مقاله

مروری بر کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی

محسن نصیرزاده
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
mohsen.nasirzadeh@yahoo.com

فرزاد جعفرکاظمی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب
fj_kazemi@azad.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۳/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۳۰

چکیده

کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی[1]، دستگاه‌هایی هستند که انرژی خورشیدی را به‌طور همزمان به جریان الکتریسیته و گرما تبدیل می‌کنند. مشکل عمدهٔ پنل‌های فتوولتائیک آن است که با افزایش دمای سطح سلول‌های فتوولتائیک، توان الکتریکی مفید خروجی آنها کاهش محسوسی پیدا می‌کند. با دفع حرارت از پنل‌ها، می‌توان از این اثر نامطلوب جلوگیری کرد. برای این منظور می‌توان با حرکت‌دادن یک سیال بر روی سطح پشتی پنل‌های فتوولتائیک، توسط انتقال حرارت جا به‌جایی، بخشی از این حرارت را از پنل جذب نمود و باعث کاهش دمای سطح پنل فتوولتائیک و افزایش راندمان الکتریکی آن شد. همچنین می‌توان از سیالی که با جذب حرارت، دمای آن افزایش یافته جهت مصارف گوناگون از جمله گرمایش آب مصرفی، خشک‌کن خورشیدی و جز این‌ها استفاده کرد. در این مقاله ابتدا عملکرد یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی بررسی می‌شود، سپس طرح‌های متنوع کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و در پایان فعالیت‌های انجام‌شده در زمینهٔ بهینه‌سازی کلکتور فتوولتائیک - حرارتی بیان می‌شود.

واژگان کلیدی: کلکتور، فتوولتائیک، حرارتی، انرژی خورشیدی

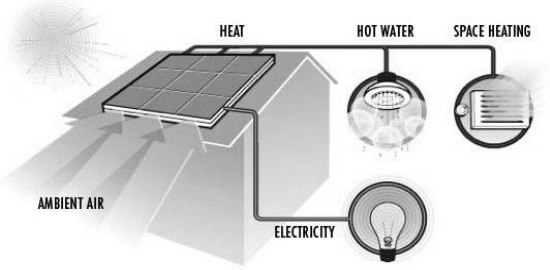
مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به لحاظ کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و آثار مخرب استفاده از این سوخت‌ها بر محیط زیست، طی چند دههٔ اخیر مورد توجه بسیار قرار گرفته است. انرژی خورشیدی یک انرژی پاک است و می‌تواند که بخش قابل توجهی از نیاز جهان به انرژی را تأمین کند. عمدتاً انرژی خورشیدی در دو نوع سیستم استفاده می‌شود: سیستم‌های حرارتی و سیستم‌های فتوولتائیک. در سیستم‌های حرارتی انرژی خورشیدی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. اما در سیستم‌های فتوولتائیک انرژی خورشیدی به جریان الکتریسیته تبدیل

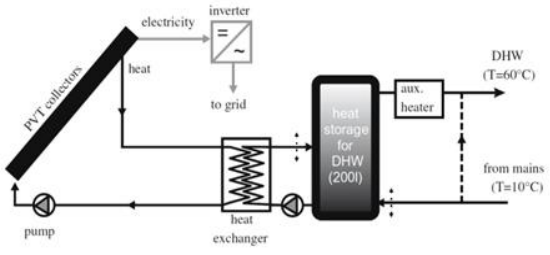
می‌شود. معمولاً این دو نوع سیستم به‌طور جداگانه استفاده می‌شوند. اما در بخش‌های بعد خواهیم دید که می‌توانند با هم نیز ترکیب شوند و یک سیستم فتوولتائیک - حرارتی را تشکیل دهند (شکل ۱).

یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی شامل یک ماژول فتوولتائیک است که یک صفحهٔ جاذب به پشت آن متصل شده است. چون با افزایش دما در ماژول‌های فتوولتائیک بازده الکتریکی کاهش می‌یابد، بنابراین صفحات جاذب در کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی دو کاربرد اصلی دارند: اول سردکردن ماژول‌های فتوولتائیک و در نتیجه بهبود عملکرد الکتریکی، و دوم جمع‌آوری انرژی حرارتی و جلوگیری از هدررفت آن به‌صورت گرما به محیط. این گرمای جمع‌آوری شده در جاهایی که به دمای خیلی زیاد نیازی نیست می‌تواند کاربرد داشته باشد؛ از جمله آب گرم خانگی مورد استفاده در شستشو و استحمام.

امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینهٔ کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی انجام شده است. مشکلاتی از قبیل بازده پایین این سلول‌ها در کنار هزینهٔ بالای آنها و فضای محدود برای نصب سیستم‌های حرارتی و الکتریکی، به‌طور جداگانه از عوامل پیشرفت این دسته از سیستم‌ها ذکر شده است. در شکل ۲ اجزای گوناگون یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی نمایش داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، جریان سیال سرد توسط پمپ به کلکتور واحد فتوولتائیک - حرارتی هدایت می‌شود و با تبادل حرارتی، ماژول های فتوولتائیک را خنک می‌کند و سبب بهبود عملکرد الکتریکی آنها می‌شود. سپس جریان سیال گرم وارد مبدل حرارتی بسته می‌شود و با تبادل حرارتی سیال مصرفی مورد نیاز را گرم می‌کند. این سیکل مجدد تکرار خواهد شد. نتیجهٔ استفادهٔ همزمان واحد حرارتی با واحد الکتریکی، بازدهی بیشتر الکتریکی، افزایش بازده کلی دستگاه، افزایش طول عمر سیستم و دوام بیشتر سلول‌ها به‌واسطهٔ کاهش دما می‌باشد و از لحاظ اقتصادی نیز به‌صرفه‌تر است و سرمایه در مدت زمان کوتاه‌تری بازمی‌گردد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از یک سیستم فتوولتائیک ـ حرارتی



شکل ۲. اجزای یک سیستم فتوولتائیک ـ حرارتی [۱]

در سال ۱۹۷۸ م، راسل و کرن نخستین کسانی بودند که مفهوم اصلی جمع‌کننده‌های فتوولتائیک - حرارتی، که توسط دو سیال عامل آب و هوا عمل می‌کردند، را با نتایج آزمایشگاهی ارائه نمودند [۲]. یک سال بعد، فلورشیتز مدل تحلیلی هاتل – ویلیر را، که برای کلکتورهای صفحه تخت ارائه شده بود، بهبود بخشید و در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که برای مقاصد عملی، مقادیر به‌کار رفته در کلکتور فتوولتائیک - حرارتی می‌توانند مشابه همان مقادیر در کلکتورهای حرارتی در نظر گرفته شوند. این بدان معناست که مقادیری که برای کمیت‌ها در کلکتورهای حرارتی ارائه شده‌اند، می‌توانند بر کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی نیز اعمال شوند [۳]. در سال ۱۹۹۱، بارگوا نتایجی براساس تأثیرات نرخ دبی جرمی هوا ، عمق کانال هوا، طول و کسری از صفحهٔ جمع‌کننده که توسط پنل فتوولتائیک پوشیده می‌شود، ارائه نمود [۴]. پارکاش در سال ۱۹۹۴ با تحقیق روی گردآورنده‌های فتوولتائیک - حرارتی

با سیال عامل هوا و آب بدین نتیجه رسید که راندمان این سیستم‌ها با سیال عامل آب بالاتر از سیال عامل هواست؛ زیرا خواص حرارتی و فیزیکی آب از هوا بالاتر است [۵]. فوجیساوا و تانی یک مدل گردآورندهٔ فتوولتائیک - حرارتی را در سال ۱۹۹۷ طراحی کردند و ساختند و توسط آنالیز اکسرژی میزان انرژی الکتریکی و حرارتی تولیدی را با یک سری استانداردها مطابقت دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که گردآورندهٔ فتوولتائیک - حرارتی بدون سرپوش شیشه‌ای انرژی الکتریکی بیشتری نسبت به نوع دارای سرپوش شیشه‌ای تولید می‌کند [۶]. کروتر و همکاران تحقیقاتی را در سال ۱۹۹۹ روی ترکیب پنل فتوولتائیک و گردآورنده‌های حرارتی روی نما و عایق‌های ساختمان انجام دادند [۷]. دوبی و تیواری در سال ۲۰۰۸، یک گردآورندهٔ فتوولتائیک – حرارتی با سیال آب را برای آب و هوای شهر دهلی نو آزمایش و نتایج مفیدی ارائه کردند [۸].

در این مقاله ابتدا عملکرد یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی بررسی می‌شود، سپس طرح‌های متنوع کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی مورد بررسی قرار گرفته و در پایان فعالیت‌های انجام‌شده در زمینهٔ بهینه‌سازی کلکتور فتوولتائیک - حرارتی بیان می‌شود.

گردآورندهٔ فتوولتائیک - حرارتی

پنل فتوولتائیک بخش کمی از تابش جذب‌شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و مابقی آن به‌صورت انرژی حرارتی، که باعث بالارفتن دمای پنل فتوولتائیک و کاهش بازده آن می‌شود، تلف می‌شود. فناوری گردآورندهٔ فتوولتائیک - حرارتی، این انرژی حرارتی اتلافی را احیا می‌کند و مورد استفاده قرار می‌دهد. در این فناوری، خنک‌کاری پنل فتوولتائیک و افزایش بازده آن با یکدیگر مقارن شده است. بنابراین گردآورنده‌های همزمان الکتریکی و حرارتی انرژی خورشیدی یکی از بهترین پیشنهادها جهت افزایش بازده کلی (بازده الکتریکی و بازده حرارتی) می‌باشند. در این فناوری می‌توان از هوا یا آب به‌عنوان سیال عامل جهت انتقال حرارت استفاده نمود که به‌ترتیب گردآورنده‌های فتوولتائیک - حرارتی هوایی و گردآورنده‌های فتوولتائیک - حرارتی آبی نامیده می‌شوند. گردآورنده‌های فتوولتائیک - حرارتی آبی بازده بالاتری نسبت به انواع هوایی دارند؛ زیرا ویژگی‌های ترموفیزیکی آب نسبت به هوا بالاتر است. با این‌حال در بیشتر تحقیقات از سیال عامل هوا استفاده می‌شود که دلیل آن پایین‌تر بودن هزینه‌های ساختاری و نگه‌داری گردآورنده است. گردآورنده‌های فتوولتائیک - حرارتی نسبت به نوع حرارتی خورشیدی معمولی دارای مزایایی بدین شرح می‌باشند:

۱. استفاده از فضای بهینهٔ نصب به‌دلیل ترکیب گردآورندهٔ خورشیدی و پنل فتوولتائیک در یک سیستم واحد
۲. افزایش بازده پنل فتوولتائیک به‌دلیل جذب حرارت از سطح آن توسط سیال عامل جاری در گردآورندهٔ خورشیدی
۳. عدم نیاز به منبع الکتریکی خارجی برای به چرخش درآوردن سیال عامل در گردآورندهٔ خورشیدی
۴. بازده انرژی بیشتر نسبت به سیستم‌های متداول

بازده الکتریکی ماژول‌های فتوولتائیک

بازده الکتریکی یک پنل فتوولتائیک عبارت است از نسبت توان خروجی اندازه‌گیری‌شده به کل تابش خورشیدی برخوردی به سطح و برابر است با:

$$\eta_e = \frac{p_o}{IA_c} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه I شدت تابش خورشیدی و A_c مساحت سطح پنل است. با تغییرات دمای پنل توان خروجی پنل تغییر می‌کند و با افزایش دمای پنل خورشیدی بازده الکتریکی آن کاهش می‌یابد. این وابستگی بازده الکتریکی به دمای پنل توسط رابطهٔ ۲ بیان می‌شود [۹]:

$$\eta_e = \eta_{rc}\left[1-\beta_{pv}\left(t_{pv}-t_{rc}\right)\right] \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که در این رابطه η_{rc} بازده الکتریکی اولیه در شرایط استاندار[۲] است. همچنین β_{pv} ضریب دمایی بازده سلول است که معمولاً از طرف کارخانهٔ سازنده اعلام می‌شود و از رابطهٔ ۳ به‌دست می‌آید:

$$\beta_{pv} = \frac{1}{T_o - T_{rc}} \qquad (۳)$$

به‌طوری‌که در این رابطه T_0 ماکزیمم دمایی است که در آن دما بازده الکتریکی سلول به صفر می‌رسد. هوچنین t_{pv} و t_{rc} نیز به‌ترتیب دمای سلول و دمای مرجع (۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد) می‌باشند. دمای سلول‌های خورشیدی تابعی از دمای محیط و شدت تابش خورشید است. با افزایش دمای محیط دمای سلول نیز بیشتر می‌شود. از طرفی با افزایش شدت تابش خورشید نیز سلول گرم شده، دمای آن بیشتر می‌شود. دمای سلول‌های خورشیدی در شرایط محیطی گوناگون با دمای محیط T_{amb} و شدت تابش R از رابطهٔ تقریبی ۴ به‌دست می‌آید [۹]:

$$t_{PV} = T_{amb} + [(NOCT - 20)/800] \times R \qquad (۴)$$

دمای سلول وقتی دمای محیط ۲۰ درجهٔ سانتی‌گراد، شدت تابش برابر با ۸۰۰ وات بر متر مربع و سرعت وزش باد ۱ متر بر ثانیه است، به دمای کاری نامی سلول[۳] موسوم است. این کمیت به‌عنوان پارامترهای پنل در برگهٔ اطلاعات آن ذکر می‌شود. با توجه به رابطهٔ ۴ و افزایش دمای محیط، دمای سلول بیشتر می‌شود. بنابراین دمای سلول به‌صورت مستقیم با دمای محیط و شدت تابش خورشید در ارتباط است. همچنین برای β_{pv} مقادیر متنوعی ذکر شده است (جدول ۱).

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، یک پارامتر مهم در رابطه با کاهش بازده الکتریکی در اثر افزایش دما، جنس سلول است. برحسب نوع کریستال استفاده‌شده در سلول‌های خورشیدی، می‌توان سلول‌های خورشیدی را به سه دستهٔ عمده تقسیم کرد:

۱. سلول‌های خورشیدی تک‌کریستالی

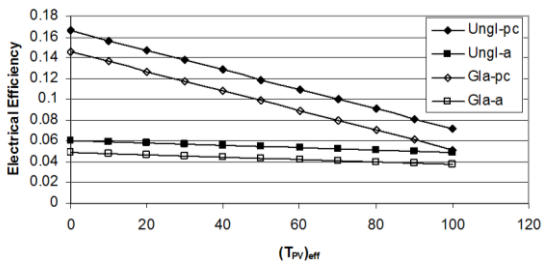
۲. سلول‌های خورشیدی چندکریستالی

۳. سلول‌های خورشیدی آمورف (بی‌شکل)

سلول‌های آمورف اگرچه بازده کمتری نسبت به سلول‌های چندکریستالی سیلیکون دارند، اما کمتر تحت تأثیر دما قرار می‌گیرند. این موضوع در شکل ۳ برای دو کلکتور فتوولتائیک - حرارتی با پوشش شیشه‌ای[۴] و بدون پوشش شیشه‌ای[۵] به‌طور واضح نشان داده شده است. در این شکل سلول‌های آمورف با حرف a و سلول‌های چندکریستالی با pc نمایش داده شده‌اند.

جدول ۱. مقادیر متنوع β_{pv} برای محاسبهٔ بازده الکتریکی [۹]

$T_{ref}\,(^0C)$	η_{Tref}	β_{ref}	Comments	References
25	0.15	0.0041	Mono-si	Evans and Florschuetz
25	0.11	0.003	Mono-si	Truncellito and Sattolo
25	0.13	0.0041	PV/T system	Mertens
25	0.12	0.0045	PV/T system	Tiwari and Sodha
25	0.097	0.0045	PV/T system	Zondag et al
25	0.12	0.0045	Mono-si	Chow
25	0.13	0.004	Mono-si	RETScreen
25	0.11	0.004	poly-si	RETScreen
25	0.05	0.0011	a-si	RETScreen



شکل ۳. تأثیر دما بر بازدهی الکتریکی
برای سلول های با جنس‌های گوناگون [۹]

بازده حرارتی

بازده حرارتی یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی صفحه تخت عبارت است از نسبت انرژی حرارتی مفید (Q_u) به

کل تابش برخوردی بر کلکتور و به‌صورت رابطهٔ ۵ تعریف می‌شود:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{I} \qquad (۵)$$

گرمای جمع‌آوری شده توسط کلکتور می‌تواند توسط یکی از دو رابطهٔ ۶ یا ۷ به‌دست آید. در رابطهٔ ۶ با استفاده از دماهای سیال ورودی و خروجی می‌توان گرمای مفید را محاسبه کرد.

$$Q_u = \dot{m} c_p \left(t_{out} - t_i\right) \qquad (۶)$$

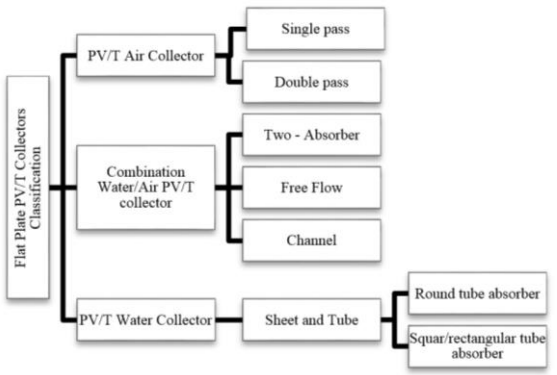
$$Q_u = A_c \left[I(\tau\alpha) - U_L \left(t_{p,m} - t_a\right) - Q_e \right] \qquad (۷)$$

به‌طوری‌که در رابطهٔ ۷، $\tau\alpha$ ضریب جذب - انتقال شیشه، $t_{p,m}$ دمای میانگین صفحهٔ جاذب، t_a دمای میانگین هوای روی صفحه جاذب و نهایتاً Q_e انرژی الکتریکی تولیدشده می‌باشد.

دسته‌بندی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی صفحه‌تخت

کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی، با توجه به سیال عاملی که در آنها استفاده می‌شود، به انواع گوناگونی دسته‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی در شکل ۴ نشان داده شده است. سیال مورد استفاده در فرایند خنک‌کاری با توجه به موقعیت، امکانات و نیاز مصرف‌کننده تعیین می‌گردد که می‌تواند آب یا هوا باشد (معمولاً سیالات دیگر از قبیل روغن‌ها و سیالات مورد استفاده در سیستم‌های تبرید به‌دلیل هزینه‌های بالا و عدم بهره‌وری اقتصادی استفاده نمی‌شوند).

استفاده از هر کدام از این سیال‌ها (آب یا هوا) در کلکتور مزایا و معایبی دارد. کلکتورهای فتوولتائیک – حرارتی با سیال کاری آب ظرفیت گرمایی و هدایت حرارتی بالایی دارند در نتیجه نرخ انتقال حرارت در واحد سطح در این نوع کلکتورها بالاست و به‌دنبال آن بازده کلی بالایی دارند. مایع چگالی بیشتری نسبت به هوا دارد، بنابراین دبی کمتری از سیال برای استحصال میزان یکسان حرارت از سلول‌ها نیاز است. در این کلکتورها برای گردش سیال خنک کننده در کلکتور می توان از سیستم ثقلی کمک گرفت که سبب کاهش هزینه‌ها می‌شود. در مقابل، در کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی با سیال هوا امکان یخزدگی و جوشش سیال، که سبب توقف کارکرد می‌شود، وجود ندارد. همچنین در صورت بروز نشتی، آسیبی به سیستم وارد نمی‌شود و در استفاده طولانی‌مدت استهلاک سیستم کمتر و هزینه‌های اولیه نسبت به کلکتورهایی با سیال کاری مایع کمتر است.



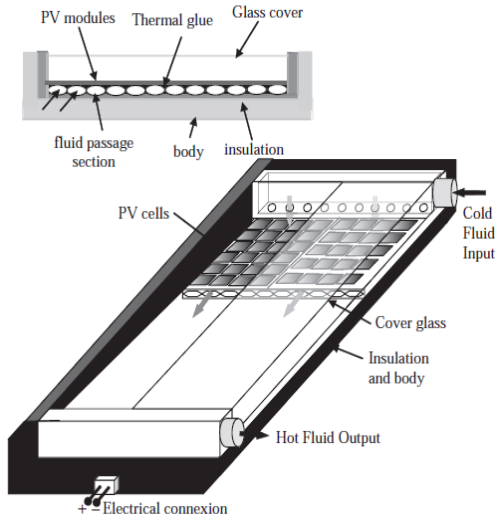
شکل ٤. دسته‌بندی کلکتورهای فتوولتائیک ـ حرارتی صفحه‌تخت [۱۰]

کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی از نوع لوله و صفحه[۶]

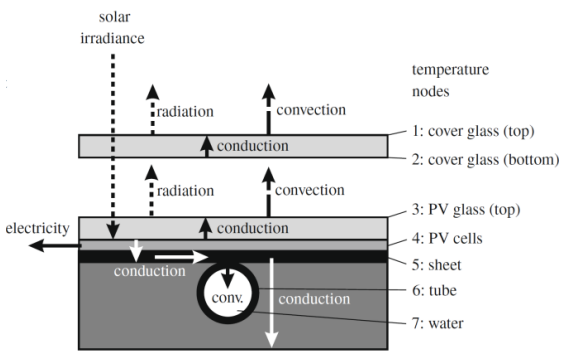
همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، یک کلکتور لوله و صفحه از یک جعبهٔ تخت با یک پوشش شیشه‌ای در بالا، یک صفحهٔ جاذب آلومینیومی، سلول‌های خورشیدی که روی صفحهٔ جاذب قرار گرفته‌اند، لوله‌های سیال و پشم شیشه، که به‌عنوان عایق استفاده شده، تشکیل شده است. این طرح یکی از ساده‌ترین و آسان‌ترین طرح‌ها برای ساخت است.

در این کلکتورها معمولاً سیال عامل مورد استفاده آب است که توسط لوله‌هایی، که به صفحهٔ جاذب حرارتی متصل‌اند، از طریق انتقال حرارت هدایت و جابه‌جایی گرم می‌شود و موجب خنک‌شدن سلول‌ها می‌شود. در شکل ۶ سازوکار

انتقال حرارت یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی نمایش داده شده است.

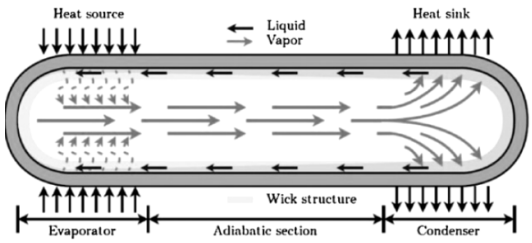


شکل ۵. نمایی شماتیک از یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی [۹]

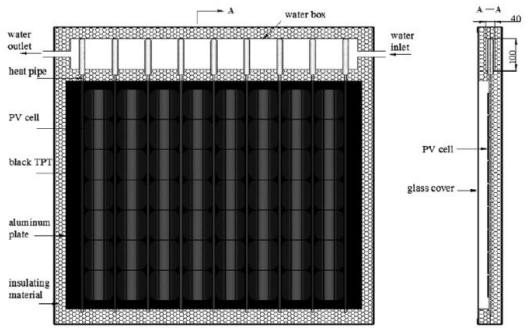


شکل ۶. سازوکار انتقال حرارت کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع لوله و صفحه [۱]

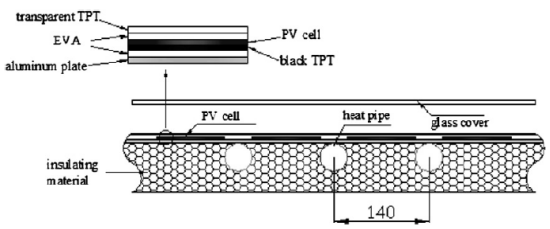
نوع دیگری از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی صفحه‌تخت، که می‌توان آن را در دستهٔ کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی از نوع لوله و صفحه قرار داد، کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع لولهٔ حرارتی می‌باشد. در شکل ۷ نحوهٔ عملکرد یک لولهٔ حرارتی نمایش داده شده است. در سال ۲۰۱۲، زائو و همکاران از این فناوری استفاده کردند و کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع لوله حرارتی را ساختند (شکل ۸) و مورد آزمایش قرار دادند [۱۱]. در این نوع هنگامی که اشعهٔ خورشید از پوشش شیشه‌ای عبور و به‌داخل سلول فتوولتائیک نفوذ می‌کند، بیشتر آن جذب سلول می‌شود. قسمتی از آن به انرژی الکتریکی تبدیل و باقی‌ماندهٔ آن سرانجام به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود. این انرژی گرمایی با استفاده از صفحهٔ آلومینیومی به قسمت تبخیرکنندهٔ لولهٔ حرارتی منتقل می‌شود، سپس لولهٔ حرارتی این انرژی حرارتی را به جریان آب، که در داخل جعبهٔ آب از روی لوله حرارتی عبور می‌کند، منتقل می‌کند.



شکل ۷. نحوهٔ عملکرد یک لوله حرارتی [۱۱]



شکل ۸ کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع لوله حرارتی [۱۲]

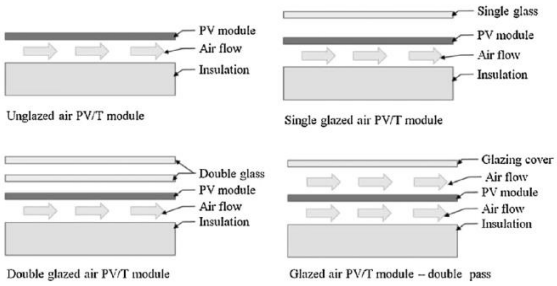


شکل ۹. مقطع عرضی یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع لولهٔ حرارتی [۱۲]

کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی[۷]

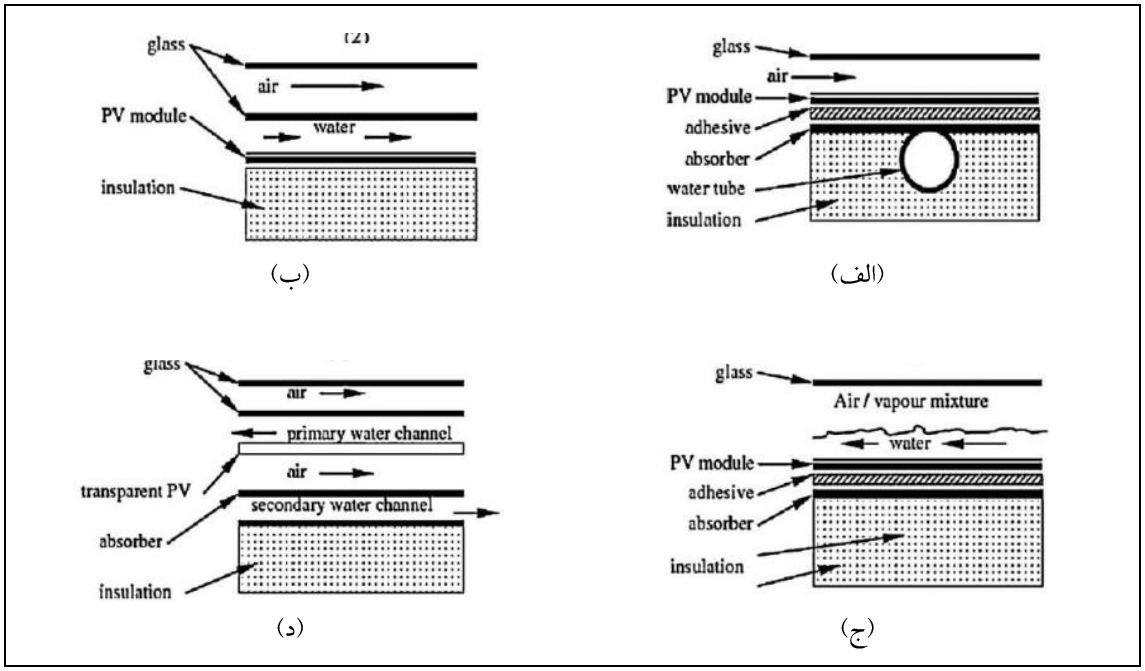
این نوع از کلکتورها از هوا به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند. در شکل ۱۰ نمونه‌ای از ساده‌ترین حالت‌های این کلکتورها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ سیال

عامل (هوا) با عبور از محل‌های مشخص‌شده در طول کانال، به‌دلیل اختلاف دمایی که با سطح پنل فتوولتائیک دارد، حرارت آن را جذب می‌کند و سبب خنک‌سازی سطح پنل و افزایش بازده الکتریکی آن می‌شود. در عین‌حال افزایش دمای سیال به افزایش بازده حرارتی نیز منجر می‌گردد. بنابراین با این نحوهٔ طراحی، پنل فتوولتائیک و گردآورندهٔ حرارتی در یک دستگاه جا داده شده، می‌توان با رفع کاهش بازده پنل‌های فتوولتائیک، انرژی بر واحد سطح بیشتری تولید کرد.

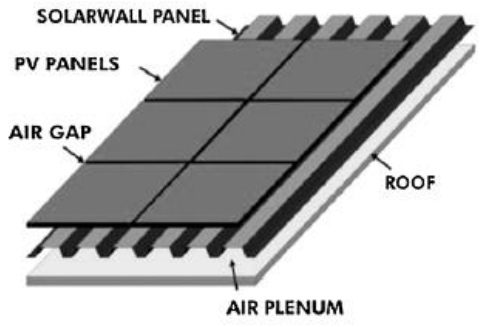


شکل ۱۰. انواع کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی [۱۱]

در سال ۲۰۰۳، زونداگ و همکارانش دسته‌بندی دیگری از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی ارائه دادند که در آنها علاوه بر هوا از سیال عامل آب نیز استفاده شد [۱۳ و ۱۴]. در شکل ۱۱ نمایی شماتیک از مدل‌های مختلف گردآورندهٔ فتوولتائیک - حرارتی زونداگ و همکارانش، که می‌توانند از سیال عامل آب و یا هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده استفاده کنند، نمایش داده شده است. یکی از موارد استفاده از گردآورنده‌های فتوولتائیک - حرارتی، استفاده به‌عنوان سیستم تهویه مطبوع ساختمان‌هاست که با نصب این سیستم روی سقف و نمای ساختمان‌ها می توان از آن به‌عنوان مولد انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی استفاده کرد. این سیستم‌ها همچنین با معماری ساختمان‌ها سازگاری بسیار خوبی دارند و در بسیاری از موارد می‌توانند باعث زیبایی واحدهایی که از آنها استفاده می‌کنند شوند. در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایی شماتیک از یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی ساخته‌شده در یکی از شهرهای ایتالیا نشان داده شده است.



شکل ۱۱. انواع کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی براساس دسته‌بندی زونداگ [۱۳و۱۴]؛
الف) کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع لوله و صفحه، ب) کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع کانال‌دار،
ج) کلکتور فتوولتائیک - حرارتی جریان آزاد، د) کلکتور فتوولتائیک - حرارتی با دو جاذب



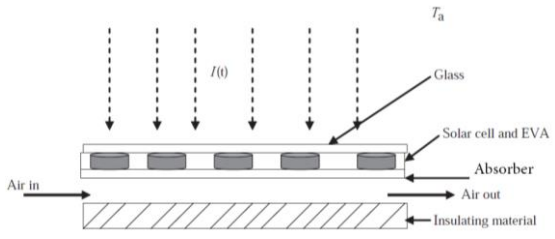
شکل ۱۲. نمایی شماتیک از یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی هوایی قابل نصب روی سقف [۹]

شکل ۱۳. کلکتور فتوولتائیک - حرارتی نصب‌شده بر نمای ساختمان [۹]

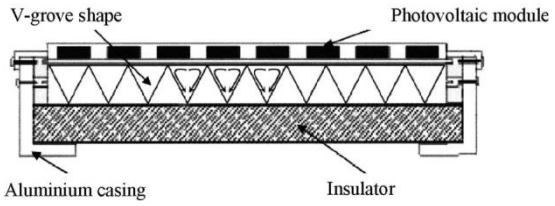
کلکتورهای هوایی فتوولتاییک - حرارتی با یک گذرگاه[۸]

همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، در این کلکتور هوا به‌عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گرفته است. سه قسمت اصلی این کلکتور عبارت‌اند از: پوشش شیشه‌ای در بالا، صفحهٔ جاذب و سلول‌های خورشیدی. همچنین در این نوع از کلکتورها از فین‌های آلومینیومی، که در پشت صفحهٔ جاذب نصب می شوند، جهت افزایش انتقال حرارت به سیال استفاده می‌شود. در این نوع کلکتور هوای سرد از یک سمت وارد و هوای گرم از سمتی دیگر خارج می‌شود.

نوع دیگری از کلکتورهای هوایی با یک گذرگاه، کلکتورهای با گذرگاه V شکل است. این شیار V شکل سبب ایجاد توربولانس می‌شود و نرخ انتقال حرارت به سیال را افزایش می‌دهد.



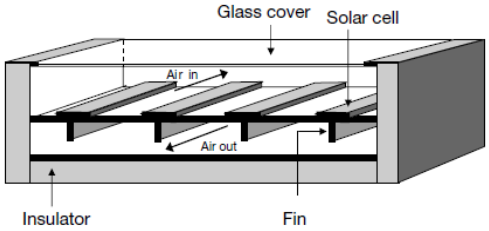
شکل ۱۴. نمایی شماتیک از یک نوع ساده از کلکتور فتوولتائیک - حرارتی هوایی با یک گذرگاه [۱۵]



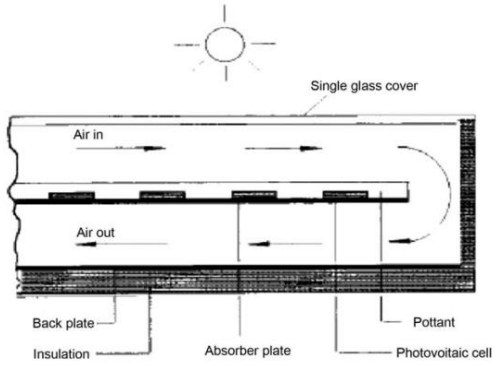
شکل ۱۵. مقطع عرضی از یک کلکتور فتوولتائیک - حرارتی هوایی با شیار V شکل [۱۶ - ۱۷]

کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی با دو گذرگاه[۹]

کلکتورهای هوایی با دو گذرگاه ساختاری مشابه با کلکتورهای هوایی با یک گذرگاه هستند، با این تفاوت که در این حالت هوای سرد از قسمت بالا به کلکتور وارد و پس از خنک‌کردن سلول‌ها و گرم‌شدن از قسمت پایین، از همان سمتی که وارد شده است، خارج می‌شود. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ این مطلب به‌وضوح نمایش داده شده است.

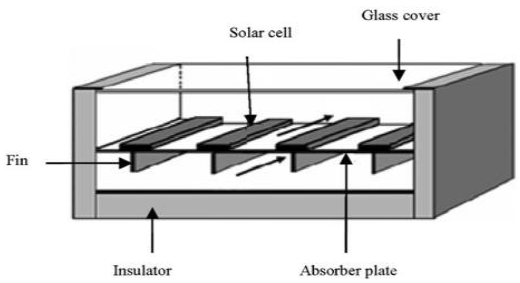


شکل ۱۶. کلکتور فتوولتائیک - حرارتی با دو گذرگاه همراه با فین [۱۸]



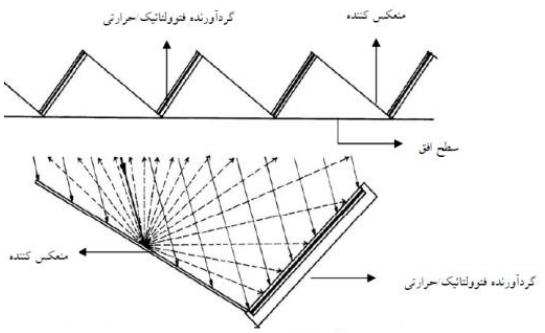
شکل ۱۷. نمایی شماتیک از یک کلکتور
فتوولتائیک -حرارتی با دو گذرگاه [۱۸]

نوع دیگری از کلکتور فتوولتائیک - حرارتی هوایی با دو گذرگاه نیز در شکل ۱۸ نشان داده شده است، با این تفاوت که در این نوع، همانند کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی با یک گذرگاه هوای سرد از یک سمت وارد و هوای گرم از سمت دیگر خارج می‌شود.

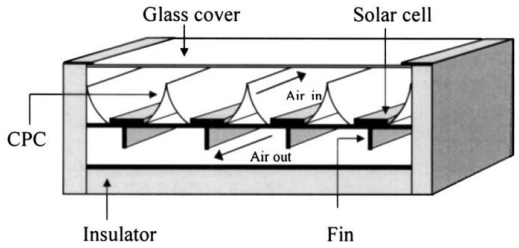


شکل ۱۸. نمایی شماتیک از کلکتور
فتوولتائیک -حرارتی هوایی با دو گذرگاه [۱۹]

برای اینکه بازده الکتریکی کلکتور فتوولتائیک - حرارتی بالاتر رود، باید مقدار تابش رسیده به سطح کلکتور افزایش یابد. تابش رسیده از خورشید به سطح کلکتور یک مقدار ثابت و مشخص است. برای افزایش تابش از یک متمرکزکننده استفاده می‌شود این متمرکزکننده تابش رسیده به سطح پنل را به‌شدت افزایش می‌دهد و باعث افزایش بازده الکتریکی کلکتور می‌شود. فناوری بالا در کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی با دو گذرگاه جهت افزایش بازدهی نیز استفاده شده است استفاده از ترکیب متمرکزکننده‌های سهموی[۱۰] در شکل ۲۰ به‌خوبی نشان داده شده است. در منحنی (I – V) شکل ۲۱ نیز اثر CPC بر بازده الکتریکی کاملاً مشخص است.



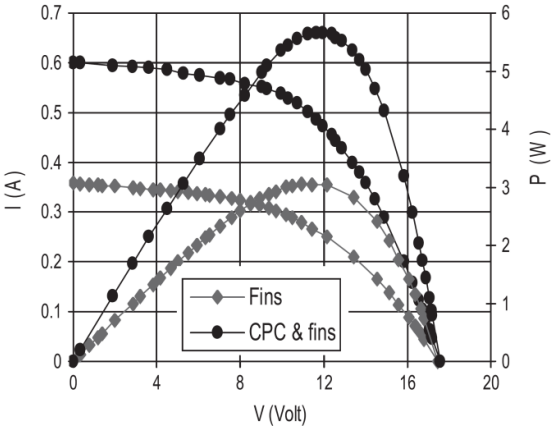
شکل ۱۹. استفاده از متمرکزکننده‌های پخشی
جهت افزایش تابش برخوردی به کلکتور [۹]



شکل ۲۰. یک کلکتور فتوولتائیک – حرارتی
هوایی با دو گذرگاه و متمرکز کننده [۲۰]

شایان ذکر است که استفاده از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی همراه با متمرکزکننده به‌علت نیاز به انجام چینش دقیق اجزای دستگاه نسبت به‌هم و ملاحضات اقتصادی توصیه نمی‌گردد. استفاده از این کلکتورها بیشتر در مقیاس‌های نیروگاهی و صنعتی اهمیت دارد. سوپیان و همکارانش [۲۱] با مدل‌های دائمی عملکرد کلکتورهای هوایی با یک گذرگاه و دو گذرگاه را تحلیل کردند. به‌طور نمونه بازده‌های حرارتی، PV و مختلط برای کلکتورهای هوایی با یک و دو گذرگاه به طول یک متر و دبی جرمی ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت و ضریب فشردگی ۰/۵، در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر بازده برای کلکتورهای هوایی با دو گذرگاه بالاترند. همچنین تأکید شده است که بهبود عملکرد کلکتور

فتوولتائیک - حرارتی با دو گذرگاه (در مقایسه با کلکتور با یک گذرگاه) با افزایش بسیار کمی در هزینه کلکتور حاصل شده است.



شکل ۲۱. آثار متمرکزکننده‌های سهموی بر توان خروجی یک پنل [۲۰]

جدول ۲. مقایسهٔ بازده کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی با یک و دو گذرگاه[۲۱]

Efficency	Single - pass	Double - pass
Thermal	24 – 28%	32 – 34%
PV	6 – 7%	8 – 9%
Combined	30 – 35%	40 – 45%

نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات انجام‌شده در مقالات و تحقیقات، دیده می‌شود که در سال‌های اخیر تمامی کشورهای صنعتی و اکثرکشورهای در حال توسعه، تحقیقات گسترده‌ای دبارهٔ انرژی‌های تجدیدپذیر، به‌خصوص انرژی خورشیدی، انجام داده‌اند و درصدد تجاری‌سازی آن می‌باشند. ایران با توجه به نقشه‌های تابش‌سنجی منتشر شده در ردهٔ کشورهای مستعد برای استفاده از این منبع انرژی می‌باشد بنابراین باید مطالعات و آزمایشات وسیعی در این زمینه انجام گیرد.

در این مقاله ابتدا به معرفی یکی از سیستم های خورشیدی تحت عنوان کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی پرداخته شد. سپس طرح‌های مختلف کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی مورد بررسی قرار گرفت و در انتها کارهای انجام‌شده در زمینهٔ بهینه‌سازی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی بیان گردید. بنابر نتایج حاصل از این مقاله:

۱. کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی به‌دلیل جذب حرارت از سطح پنل فتوولتائیک توسط سیال عامل جاری در گرد آورندهٔخورشیدی باعث افزایش بازده الکتریکی پنل‌های فتوولتائیک می‌شوند. همچنین استفاده از فضای بهینهٔ نصب به‌دلیل ترکیب گردآورندهٔ خورشیدی و پنل‌های فتوولتائیک در یک سیستم واحد از دیگر مزایای کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی نسبت به کلکتورهای حرارتی خورشیدی معمولی است. این سیستم ها همچنین با معماری ساختمان‌ها سازگاری بسیار خوبی دارند و در بسیاری از موارد می‌توانند باعث زیبایی واحدها شوند.

۲. براساس دسته‌بندی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی مشاهده شد که کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی به سه نوع کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی آبی، هوایی و ترکیبی (آبی و هوایی) دسته‌بندی می‌شوند.

۳. کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی، که از هوا به‌عنوان سیال عامل استفاده می‌کنند، یکی از رایج‌ترین انواع کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی می‌باشند که از آنها استفادهٔ زیادی در واحدهای تجاری می‌شود. کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی خود نیز به دو نوع single pass و double pass دسته‌بندی شدند. در کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی امکان یخزدگی و جوشش در سیال و یا بروز نشتی، که سبب توقف در کارکرد می‌شود، وجود ندارد. به‌طور کلی این نوع از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی به بازده الکتریکی حدود ۸ درصد و بازده حرارتی حدود ۳۹ درصد می‌رسند.

۴. کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی آبی نیز به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. یکی از معروف‌ترین آنها کلکتور فتوولتائیک - حرارتی از نوع لوله و صفحه

می‌باشند که خود نیز براساس شکل لوله می‌تواند به دو نوع square و round دسته‌بندی شود. نرخ انتقال حرارت در واحد سطح این نوع کلکتورها در مقایسه با کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی بالاتر بوده و به‌دنبال آن کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی آبی بازدهی بالاتری نسبت به کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی دارند. کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی، که از سیال عامل آب استفاده می‌کنند، می‌توانند به ماکزیمم بازده الکتریکی حدود ۹/۵ درصد و بازده حرارتی حدود ۵۰ درصد برسند. در این نوع از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی برای گردش سیال خنک‌کننده در کلکتور می‌توان از سیستم ثقلی کمک گرفت که سبب کاهش در هزینه‌ها می‌شود.

برای افزایش بازده حرارتی و الکتریکی کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی راهکارهای متنوعی ارائه شده است. برخی از آنها عبارت است از:

الف) استفاده از متمرکزکننده‌های پخشی جهت افزایش تابش برخوردی به کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی

ب) استفاده از فین جهت افزایش نرخ انتقال حرارت از صفحه جاذب به سیال عامل

ج) استفاده از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی هوایی با دو گذرگاه به‌جای استفاده از کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی با یک گذرگاه

اگرچه تاکنون توجه زیادی به کلکتورهای فتوولتائیک - حرارتی شده است، اما همچنان این شانس وجود دارد که در آینده این فناوری بیشتر توسعه پیدا کند. ساختار این کلکتورها از لحاظ هندسه و شکل بیشتر می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد، همچنین این سیستم‌ها باید بتوانند در ساختمان‌های واقعی مورد استفاده قرار گیرند تا استفاده عملی از آنها در معرض نمایش قرار گیرد. بنابراین کارهای آینده باید با هدف افزایش بازده و کاهش هزینه باشد تا قابلیت رقابت آنها بیشتر شود و استفاده از آنها به‌عنوان یک دستگاه انرژی تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست افزایش یابد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت، به‌دلیل حمایت‌های بی‌دریغشان از این تحقیق، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

مآخذ

[1] Santbergen, A., C.C.M Rindt., H.A.Zondag, R.J.Ch. van Zolingen. "Detailed analysis of the energy yield of systems with covered sheet-and-tube PVT collectors." *Solar Energy* 84 (2010):867–878.

[2] Kern Jr, EC, MC. Russell. "Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems." *Proceedings of the 13th IEEE PV specialist conference*, Washington, 5-8 June 1978. p. 1153-7.

[3] Florschuetz, L.W. "Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors." *Solar Energy* 22 (4), (1979):361-366.

[4] Bhargava AK, HP. Garg, RK. Agarwal. "Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cells." *Energy Conver Manage*; 31 (1991):471-9.

[5] Prakash J. Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water." *Energy convers. Mgmt.* 35, (1994):967-972.

[6] Fujisawa T., T. Tani, "Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 47 (1-4), (1997):135-148.

[7] Krauter, S. Arauja, R.G. Schroer, S. Hanitsh, R. Salhi, M.J. Trebel, C. Lemoine, R. "Combined photovoltaic and solar thermal systems for façade integration and building insulation." *Solar Energy* 67, (1999):239-248.

[8] Dubey S, G.N. Tiwari. "Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater." *Solar Energy* (2008):602-612.

[9] Tiwari G.N., S.Dubey. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*, Royal Society of Chemistry. New Delhi, India, 2010.

[10] Ibrahim A., 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 (2011):352-365.

[11] Zhang X., X. Zhao, S. Smith, J. Xu, X. Yu. "Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012):599-617.

[12] Gang, p., F. Huide, Z. Tao, J. Jie. "A numerical and experimental study on a heat pipe PV/T system". *Solar Energy* 85 (2011):911-921.

[13] Charalambous PG., GG. Maidment, SA. Kalogirou, K. Yiakoumetti. "Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: a review." *Applied Thermal Engineering*, (2007):275-86.

[14] Zondag, HA, de Vries DW, van Helden WGJ, van Zolingen RJC, van Steenhoven AA. "The yield of different combined PV-thermal collector designs." *Solar Energy* (2003):253-69.

[15] Tiwari, A, Sodha MS. "Performance evaluation of hybrid PV/thermal water/air heating system: a parametric study." *Renewable Energy*, (2006):2460-74.

[16] Othman, MYH, K. Sopian, B. Yatim, WRW. Daud. "Development of advanced solar assisted drying systems". *Renewable Energy*, (2006):703–9.

[17] Othman, MYH., Ruslan H, Sopian K, Jin GL. "Performance study of photovoltaicthermal (PV/T) solar collector with V-grooved absorber plate". *Sains Malaysiana* (2009):537-41.

[18] Othman M.Y., Yatim B., Sopian K., Abu Bakar M.N., "Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector". *Desalination* 209 (2007):43-49.

[19] Alfegi MEA, Sopian K, Othman MYH, Yatim BB. "Transient mathematical model of both side single pass photovoltaic thermal air collector." *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* (2007)"22-6.

[20] Othman, MY, B. Yatim, K. Sopian, MNA. Bakar. "Double-pass photovoltaic-thermal solar air collector with compound parabolic concentrator and fins." *Journal of Energy Engineering* (2006):116-20.

[21] Sopian, K.S., H.T. Yigit, H.T. Liu, S. Kakac, T.N. Veziroglu, "Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters." *Energy Conversion and Management*, (1996):1657-1670.

پی‌نوشت

1. PV/T
2. Standard test conditions
3. Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)
4 Gla
5 Ungl
6. Sheet and Tube
7. PV/T Air Collectors
8. Single Pass Photovoltaic - Thermal Air Collectors
9. Double Pass Photovoltaic - Thermal Air Collectors
10. Compound Parabolic Concentrator