداکثر می‌شود.

راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک  $\eta_{el}$  به عنوان تابعی از دما برابر است با: [۳۲، ۳۳]

$$\eta_{el} = \eta_o [1 - \gamma(T_c - T_o)] \quad (2)$$

$\eta_o$  راندمان مرجع مدول فتوولتائیک در دمای  $25^\circ\text{C}$  و تابش خورشیدی  $1000 \text{ W/m}^2$  است.  $\gamma$  ضریب دمای راندمان سیلیکون،  $T_c$  دمای سلول خورشیدی و  $T_o$  دمای مرجع هستند. این مقادیر برای سیلیکون مونو کریستال برابر است با: [۳۴]

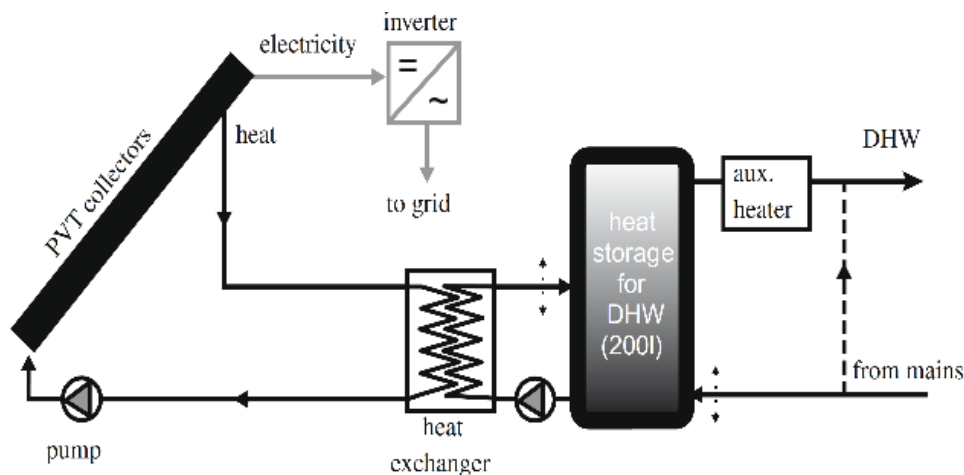
$$\eta_o = 0/12 \quad T_o = 25^\circ\text{C} \quad \gamma = 0.0045 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

با توجه به رابطه (۲)، با افزایش دمای سلول، راندمان الکتریکی خروجی کاهش می‌یابد

## ۳- سیستم آبگرمکن خورشیدی PV/T<sup>۵</sup>

شکل ۲ شماتیک یک سیستم آبگرمکن خورشیدی ترکیبی PV/T را نشان می‌دهد. آبگرمکن خورشیدی ابزاری است که از انرژی خورشیدی به منظور گرم کردن آب استفاده می‌کند. یک سیستم آبگرمکن خورشیدی متشکل از یک کلکتور حرارتی، یک مخزن ذخیره سازی عایق شده و اتصال خط لوله است. مدول آبگرمکن خورشیدی PV/T، انرژی خورشید را به وسیله یک جاذب رو به خورشید، به منظور دست یافتن به بیشترین توان خروجی ممکن جمع‌آوری می‌کند.

<sup>5</sup> PV/T Solar Water Heater System



شکل ۲: نمای شماتیک یک سیستم آبگرمکن با کلکتور PV/T [۳۵]

گرمای جمع‌آوری شده از طریق جاذب به جریان آب منتقل شده و در مخزن ذخیره می‌شود. مخزن ذخیره عایق بندی شده است به طوری که آبگرم در مدت طولانی باقی می‌ماند و می‌تواند در هر زمانی از روز و یا حتی روز بعد مورد استفاده قرار گیرد. به دو طریق آب گرم بین مخزن ذخیره و کلکتور گردش می‌کند:

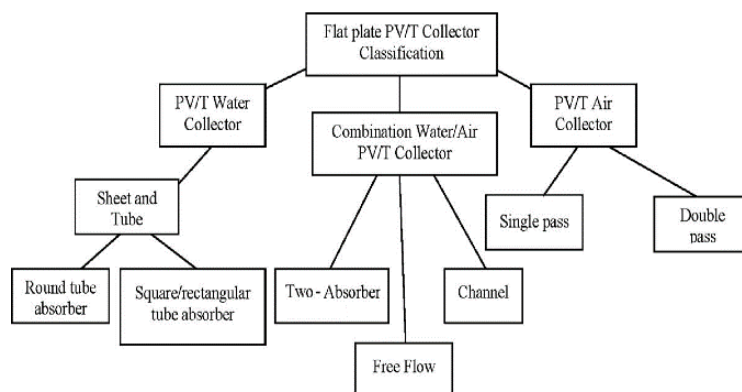
(۱) ترموسیفون: که در آن گردش آب گرم توسط همرفت طبیعی انجام می‌گیرد

(۲) گردش اجباری: که در آن یک پمپ کوچک برای جریان آب مورد نیاز است

در حالت گردش اجباری، از یک پمپ آب در ورودی کلکتور جهت انتقال آبگرم قابل استفاده از هدر بالایی کلکتور به مخزن ذخیره استفاده می‌شود. همچنین کلکتورها می‌توانند به منظور دست یافتن به دماهای کاری بالاتر به صورت سری به یکدیگر متصل شوند. همچنین می‌توان از یک پمپ DC که توسط مدول PV کار می‌کند برای گردش اجباری آب استفاده کرد که این مدول PV با کلکتور ادغام شده است. مساحت ادغام مدول PV به میزان نیاز آبگرم یا تولید برق بستگی دارد.

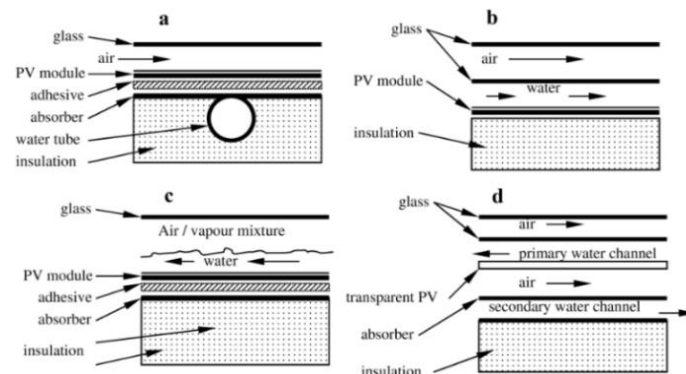
#### ۴- دسته‌بندی کلکتورهای خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی

در مراجع گوناگون طبقه‌بندی‌های متفاوتی برای PV/T گفته شده است. در حالت کلی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی را می‌توان به صورت شکل ۳ طبقه‌بندی کرد:



شکل ۳: طبقه‌بندی کلکتورهای PV/T صفحه تخت [۳۶]

شکل ۴ ساختارهای مختلف در ساخت کلکتورهای PV/T با سیال عامل هوا/آب را نشان می‌دهد. استفاده از ساختار ترکیبی سیال عامل (هوا و آب) موجب بهرمندی حداکثری از تابش خورشیدی می‌شود.

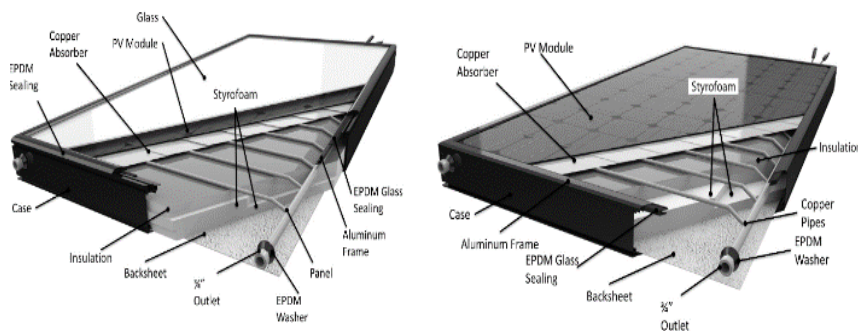


شکل ۴: انواع کلکتورهای PV/T: (a) ورق و لوله (b) کانال (c) جریان آزاد (d) دوجاذبه [۱۲، ۳۷]

#### ۴-۱- کلکتور فتوولتائیک - حرارتی خورشیدی برای سیال آب

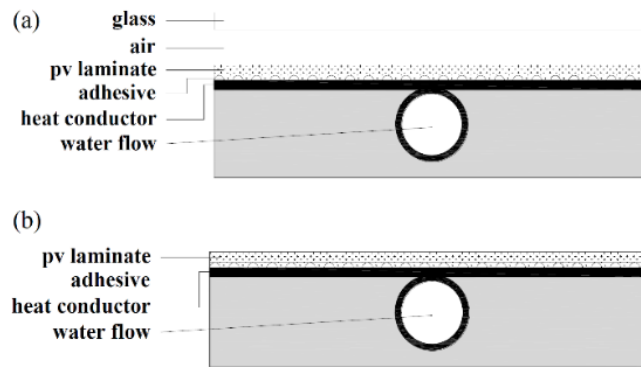
کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی با سیال عامل آب ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی بالایی دارند در نتیجه نرخ انتقال حرارت در واحد سطح در این نوع کلکتورها بالا بوده و به تبع آن دارای بازدهی کلی بالایی هستند. مایع چگالی بالایی نسبت به هوا دارد، بنابراین دبی کمتری از سیال برای استحصال میزان یکسانی حرارت از سلولها نیاز است. در این کلکتورها برای گردش سیال خنک کننده در کلکتور می توان از سیستم ثقلی (ترموسیفون) کمک گرفت که سبب کاهش در هزینه ها می شود. به طور کلی کلکتورهای PV/T به دو نوع زیر تقسیم بندی می شوند:

- کلکتور PV/T پوشش دار: انرژی حرارتی بیشتری تولید می کند اما دارای عملکرد الکتریکی پایین تری است.
- کلکتور PV/T بدون پوشش: انرژی حرارتی نسبتاً کمتری تولید می کند اما دارای عملکرد الکتریکی بهتری است.



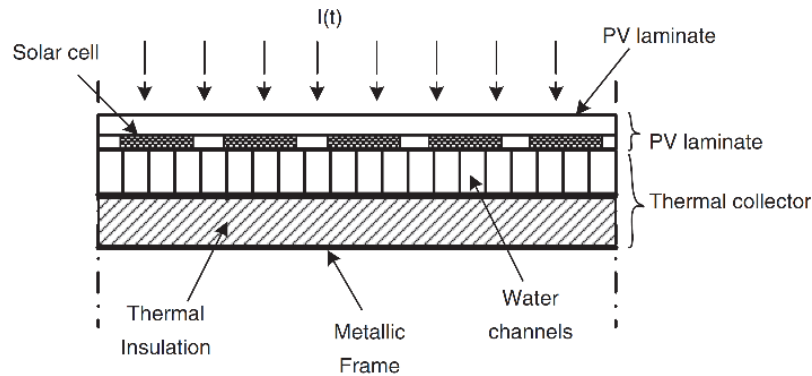
شکل ۵: کلکتور PV/T صفحه تخت برای جریان سیال آب نوع پوشش دار و بدون آن [۸]

کلکتور PV/T پوشش دار (شکل ۵ سمت چپ) از نظر ظاهری شباهت بسیاری با کلکتورهای حرارتی صفحه تخت دارند. که متشکل از یک جاذب تحت پوشش PV، در یک جعبه کلکتور عایق با یک پوشش شیشه ای است. عایق بندی پوشش شیشه ای به دلیل انعکاس تابش خورشیدی و افزایش دمای مدول PV ناشی از پوشش شیشه ای، منجر به افزایش راندمان حرارتی و کاهش راندمان الکتریکی می شود. کلکتور PV/T بدون پوشش (شکل ۵ سمت راست) بیشتر شبیه به مدول PV ساده است. کلکتور PV/T بدون پوشش، متشکل از یک جاذب تحت پوشش PV است که هیچ گونه پوشش شیشه ای اضافی ندارد. از سوی دیگر، راندمان الکتریکی یک کلکتور PV/T بدون پوشش بالاتر از یک کلکتور PV/T پوشش دار و حتی بالاتر از مدول های PV ساده به علت اثر خنک کنندگی مدول PV است. به غیر از سیال آب یا هوا، سیالات دیگر از قبیل روغن ها و سیالات مورد استفاده در سیستم های تبریدی به علت هزینه های بالا و عدم بهره روری اقتصادی مورد استفاده قرار نمی گیرند. عملکرد حرارتی و الکتریکی یک کلکتور PV/T نوع مایع به طراحی جاذب وابسته است. جاذب که در تماس با مدول PV و لوله های مایع است، به دلیل انتقال حرارت از مدول PV به سیال خنک کننده، بسیار حائز اهمیت است. شکل ۶ (a) و (b) به ترتیب کلکتور فتوولتائیک - حرارتی پوشش دار و بدون پوشش نوع ورق و لوله را نشان می دهد.



شکل ۶: نمای مقطعی کلکتور PV/T ورق و لوله پوشش دار [۳۸]

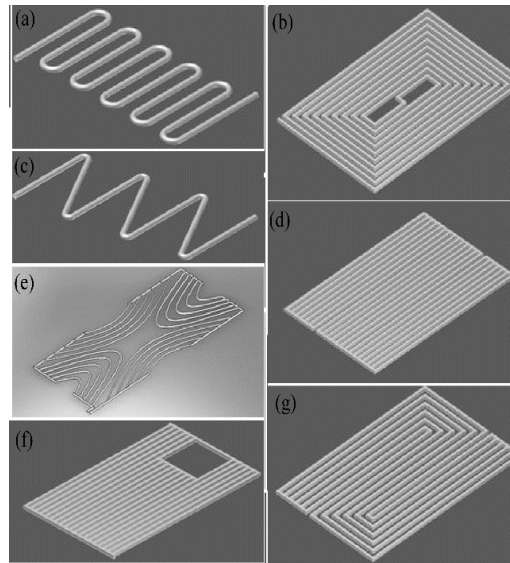
شکل ۷ کلکتور فتوولتائیک - حرارتی با جاذب کانال را نشان می‌دهد که در آن کلکتور شامل یک مدول PV و یک کانال ساخته شده از صفحات آلومینیومی است. کانال آلومینیومی توسط یک چسب رسانای حرارتی به پشت مدول PV متصل شده است.



شکل ۷: نمای مقطعی یک کلکتور PV/T نوع کانال [۲۷]

پوسته محافظ (تدلار) پوشش نازک محافظی است که در کاربردهای مختلف از جمله در مدول‌های PV به منظور تفکیک‌سازی سیال، جلوگیری از زنگ‌زدگی، مقاوم سازی در برابر رطوبت، مقاومت در برابر اشعه UV و عایق‌سازی الکتریکی استفاده می‌شود. جاذب کلکتور نقش بسیار مهمی را در سیستم PV/T ایفا می‌کند. این جاذب دمای سلول یا مدول PV را پایین آورده، همزمان انرژی حرارتی تولید شده را به صورت خروجی آب یا هوا گرم تبدیل می‌کند. وقتی که این روند رخ دهد راندمان سلول یا مدول PV افزایش می‌یابد. با هدف جلوگیری از آسیب دیدگی مدول PV در سیال عامل آب، از جاذب ورق و لوله استفاده می‌شود که در آن لوله به صفحه جاذب جوش خورده و صفحه توسط چسب به زیر مدول PV متصل است. در شکل ۸، ایده‌های متفاوت طراحی جاذب حرارتی را نشان می‌دهد.





شکل ۸: انواع جاذب‌های مورد استفاده در کلکتورهای PV/T نوع ورق و لوله: (a) نوسانی (b) مارپیچی (c) زیگزاگی (d) مارپیچی موازی اصلاح شده (f) جریان مستقیم (e) شبکه‌ای (g) مارپیچی موازی [۳۹]

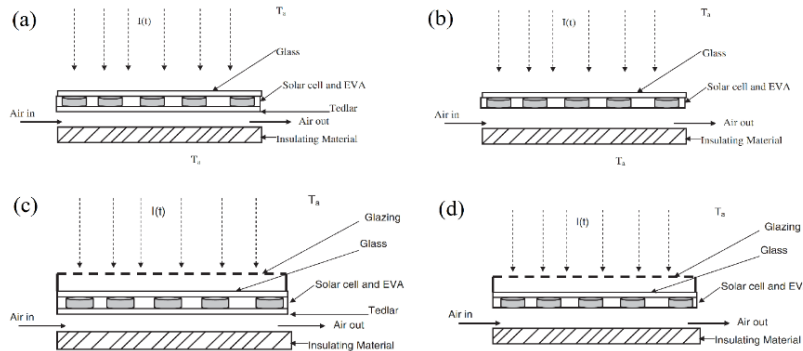
#### ۴-۲- کلکتور فتوولتائیک - حرارتی برای سیال هوا

کلکتورهای PV/T هوا برای گرمایش هوا و تولید الکتریسیته به طور همزمان استفاده می‌شوند. هوای داغ برای مقاصد گرمایش فضا و خشک کردن بکار می‌رود. در کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی با سیال عامل هوا، امکان یخ‌زدگی و جوشش سیال که سبب توقف عملکرد دستگاه می‌شود وجود ندارد. همچنین در صورت بروز نشتی آسیبی به سیستم وارد نمی‌شود و در استفاده طولانی مدت استهلاک سیستم کمتر و نیز هزینه‌های اولیه نسبت به کلکتورهای با سیال مایع کمتر است. پیش از این ساختارهای مختلف مسیر عبور هوا توسط محققان مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است که برخی از طرح‌ها و نتایج به دست آمده در این بخش مورد بحث قرار گرفته است.

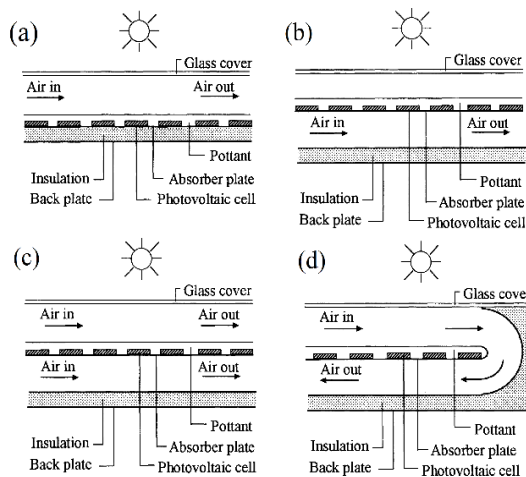
کلکتور PV/T صفحه موازی، سطوح انتقال حرارت را افزایش می‌دهد از اینرو دارای عملکرد حرارتی بهتری است. در شکل ۹ مقطع عرضی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی نوع صفحه موازی بدون پوشش و دارای پوشش برای جریان سیال هوا نشان داده شده است که در آن دو طرح شکل ۹ (a) و (c) و همین‌طور (b) و (d) به ترتیب کلکتور PV/T دارای تدلار و بدون تدلار است. به منظور کاهش افت اتلاف حرارت از بالای مدول PV به محیط، از کلکتور هوای PV/T پوشش‌دار استفاده می‌شود. در حالت بدون تدلار هوا از زیر مدول PV جریان می‌یابد و تابش خورشیدی عبوری، از طریق سطح غیر تراکمی آن دریافت می‌شود. بارگاو و همکاران [۴۰] هوا گرمکن خورشیدی ترکیبی با سلول‌های خورشیدی را مطالعه کرده‌اند. سوفیان [۹] سیستم‌های فتوولتائیک - حرارتی پوشش‌دار هوا را برای هوا گرمکن یک و دو کاناله به منظور گرمایش فضا و خشک کردن بررسی کردند. حجازی و همکاران [۸] چهار شکل مختلف از کلکتورهای هوای PV/T را مورد مطالعه قرار دادند و مشاهده کردند که ساختار با جریان هوا بین پوشش شیشه‌ای بالا و سلول خورشیدی، راندمان کلی در حدود ۵۵٪ با دبی جرمی هوای  $0.04 \text{ Kg/s}$  می‌دهد. ساندرس و رکستد [۱۱] رفتار یک کلکتور PV/T ترکیبی بدون پوشش را بررسی کردند. آن‌ها توصیه کردند که ایده PV/T ترکیبی باید برای کاربردهای حرارتی دما پایین همچون گرمایش فضای ساختمان مورد استفاده قرار گیرد. همچنین زاخارچنکو و همکاران [۴۱] ثابت کردند که لزومی ندارد تا برای دست یافتن به راندمان الکتریکی بالاتر، سطح مدول PV و کلکتور حرارتی در کلکتور PV/T یکسان باشد. کاونتری [۴۲] عملکرد یک کلکتور خورشیدی PV/T متمرکزکننده را مطالعه کرد و گزارش داد که راندمان کل حرارتی و الکتریکی سیستم، به ترتیب برابر ۵۸٪ و ۱۱٪ است که راندمان کل ۶۹٪ را ارائه می‌دهد. شکل ۱۰ ساختارهای متفاوتی از مسیرهای عبور سیال را برای کلکتور PV/T هوا به تصویر می‌کشد. شکل ۱۰ (a) کلکتور PV/T پوشش‌دار نوع صفحه موازی را نمایش می‌دهد که در آن مسیر عبور هوا از روی مدول PV انتخاب شده است؛ در حالی که در شکل ۱۰ (b) مسیر عبوری هوا از زیر مدول PV است. شکل ۱۰ (c) و (d) به ترتیب مربوط به کلکتور PV/T دوکاناله جریان دوگذر و تک‌گذر است.



در شکل ۱۱ به منظور بهینه‌سازی ضریب انتقال حرارت به سیال هوا از جاذب پیشرفته‌تری بهره گرفته شده است که طوری که شکل ۱۱ (a) کلکتور هوای PV/T بدون پوششی را نمایش می‌دهد که در آن از یک ورق فلزی نازک (TMS) در میانه مجرای هوا استفاده شده است. شکل ۱۱ (b) کلکتور هوای PV/T بدون پوشش و دارای پوشش پره‌دار را نشان می‌دهد. پره‌ها با مقطع مستطیلی، به دیوار پشتی مجرای هوا و به موازات جهت جریان هوا متصل شده‌اند. تونی و تریپاناک نستوپولوس [۴۳] برای دستیابی به راندمان حرارتی بالاتر، عملکرد کلکتور هوای دارای TMS و پره‌دار را به صورت تئوری و تجربی بررسی کرده و نشان دادند که استفاده از این دو طرح سبب بهبود عملکرد PV/T شده است. عثمان و همکاران [۴۴] عملکرد کلکتور هوای خورشیدی PV/T دو کاناله دارای متمرکزکننده سهموی مرکب (CPC) و پره‌ها را مورد مطالعه قرار دادند که در آن جاذب کلکتور شامل آرایه‌ای از سلول‌های خورشیدی جهت تولید الکتریسیته بود، CPC و پره‌ها به طرف پشت صفحه جاذب متصل بودند. عثمان و همکاران [۴۵] هوا گرمکن‌های خورشیدی PV/T پره‌دار دو کاناله را مورد بررسی قرار دادند که در آن پره‌ها به صورت موازی با طول کلکتور و در طرف پشت صفحه جاذب یعنی به کانال زیرین متصل شده بودند. در شکل ۱۱ (c) هوا از کانال بالایی جریان یافته و به طور مستقیم توسط خورشید گرم می‌شود. سپس هوا از کانال پایینی عبور می‌کند. وجود پره‌ها در پشت مدول فتوولتائیک سبب افزایش انتقال حرارت به هوا و بالا بردن راندمان سیستم می‌شود.

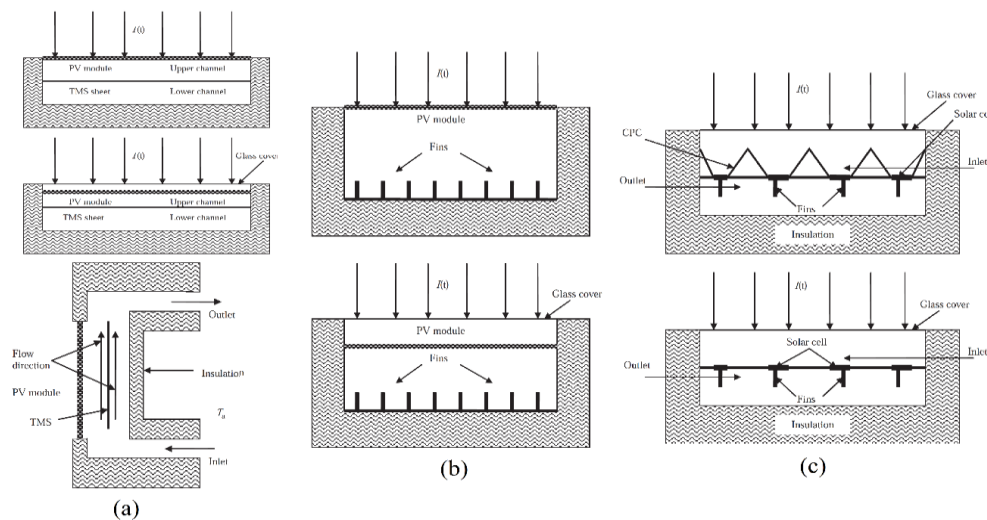


شکل ۹: انواع ساختار کلکتور PV/T صفحه موازی پوشش‌دار و بدون پوشش [۴۶]



شکل ۱۰: ساختارهای مختلف کلکتور PV/T هوا بر اساس نوع جاذب: (a) جریان هوا از روی جاذب (b) جریان هوا از زیر جاذب (c) جریان هوا از هر دو طرف جاذب برای جاذب دوپاس (d) جریان هوا از دو طرف جاذب برای جاذب تک‌پاس [۴۷]

<sup>6</sup> Thin Metal Sheet



شکل ۱۱: انواع دیگری از جاذب‌های مورد استفاده در کلکتور PV/T هوا: (a) با خنک‌سازی هوا (b) دارای ورق فلزی نازک (TMS) (c) پره‌دار بدون پوشش و پوشش‌دار (d) نوع CPC با پره و نوع پره‌دار [۳۲]

## ۵- نتایج و بحث

پارامترهای موثر بر عملکرد کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی عبارتند از: فاکتور تراکم، دبی جرمی، تعداد پوشش شیشه‌ای، دمای سیال عامل، هدایت حرارتی جاذب به سیال و در کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی آبی پارامترهای طراحی صفحه جاذب از قبیل فاصله لوله‌ها، قطر لوله و ضخامت پره.

فاکتور تراکم: از دلایل عمده در کاهش راندمان الکتریکی مدول PV فاکتور تراکم مدول PV است. بازده الکتریکی کلی مدول PV را می‌توان با افزایش فاکتور تراکم و کاهش دمای مدول PV به وسیله خروج انرژی حرارتی مدول PV بیشتر کرد. فاکتور تراکم به عنوان نسبت مساحت کل سلول خورشیدی به مساحت کل مدول تعریف می‌شود.

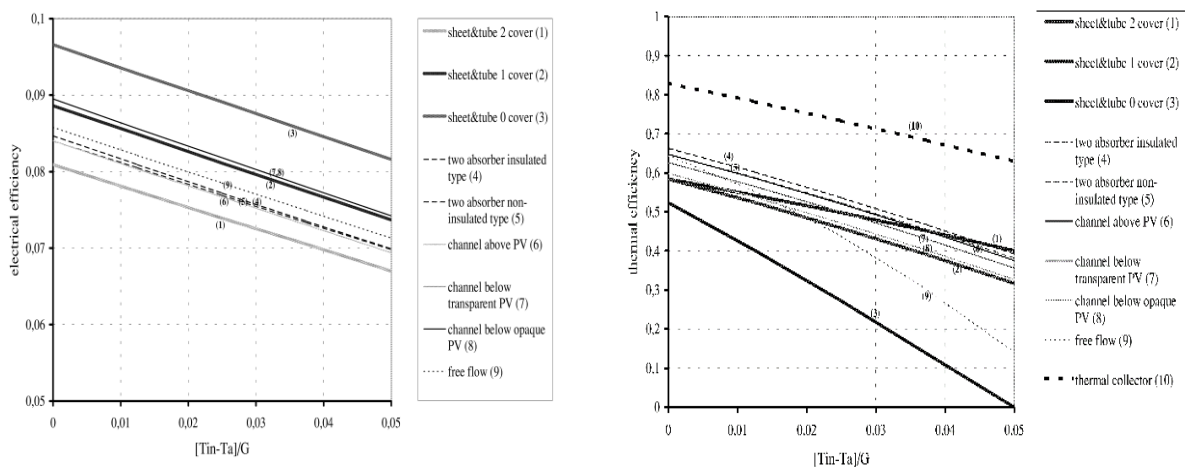
نرخ جریان جرمی: پژوهشگران بسیاری به وابستگی دبی جرمی سیال بر راندمان حرارتی کلکتور PV/T اشاره کرده‌اند. یعنی هنگامی که سرعت آب در لوله افزایش می‌یابد ضریب انتقال حرارت لوله نیز افزایش می‌یابد که خود موجب حداکثر شدن خنک‌کاری PV و انتقال حرارت به آب می‌شود. دمای سیال عامل: با توجه به رابطه (۱) در صورتی که دمای سیال ورودی بالا باشد نسبت  $[T_{f,in} - T_a]/G$  افزایش یافته در نتیجه راندمان حرارتی کلکتور PV/T کاهش می‌یابد که این خود سبب بالا رفتن دمای سلول و افت کارایی آن می‌گردد.

هدایت حرارتی جاذب: جنس، نحوه ساخت و طراحی جاذب از عوامل تاثیر گذار در خروج حرارت و افزایش راندمان کلکتور PV/T است. پوشش شیشه‌ای: تاثیر اضافه کردن پوشش شیشه‌ای به کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی موجب کم کردن اتلاف حرارت به محیط می‌شود. اگر چه جذب انرژی نیز توسط بازتاب از شیشه حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد. جاذب حرارتی سلکتیو تشعشع را بیشتر جذب می‌کند. پوشاندن جاذب با سلول‌های PV، جذب انرژی توسط کلکتور و ضریب اتلاف حرارت را کاهش می‌دهد. به علاوه اضافه کردن پوشش شیشه‌ای به کلکتور اتلاف حرارت به محیط را کم کرده و همچنین موجب کاهش انرژی جذب شده توسط کلکتور به خاطر بازتاب از شیشه می‌شود. کلکتور PV/T بدون پوشش بیشترین انرژی الکتریکی را تولید می‌کند. این عملکرد کلکتورهای PV/T را می‌توان اولاً به عبور کلی تشعشع به سلول‌های PV و ثانیاً به سرد کردن سلول‌های PV نسبت داد. از سوی دیگر بدترین عملکرد الکتریکی مربوط به کلکتورهای PV/T پوشش‌دار به خاطر کاهش عبور تشعشع به واسطه حضور پوشش شیشه‌ای است.

<sup>7</sup> Fill Factor

زندگ و همکاران [۱۲] به مطالعه عددی بر روی راندمان حرارتی و الکتریکی مدل‌های مختلفی از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی نسبت به پارامتر ترکیبی  $[T_{f,in} - T_a]/G$  پرداختند که نتایج آن در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ نشان داده شده است. بر این اساس افزایش نسبت  $[T_{f,in} - T_a]/G$  موجب افت راندمان حرارتی و الکتریکی کلکتور PV/T می‌شود. بنابراین در صورتی که دمای سیال ورودی پایین و نزدیک به دمای هوای محیط باشد راندمان حرارتی و الکتریکی کلکتور PV/T حداکثر می‌شود.

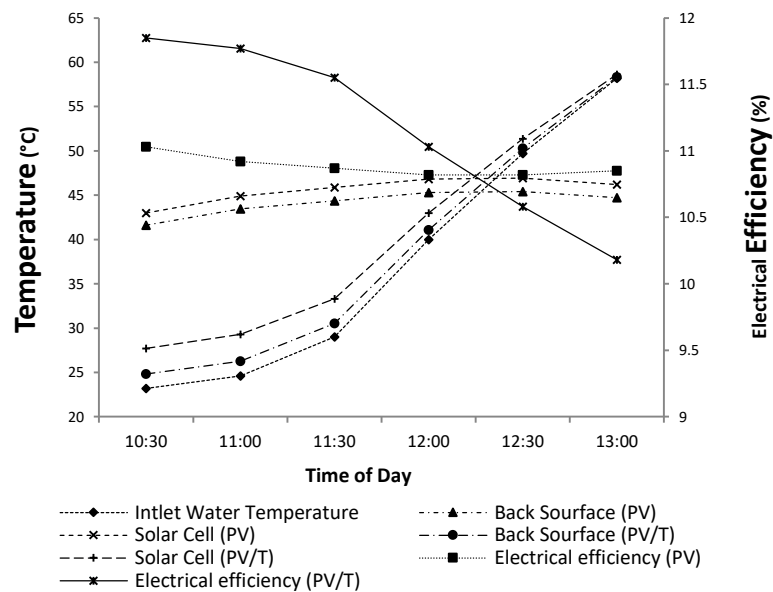
در شکل ۱۲ کلکتور PV/T بدون پوشش نوع ورق و لوله عملکرد حرارتی ضعیفی را به خاطر اتلاف زیاد حرارت از بالا به محیط دارد. این در حالی است که کلکتور حرارتی ماکزیمم راندمان حرارتی را به خود اختصاص داده است. همچنین عملکرد حرارتی کلکتور PV/T دو پوشش بیشتر از یک پوشش و کمتر از نوع دو جاذب است. همچنین از شکل ۱۳ واضح است که بهترین عملکرد الکتریکی در کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی، مربوط به نوع بدون پوشش بوده که با نتایج دیگر محققان سازگار است. از سوی دیگر راندمان الکتریکی کلکتور نوع ورق و لوله دو پوشش به طور چشمگیری کاهش یافته است.



شکل ۱۲: راندمان حرارتی برای اشکال مختلف کلکتور فتوولتائیک - حرارتی [۱۲] - شکل ۱۳: راندمان الکتریکی برای اشکال مختلف کلکتور فتوولتائیک - حرارتی [۱۲]

به مونسى و جعفر کاظمى [۳۰] در آزمایش خود از دو عدد مدول فتوولتائیک مشابه  $40W$  استفاده کردند که یک مدول به عنوان شاهد و دیگری در ساخت کلکتور PV/T نوع ورق و لوله بدون پوشش بکار گرفته شد. نتایج این تحقیق بهبود عملکرد الکتریکی کلکتور PV/T نسبت به مدول فتوولتائیک شاهد را نشان می‌داد.

در شکل ۱۴، تاثیر افزایش دمای آب ورودی بر راندمان الکتریکی کلکتور PV/T بدون پوشش نوع ورق و لوله و مقایسه آن با مدول PV شاهد در شرایطی که تابش خورشیدی و دمای محیط در طول آزمایش تقریباً ثابت بوده‌اند را نشان می‌دهد. با توجه به این شرایط دمای مدول PV تغییر زیادی نداشته و بر طبق رابطه (۲)، راندمان الکتریکی مدول PV شاهد تقریباً یکسان مانده است.



شکل ۱۴: نمودار تغییر راندمان الکتریکی مدول PV شاهد و کلکتور PV/T بر اساس افزایش دمای آب ورودی در ساعات مختلف روز [۳۰]

آزمایش کلکتور PV/T به نحوی صورت پذیرفت که در آن دمای آب ورودی در مدت زمان تست توسط هیترهای موجود در مخزن افزایش داده می‌شد. به همین خاطر، از ساعت ۱۰:۳۰ تا ساعت ۱۲:۱۵ به دلیل اینکه دمای آب ورودی پایین است، راندمان الکتریکی کلکتور PV/T نسبت به مدول PV شاهد بالاتر است؛ با افزایش دمای آب ورودی، نسبت  $[T_{f,in} - T_a]/G$  افزایش یافته و بر اساس رابطه (۱)، راندمان کلکتور PV/T نسبت به مدول PV در ساعت ۱۲:۱۵ تا ۱۳:۰۰ کمتر شده است که این خود لزوم گردش سیال در دمای پایین‌تر از دمای سطح مدول PV را یادآور می‌شود.

با توجه به بخش‌های ۱-۴ و ۲-۴ استفاده از جاذب‌های توسعه داده شده (هم برای سیال آب و هم سیال هوا) امکان بهره‌گیری حداکثری از تابش خورشیدی را بر روی یک سطح یکسان از کلکتور فراهم می‌کند. مضاف بر این، با نگاهی به مراجع [۱۲] و [۳۰] به وضوح می‌توان دریافت که استفاده از کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی مقرون به صرفه است چرا که در عمل موجب بهبود راندمان کلی (حرارت + الکتریکی) دستگاه PV/T در قیاس با کلکتور حرارتی یا مدول PV مجزا شده است. لازم به ذکر است که این راندمان کل بالاتر در صورتی میسر می‌شود که دمای سیال عامل (ورودی) پایین باشد و موجب دفع حرارت از مدول و افزایش راندمان خروجی آن گردد.

#### ۶- نتیجه‌گیری

کلکتور خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی (PV/T) دستگاهی است که به‌طور همزمان تابش خورشیدی را به الکتریسیته و حرارت تبدیل می‌کند. هنگامیکه مدول فتوولتائیک در معرض نور خورشید قرار می‌گیرد بخشی از تشعشع خورشیدی جذب شده که به الکتریسیته تبدیل نشده‌اند، به انرژی حرارتی تبدیل شده و موجب کاهش راندمان الکتریکی مدول فتوولتائیک می‌گردد. این اثر نامطلوب که منجر به افزایش دمای سطح سلول‌ها می‌شود، می‌تواند به واسطه یکپارچه‌سازی کلکتور حرارتی با مدول فتوولتائیک در یک دستگاه واحد برطرف گردد.

در این تحقیق ابتدا کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی خورشیدی تعریف و سپس روابط، دسته‌بندی و ساختارهای مختلفی آن ذکر گردید. سپس به کمک مرجع [۱۲]، راندمان حرارتی و الکتریکی مدل‌های مختلفی از کلکتور PV/T به صورت تئوری با یکدیگر مقایسه شدند. در ادامه با استفاده از مرجع [۳۰] راندمان الکتریکی خروجی کلکتور PV/T نوع ورق و لوله با سیال آب به همراه مدول PV ساده در ساعات مختلف روز مقایسه شدند. بر این اساس می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- بکارگیری کلکتور ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی بجای مدول PV ساده، سبب کاهش دمای سطح، افزایش راندمان الکتریکی و طول عمر مدول‌های فتوولتائیک می‌شود.

- ۲- اضافه کردن پوشش شیشه‌ای در کلکتور PV/T موجب افزایش راندمان حرارتی می‌گردد. در حالی که در کلکتور PV/T بدون پوشش به دلیل خنک‌سازی بهتر مدول فتوولتائیک، راندمان الکتریکی در مقایسه با مدول فتوولتائیک ساده و کلکتور PV/T دارای پوشش بیشتر است.
- ۳- جاذب حرارتی در کلکتور PV/T دارای طرح‌های متفاوتی است اما برای سیال آب، به دلیل مشکل آب‌بندی و آسیب مدول PV (همچون زنگ زدگی، خوردگی رسوب‌گذاری و...) در طول زمان از طرح ورق و لوله استفاده می‌شود.
- ۴- استفاده از جاذب‌های توسعه داده شده همچون جاذب‌های دوکاناله، TMS، دارای پره و یا CPC با پره و... سبب خنک‌سازی بهتر و افزایش راندمان خروجی کلکتور PV/T می‌شود.
- ۵- با افزایش دمای آب ورودی بازده حرارتی و الکتریکی PV/T کاهش می‌یابد. بنابراین برای حداکثرسازی راندمان خروجی PV/T حدامقدور می‌بایست که دمای آب ورودی به دمای هوای محیط نزدیک باشد.
- با توجه به مزایای فوق، افزایش هزینه‌های مربوط به سوخت‌های فسیلی، مشکلات محیط زیستی و ... بهره‌گیری از کلکتور خورشیدی ترکیبی فتوولتائیک - حرارتی به منظور تامین انرژی گرمایی و تولید برق منازل و مجتمع‌های مسکونی و تجاری می‌تواند مفید واقع شود. همچنین ایده PV/T همچنان در حال توسعه بوده و با بهینه‌تر شدن آن در آینده، می‌تواند کاربردهای وسیعی در بخش‌های مختلف داشته.

#### ۸- مراجع

- [1] S.A. Kalogirou, Solar energy engineering: processes and systems, Academic Press, 2013.
- [2] 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.
- [3] H. Hottel, A. Whillier, Evaluation of flat-plate solar collector performance, in: Trans. Conf. Use of Solar Energy;(), 1955.
- [4] J. Prakash, Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water, Energy Conversion and Management, 35(11) (1994) 967-972.
- [5] C. Cox Iii, P. Raghuraman, Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors, Solar energy, 35(3) (1985) 227-241.
- [6] K. Sopian, K. Yigit, H. Liu, S. Kakac, T. Veziroglu, Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters, Energy Conversion and management, 37(11) (1996) 1657-1670.
- [7] H.A. Zondag, D. Vries, A.A. Van Steenhoven, W.G. van Helden, R.J. van Zolingen, Thermal and electrical yield of a combi-panel, in: Proceedings of ISES Bi-annual Conference on CD-ROM, 1999.
- [8] A.A. Hegazy, Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, Energy Conversion and management, 41(8) (2000) 861-881.
- [9] K. Sopian, H. Liu, S. Kakac, T. Veziroglu, Performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector suitable for solar drying systems, Energy Conversion and Management, 41(4) (2000) 353-365.
- [10] Y. Tripanagnostopoulos, T. Nousia, M. Souliotis, P. Yianoulis, Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, Solar energy, 72(3) (2002) 217-234.
- [11] B. Sandnes, J. Rekstad, A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model, Solar Energy, 72(1) (2002) 63-73.
- [12] 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.

- [13] M.D. Bazilian, D. Prasad, Modelling of a photovoltaic heat recovery system and its role in a design decision support tool for building professionals, *Renewable energy*, 27(1) (2002) 57-68.
- [14] B. Huang, T. Lin, W. Hung, F. Sun, Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems, *Solar energy*, 70(5) (2001) 443-448.
- [15] A. Tiwari, M. Sodha, Performance evaluation of solar PV/T system: an experimental validation, *Solar energy*, 80(7) (2006) 751-759.
- [16] T. Chow, W. He, J. Ji, Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application, *Solar energy*, 80(3) (2006) 298-306.
- [17] J. Ji, J.-P. Lu, T.-T. Chow, W. He, G. Pei, A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation, *Applied Energy*, 84(2) (2007) 222-237.
- [18] J. Ji, J. Han, T. Chow, C. Han, J. Lu, W. He, Effect of flow channel dimensions on the performance of a box-frame photovoltaic/thermal collector, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 220(7) (2006) 681-688.
- [19] S.A. Kalogirou, Y. Tripanagnostopoulos, Industrial application of PV/T solar energy systems, *Applied Thermal Engineering*, 27(8-9) (2007) 1259-1270.
- [20] J. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos, Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation, *Renewable energy*, 32(4) (2007) 623-637.
- [21] A.S. Joshi, A. Tiwari, Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) air collector, *Renewable Energy*, 32(13) (2007) 2223-2241.
- [22] A. Tiwari, S. Dubey, G. Sandhu, M. Sodha, S. Anwar, Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes, *Applied Energy*, 86(12) (2009) 2592-2597.
- [23] E. Wilson, Theoretical and operational thermal performance of a 'wet' crystalline silicon PV module under Jamaican conditions, *Renewable Energy*, 34(6) (2009) 1655-1660.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] T.T. Chow, G. Pei, K. Fong, Z. Lin, A. Chan, J. Ji, Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover, *Applied Energy*, 86(3) (2009) 310-316.
- [27] 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.
- [28] S.A. Hamid, M.Y. Othman, K. Sopian, S.H. Zaidi, An overview of photovoltaic thermal combination (PV/T combi) technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38 (2014) 212-222.



- [29] F. Jafarkazemi, S.A. Behmounesi, Theoretical Comparison of Thermal and Electrical Performance 8 Models of Sheet and Tube Type Solar PV/T Water Collector, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, (2020) -.
- [30] S.A. Behmounesi, 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.
- [31] A. Tiwari, M. Sodha, Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: a parametric study, *Renewable energy*, 31(15) (2006) 2460-2474.
- [32] G.N. Tiwari, S. Dubey, Fundamentals of photovoltaic modules and their applications, Royal Society of Chemistry, 2009.
- [33] O. Rejeb, H. Dhaou, A. Jemni, A numerical investigation of a photovoltaic thermal (PV/T) collector, *Renewable Energy*, 77 (2015) 43-50.
- [34] 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.
- [35] R. Santbergen, C. Rindt, H. Zondag, R.C. Van Zolingen, Detailed analysis of the energy yield of systems with covered sheet-and-tube PVT collectors, *Solar Energy*, 84(5) (2010) 867-878.
- [36] A. Ibrahim, M.Y. Othman, M.H. Ruslan, S. Mat, K. Sopian, Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors, *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(1) (2011) 352-365.
- [37] P. Charalambous, G.G. Maidment, S.A. Kalogirou, K. Yiakoumetti, Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: A review, *Applied thermal engineering*, 27(2-3) (2007) 275-286.
- [38] 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).
- [39] A. Ibrahim, M.Y. Othman, M.H. Ruslan, M. Alghoul, M. Yahya, A. Zaharim, K. Sopian, Performance of photovoltaic thermal collector (PVT) with different absorbers design, *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(3) (2009) 321-330.
- [40] A.K. Bhargava, H. Garg, R.K. Agarwal, Study of a hybrid solar system—solar air heater combined with solar cells, *Energy conversion and Management*, 31(5) (1991) 471-479.
- [41] R. Zakharchenko, L. Ilica-Jimenez, SA Perez-Garcia, P. Vorobiev, U. Dehesa-Carrasco, JF Perez-Robles, J. Gonzalez-Hernandez, Yu. Vorobiev, "Photovoltaic solar panel for a hybrid PV/thermal system," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82 (2004) 253-261.
- [42] J.S. Coventry, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, *Solar energy*, 78(2) (2005) 211-222.
- [43] J. Tonui, Y. Tripanagnostopoulos, Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements, *Solar energy*, 81(4) (2007) 498-511.

- [44] M.Y.H. Othman, B. Yatim, K. Sopian, M.N.A. Bakar, Performance analysis of a double-pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins, *Renewable energy*, 30(13) (2005).
- [45] M.Y. Othman, B. Yatim, K. Sopian, M.N.A. Bakar, Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector, *Desalination*, 209(1-3) (2007) 43-49.
- [46] 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.
- [47] K. Moradi, M.A. Ebadian, C.-X. Lin, A review of PV/T technologies: Effects of control parameters, *International journal of heat and mass transfer*, 64 (2013) 483-500.