

مقایسه انواع صفحه های جاذب خورشیدی فتوولتاییک/حرارتی از نظر طراحی و عملکرد

فریبرز جهانشاه^۱، سید علی هاشمی^۲، فرهاد جهانشاه^{۳*}

۱- استادیار، مکانیک و مواد(انرژی خورشیدی)، موسسه عالی علمی کاربردی صنعت آب و برق، تهران

۲- مدرس گروه مهندسی برق، دانشکده فنی شهید مهاجر، اصفهان

۳- کارشناس ارشد، مکانیک تبدیل انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی، اصفهان

* farhad.jahanshah@gmail.com ، ۸۱۶۳۶۶۸۶۷۱، اصفهان

چکیده

راندمان الکتریکی ماژول های فتوولتایی و عملکرد آنها با خارج کردن گرما از سیستم بهبود می یابد. این موضوع باعث تولید کلکتورهای ترکیبی فتوولتاییک/حرارتی شده است. در این مقاله به بررسی سیستم های مختلف خورشیدی ترکیبی پرداخته و عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه شده است. شش مدل از کلکتورهای طراحی شده با هم مقایسه و برای هر سیستم، نوع مسیرهای جریان سیال خنک کننده معرفی شده است. بررسی طرح های مختلف و تعیین مزایا و معایب آنها در این مقاله نشان می دهد که جنس پوشش جاذب، تعداد گذرها، خلاء میان صفحات جاذب و سلول های خورشیدی از عوامل موثر در بهبود راندمان سیستم های ترکیبی می باشند. روش های مختلفی برای خنک کردن کلکتورهای ترکیبی بیان شده است. مقایسه این روش ها نشان می دهد که بهترین مدل، طراحی حلزونی با راندمان حرارتی ۵۰/۱۲٪ و راندمان الکتریکی ۱۱/۹۸٪ است. استفاده از شیشه شفاف در سلول های خورشیدی ترکیبی، راندمان حرارتی بالاتری نسبت به استفاده از شیشه های مات دارد ولی راندمان الکتریکی به دلیل وجود نور زیاد کاهش می یابد، راندمان کلکتورهای ترکیبی با پوشش شفاف به میزان ۱۳/۳۶٪ و با پوشش مات، ۱۱/۹۲٪ افزایش می یابد. فاصله بین پوشش مواد و سلول فتوولتایی باید به حداقل برسد تا از خواص عایق در هوا جلوگیری کند. این فاصله باید به اندازه ۱۵ تا ۴۰ میلی متر باشد.

کلیدواژه ها: فتوولتاییک، طبقه بندی، صفحه های جاذب خورشیدی، کلکتور ترکیبی، سلول خورشیدی



Comparison of Solar PV/T Panels In Terms of Design and Performance

Fariborz Jahanshah¹, Ali Hashemi², Farhad Jahanshah^{3*}

1- Power and Energy Department, Institute Of Energy and Hydro Technology, Tehran, Iran.

2- Technical and Vocational University (TVU), Technical Faculty of Mohajer Branch, Isfahan, Iran.

3- Mechanical Department, Islamic Azad University Majlesi Branch, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 8163668671 Isfahan, Iran, farhad.jahanshah@gmail.com

Abstract:

The photovoltaic/thermal (PV/T) panels are designed in order to perform the total efficiency by recovery the heat during the electricity production. In this paper we have a review on PV/T panel designs. The six new designs are compared and for each model investigate the flow plane and cooling fluid. The study shows the efficiency are effected by some important parameters such as, collector covered, the number of passes and the gap between the absorber collector and the solar cells model. The electrical efficiency is improved by cooling the solar panels. So there are methods for cooling combinations panels. Comparison shows spiral flow design model with 50.12% heat efficiency and 11.98% electrical efficiency are good enough to use. The application of glazed glass in panels increase heat efficiency more than unglazed glass but the electrical efficiency is reversed. The total efficiency of panels with glazed and unglazed glasses is 13.36% and 11.92% respectively. The gap between solar cells and material need to minimize to prevent heat escape, so the optimum is 15mm to 40mm.

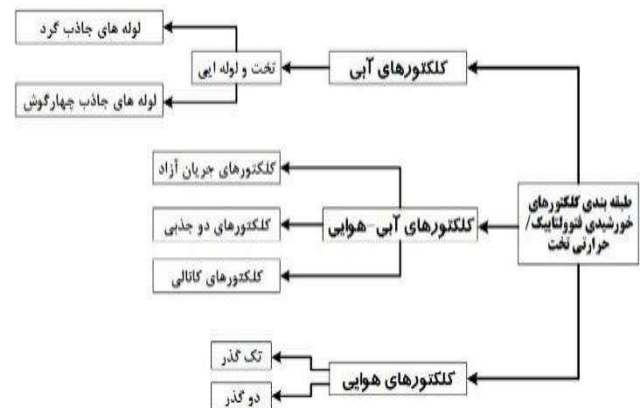
Keywords: Photovoltaic, Classify, Solar Absorber plates, Combination collector, Solar cell



فصلنامه علمی - ترویجی انرژی های تجدیدپذیر و نو- سال چهارم ، شماره دوم زمستان ۱۳۹۴

کلکتور ترکیبی اولین بار توسط ولف^۵ در سال ۱۹۷۶ با یک ترکیب پانل فتولتاییک و سیستم گرمکن آبی مطرح و معرفی شد. مفهوم اصلی کلکتورهای ترکیبی در سال ۱۹۷۸ بوسیله کرن و راسل^۶ توسعه داده شد. در سال ۱۹۷۹ توسط هندری^۷ یک مدل تحلیلی و تجربی برای ترکیب کلکتورهای ترکیبی هوایی/آبی ارائه شد. دو سال بعد راغورامان^۸ دو مدل مجزا از یکدیگر را برای تشریح حرارت و کیفیت الکتریسته به یک مدل برای کلکتورهای ترکیبی هوایی/آبی تبدیل کرد^۵. در سال ۲۰۱۲ سیدیکیو^۹ اثر تماس حرارتی را با توجه به رنج مقاومت تماس که از ۰/۰۵ درجه سانتیگراد تا ۰/۰۵ درجه سانتیگراد است مورد بررسی قرار داد و نشان داد برای آنکه تماس ایده‌آل داشته باشیم باید بیشترین تماس در محل‌های مقاوم در نظر گرفته شود که با این کار افزایش دمای سلول فتولتاییک تا حدود ۱۸ درجه سانتیگراد می‌شود. نتیجه آن پژوهش نشان داد راندمان سلول در حدود ۲٪ کاهش و ۱۹٪ از راندمان الکتریکی به علت مقاومت در محل تماس از دست می‌رود^{۱۰}.^{۱۱} در سال ۲۰۱۲ در طی آزمایشی با استفاده از کلکتور خورشیدی در سیستم فتولتاییک به این نتیجه رسید که راندمان الکتریکی پانل از ۶/۸٪ به ۱۲/۵٪ افزایش پیدا می‌کند^{۱۲}.^{۱۳} بعداً با مدل عددی توسعه یافته که توسط سیدیکیو و زوبیر^{۱۱} در سال ۲۰۱۷ برای کلکتورهای ترکیبی در شرایط آب و هوایی بدست آمد نشان داد که راندمان سیستم‌های ترکیبی هم بستگی به میزان تابش خورشید و هم بستگی به شرایط دمای محیط دارد^{۱۴}. یکی دیگر از مزیت‌های کلکتورهای ترکیبی هزینه تولید آنهاست. بررسی‌های فرانک^{۱۳} در یونان نشان داد که در سیستم‌های ترکیبی زمان بازپرداخت هزینه‌ها برای ماژول‌های C-Si برابر ۱۰ سال و برای ماژول‌های a-Si برابر ۶ سال می‌باشد^{۱۵}.^{۱۶} زونداگ^{۱۷} و همکارانش انواع صفحات جذب ترکیبی را مطابق شکل ۲ به چهار گروه تقسیم کردند: (الف) ورق و لوله، (ب) کانل، (ج) جریان آزاد، (د) کلکتورهای دو جذبی^{۱۰}. این کلکتورها را می‌توان با استفاده از الگوی جریان هوا یا آب درون آنها نیز تقسیم‌بندی کرد. در نوع کلکتور ترکیبی آبی، الگوی جریان آب و برای نوع کلکتورهای ترکیبی هوایی، الگوی حرکتی هوا در بالا، زیر و یا دو طرف کلکتور انجام می‌گیرد.

امروزه استفاده از انرژی‌های پاک گسترش چشمگیری داشته و با سرعت بالایی در حال رشد است. انرژی خورشیدی در بین انرژی‌های تجدید شونده جایگاه خاصی دارد. تبدیل انرژی خورشیدی به دو صورت تبدیل انرژی روشنایی به الکتریکی (فتولتاییک) و تبدیل آن به حرارت به صورت غیر مستقیم استفاده می‌شود. راندمان سلول‌های خورشیدی تجاری دارای محدودیت می‌باشد. این راندمان در پانل‌های خورشیدی تجاری امروزه به حدود ۱۸٪ رسیده است. این محدودیت به این معنی است که تقریباً ۸۰٪ از انرژی خورشیدی قابل تبدیل نبوده و در محیط اطراف به صورت حرارت و گرم شدن پانل اتلاف می‌گردد^۱. براساس فعالیت و طرح‌های نوین افزایش راندمان پانل‌های خورشیدی، استفاده همزمان از تبدیل نور به الکتریسته و حرارت، می‌تواند مقدار قابل توجهی به راندمان کل سیستم اضافه نماید. این سیستم‌ها تحت عنوان سیستم‌های ترکیبی فتولتاییک/حرارتی شناخته شده‌اند. براساس نظر هوفمن^۱ سیستم‌های ترکیبی فتولتاییک/حرارتی از این جهت جزء رده سیستم‌های انرژی خورشیدی فتولتاییک قرار می‌گیرد که هر دو سیستم خورشیدی حرارتی و خورشیدی برقی را با یکدیگر ترکیب می‌کند، به همین دلیل به آن سیستم ترکیبی خورشیدی فتولتاییک/حرارتی می‌گویند^۲. براساس کارهای زونداگ^۳ و پراکاش^۴ سیستم خورشیدی فتولتاییک/حرارتی را می‌توان به دو بخش جداگانه تقسیم کرد: تکنولوژی فتولتاییک که از تکنولوژی سلول‌های خورشیدی گرفته شده و نور را به الکتریسته تبدیل می‌کند و تکنولوژی حرارتی خورشیدی که از کلکتورهای حرارتی به دست می‌آید و انرژی خورشیدی را به گرما تبدیل می‌کند^{۳،۴}. در این راستا الگوهای متفاوتی برای افزایش راندمان این سیستم‌ها پیشنهاد گردیده است. در مطالعه این سیستم‌ها جهت تسلط بر موضوع و نظم در تحقیق لازم است که مجموعه فعالیت‌های انجام گرفته در طرح‌های مختلف طبقه بندی گردند. هدف این مقاله، مقایسه عملکرد طرح‌های متفاوت سیستم‌های خورشیدی ترکیبی و بررسی ساز و کار آنها می‌باشد. در شکل ۱ طبقه بندی انجام گرفته روی این سیستم‌ها نشان داده شده است.



1. Photovoltaic/thermal
2. Hoffmann
3. Zondag
4. Prakash

5. Wolf
6. Kern & Russell
7. Hendrie
8. Raghuraman
9. Siddiqui
10. Teo
11. Siddiqui & Zubair
12. Frank
13. Zondag



عکس کردن ولتاژ، جریان از طریق مواد تائیری بر روی پمپ حرارتی می‌گذارد، به طوری که یک سمت را خنک و سمت دیگر را گرم می‌کند [۱۴].

۳-۱-۲- لوله‌های حرارتی

لوله‌های حرارتی به‌گونه‌ای است که انتقال گرما از یک منبع به روش تبخیر و تراکم مایع صورت می‌گیرد. لوله‌های حرارتی، مکانیزمی برای انتقال حرارت می‌باشد که می‌تواند گرما را از فاصله‌های طولانی منتقل کرده و انتظار می‌رود دمای آنها کاهش پیدا کند. این روش برای پانل‌های فتوولتائیک متمرکز^۲ استفاده می‌گردد.

۴-۱-۲- تغییر فاز مواد

تغییر فاز مواد^۳ بر اساس پارامترهای مختلف به ویژه بر مبنای دمای ذوب یا انتقال فاز و ترکیب مواد تعیین می‌شود. دمای ذوب تغییر فاز مواد به دو محدوده تقسیم می‌شود، دمای ذوب پایین که کمتر از ۲۰۰ درجه سانتیگراد است و دمای ذوب بالا که بیشتر از ۲۰۰ درجه سانتیگراد است.

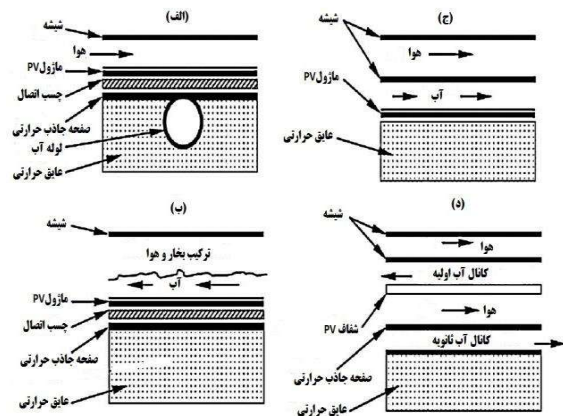
۲-۲- اجزای مختلف کلکتورهای ترکیبی

۱-۲-۲- پوشش شفاف

استفاده از تعدادی پوشش شفاف در مونتاژ ورق و لوله توسط فوجی سوا^۴ مطرح گردید و سپس توسط چند محقق دیگر مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵]. فرایس^۵ در سال ۲۰۰۷ به این نتیجه رسید که استفاده از شیشه شفاف در سلول‌های خورشیدی ترکیبی، راندمان حرارتی بالاتری نسبت به استفاده از شیشه‌های مات دارد ولی راندمان الکتریکی به دلیل وجود نور زیاد و اضافی کاهش پیدا می‌کند [۱۶]. موریتا^۶ مشخص کرد که راندمان کلکتورهای ترکیبی با دمای حداکثری ۸۳/۶ درجه سانتیگراد با پوشش شفاف، ۱۳/۳۶٪ افزایش و با دمای حداکثری ۳۸/۸ درجه سانتیگراد با پوشش مات، ۱۱/۹۲٪ افزایش پیدا می‌کند [۱۷]. اولین تحلیل نشان داد اگر حرارت یا کل انرژی تولیدی حداکثر شود در آن حالت طراحی پوشش شفاف همیشه مناسب‌تر خواهد بود. گرچه تجزیه و تحلیل‌های انجام شده نشان داده بود که عامل بسته‌بندی و جرم آب و سرعت باد برای بالا بردن راندمان موثر است، ولی برای سیستم‌هایی با پوشش شفاف افزایش تابش خورشید و دمای محیط بیشتر نقش خواهد داشت. برای انتخاب جنس پوشش سلول‌های فتوولتائیک می‌توان از مواد سبک‌تر دیگری مانند پلی‌کربنات^۷، پلی‌متیل متاکریلات^۸، پلی‌وینیل فلوراید^۹ به جای شیشه استفاده کرد، با این حال استفاده از شیشه بخاطر خواص نوری خوب، مقاومت در برابر امواج فرابنفش^{۱۰} و مقاوم در برابر درجه حرارت بالا بهترین گزینه بوده است. در تحقیقی که آسته^{۱۱} در سال ۲۰۱۴ انجام داده است به این نتیجه رسید که فاصله بین پوشش مواد و سلول فتوولتایی باید به اندازه کافی کم باشد تا از خواص عایقی هوا جلوگیری شود و به طور کلی این فاصله باید به اندازه ۱۵ تا ۴۰ میلیمتر باشد [۱۸].

۲-۲-۲- ماژول‌های فتوولتایی

در ماژول‌های فتوولتائیک برای جذب‌های حرارتی از پوشش EVA بر روی سلول استفاده می‌شود با این وجود مشکلات خاصی بین پوشش و ماژول



شکل ۲ طبقه بندی انواع کلکتورهای ترکیبی

ماژول فتوولتایی می‌تواند مات یا شفاف و یا بصورت جداگانه دارای جذب حرارت در زیر کانال باشد. برای کاهش مقاومت در برابر فشار آب در کانال‌ها بهتر است کانال به صورت گسترده و پهن ساخته شود، که در این صورت از نوع ساختار جعبه‌ای برای کانال استفاده می‌گردد. در این ساختار کانال جذب مربع شکل با گرانول‌های سرامیکی پر می‌شود که این کار باعث بهبود انتقال حرارت به سیال می‌گردد. اخیراً بیشتر از این نوع جذب‌ها در کلکتورهای ترکیبی استفاده می‌شود [۱۱]. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده پانل دارای دو جذب است که به‌طور خاص ترکیبی از کانال و جریان سیال است. ورق شفاف فتوولتایی بعنوان یک جذب اولیه در زیر کانال آب استفاده می‌شود و صفحه فلزی به عنوان جذب ثانویه در سلول فتوولتایی نصب شده است که هوا را از کانال آب جدا می‌کند. عبور آب از طریق کانال بالایی و پایینی صورت می‌گیرد. این طراحی بازده حرارتی بالایی دارد [۱۲].

۲- پارامترهای مهم و موثر در طراحی صفحات جذب ترکیبی

و بررسی کارایی آنها

۱-۲-۱- خنک‌سازی کلکتورهای ترکیبی

راندمان الکتریکی سلول‌های فتوولتایی با خنک‌کردن افزایش و بهبود می‌یابد. ساهای^۱ در سال ۲۰۱۳ روش‌های مختلفی را برای خنک‌کردن کلکتورهای ترکیبی بررسی کرده است. از آن جمله سیستم خنک‌سازی میکروکانال، سیستم خنک‌سازی ترموالکتریک، سیستم خنک‌سازی لوله حرارتی، سیستم خنک‌سازی لایه آب و سیستم خنک‌کاری تغییر فاز می‌باشند [۱۳].

۱-۲-۱- میکرو کانال‌ها

میکرو کانال گرم‌ترین محفظه در مبدل‌هاست، این سیستم دارای کانال‌هایی با قطر کمتر از یک میلیمتر است که اغلب در خنک‌کننده‌های الکترونیکی استفاده می‌شود. کانال‌ها را می‌توان در پشت قطعات و مدارهای الکتریکی ماشین‌کاری کرد تا گرمای تولید شده توسط اجزای الکترونیکی را توسط جابجایی اجباری به سمت خنک‌کننده منتقل کند.

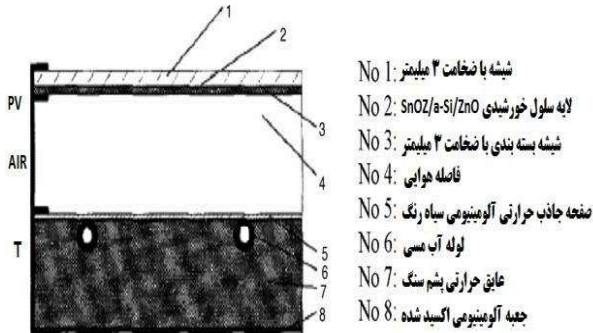
۲-۱-۲- سیستم‌های خنک‌سازی ترمو الکتریک

سیستم خنک‌سازی ترموالکتریک بر اساس دستگاه ترموالکتریک و دستگاه‌هایی که از دو نیمه تشکیل شده بوجود آمده است که مشتمل بر دو نوع N و P می‌باشد. هنگامی که یک گرادیان دما وجود دارد اکثر حامل‌ها از سمت گرم به سمت سرد پخش می‌شوند و ولتاژ و جریان را تنظیم می‌کند. در اثر

1. Sahay

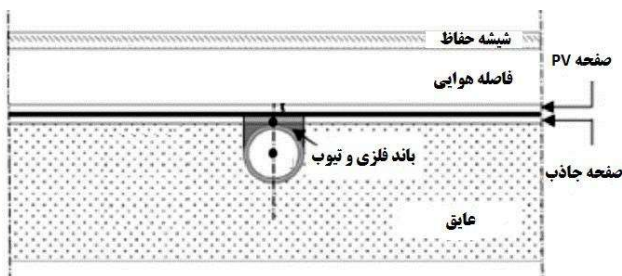
2. Concentrator Photovoltaic Panels
3. Phase Changing Materials
4. Fujisawa
5. Fraiese
6. Morita
7. Polycarbonate
8. Polymethyl-Methacrylate
9. Polyvinyl Fluoride
10. UV
11. Aste

نازک α -Si ابتدا توسط استیلر^۳ و همکارانش صورت گرفت که حاکی از کاهش هزینه‌ها بود. آنان مطابق شکل ۴ از یک لوله مسی با ورقه و پره استفاده کردند. این کار باعث شد راندمان گرمایی ۳۲/۵٪ حفظ شود. آزمایش آنها نشان داد که کلکتورهای جذب حرارت در دمای میانگین ۵۲ درجه سانتیگراد توان گرمایی ۱۱۷/۲۵ وات و راندمان ۱۸/۶٪ دارند [۲۴].



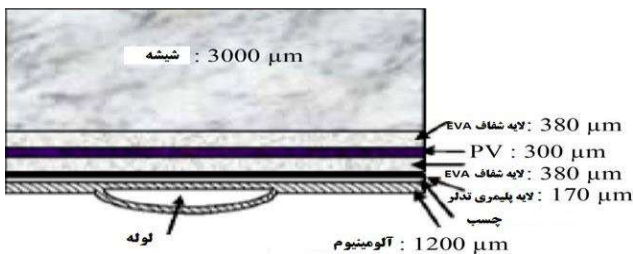
شکل ۴ سطح مقطع مازول سلول خورشیدی لایه نازک a-Si در ترکیب با کلکتور ترکیبی

چو^۴ با یک مدل دینامیکی برای طراحی مشابه نشان داد که راندمان پره و کیفیت اتصال میان کلکتور و ورقه‌ها در زیر پانل‌ها یک عامل مهم است و می‌تواند محدودیت‌هایی را برای راندمان کل ایجاد کند (شکل ۵) [۲۵].



شکل ۵ سطح مقطع کلکتور ترکیبی آبی تک شیشه‌ای

تکنولوژی ارزان قیمت رول باند که در آن از آلومینیوم استفاده می‌شود مخصوص لوله‌های توخالی (ورقه و لوله) است. قسمت میانی این طرح نقش سیستم مبدل حرارتی در زیر مازول فتولتائیک را ایفا می‌کند (شکل ۶) [۲۶].



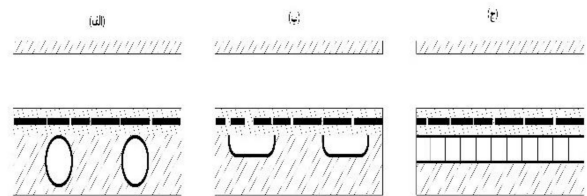
شکل ۶ سطح مقطع پانل‌های خورشیدی پلی کریستال سیلیکون همراه مبدل حرارتی

راندمان‌های جانبی سیستم‌های ترکیبی در بازافت گرمای آب در صنعت به-طور جامع و کامل توسط برنامه TRNSYS مورد بررسی قرار گرفته است. این برنامه شامل فرآیند صنعتی سیستم گرمایی می‌باشد که در دو دمای متفاوت

فتولتائیک وجود دارد. وجود اسیداستیک در دمای بالاتر از ۸۰ درجه سانتیگراد باعث تجزیه و تخریب سلول‌های فتولتائیک می‌شود بنابراین پوشش‌های معمولی فتولتائیک نمی‌تواند مقاومت بالایی (۱۸۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد) با پوشش شفاف داشته باشد. کلکتورهای ترکیبی برپایه پوشش فتولتائیک با ژل سیلوکسان^۱ در دانشگاه چک توسط ماتوسکا^۲ در حال بررسی می‌باشد. استفاده از ژل سیلوکسان به جای لایه EVA در کلکتورهای ترکیبی مزایایی از قبیل مقاومت در برابر حرارت، شفافیت بالا، سازگاری با تنش‌های گرمایی و انتقال حرارت دارد [۱۹].

۲-۳- ساختار صفحات جذب

وجود صفحات جذب در کلکتورهای ترکیبی از اجزا مهم محسوب می‌شود زیرا حرارت انرژی خورشیدی را انتقال می‌دهد. از محاسن صفحه‌های جذب هدایت حرارتی بالا آنها می‌باشد و به همین دلیل در صفحات ترکیبی آبی از صفحات جذب فلزی مانند مس و آلومینیوم استفاده شده و کمتر از فولاد استفاده می‌گردد. صفحه بالای سلول‌های فتولتائیک باید به طور کامل چسبندگی داشته باشد تا باعث افزایش انتقال گرما شود. معمول‌ترین روش برای جذب در سلول‌های ترکیبی آبی استفاده از ورق و لوله می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳ ساختار کلکتورهای خورشیدی (الف) ورق و لوله، (ب) رول باند، (ج) جعبه کانال

در ساختار رول باند از دو ورق آلومینیومی مانند ساندویچ استفاده شده که طی یک فرآیند گرم یا سرد می‌شود. کانال مورد نظر بر روی ورق داخلی را قبل از فشار بر ورق‌های آلومینیومی بوجود می‌آورند که این کار باعث انعطاف پذیری بیشتری برای انواع مختلف کانال‌ها شده و هزینه تولید آن را کاهش می‌دهد [۲۰]. ساختار کانال‌هایی با مقطع مستطیلی موازی توسط آلومینیوم و گاهی از مواد پلیمری ساخت می‌شود [۲۱].

۳- بررسی کلکتورهای سیستم‌های ترکیبی PV/T

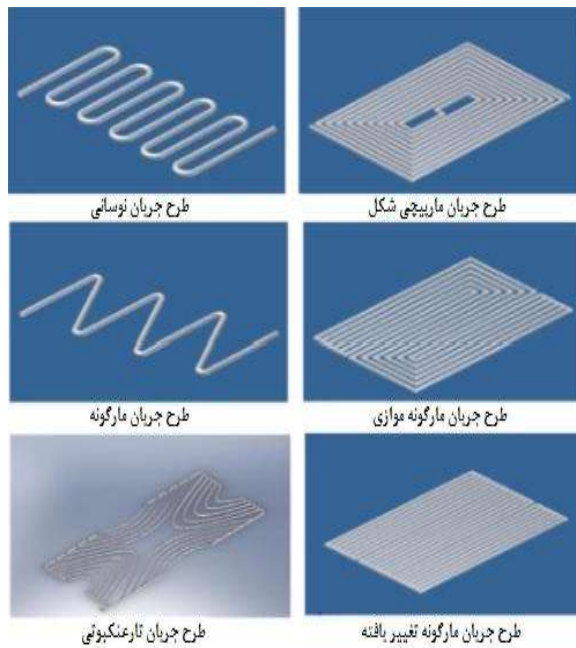
۱-۳- بررسی کلکتورهای ترکیبی آبی

سلول‌های خورشیدی معمول تجاری حدود ۱۶٪ تا ۱۸٪ از انرژی خورشیدی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند و بقیه انرژی توسط انعکاس و یا نفوذ گرما به درون سلول‌های فتولتائیک از بین می‌رود. استفاده از بازتابنده‌ها، تقویت‌کننده و شیشه شفاف در سیستم ترکیبی آبی در سلول‌های pc-si باعث بهبود کلی در راندمان آنها می‌شود در حالی که راندمان حرارتی سیستم به ۷۹٪ و راندمان الکتریکی سیستم به ۸/۸٪ می‌رسد [۲۲].

طراحی ورق و لوله راحت‌ترین کار در تولید و ساخت این نوع سیستم‌ها است، در حالی که راندمان آن تنها ۲٪ از انواع دیگر کلکتورها پایین‌تر است [۲۳]. ساخت و آزمایش سیستم‌های ترکیبی با استفاده از سلول‌های لایه

3. Staebler
4. Chow

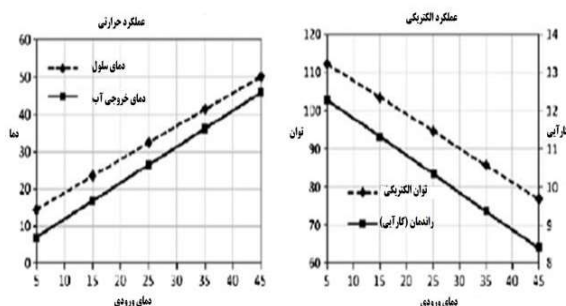
1. Siloxane
2. Matuska



شکل ۹ انواع مختلف مسیر جریان در کلکتورهای ترکیبی خورشیدی

۳-۲- بررسی کلکتور ترکیبی هوایی

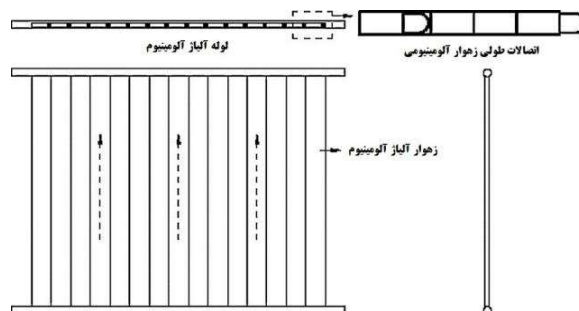
کلکتورهای ترکیبی هوایی در طراحی ها و مدل‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که شایع‌ترین مدل‌های آن در شکل ۹ نشان داده شده است. در اکثر مدل‌ها جهت عبور جریان از دو کانال مجزا استفاده می‌شود که با توجه به استفاده از هوا در این نوع مدل‌ها انتقال گرما در پانل‌های فتولتاییک کاهش پیدا می‌کند. به طور کلی تجزیه و تحلیل عملکرد کلکتورهای فتولتاییک نشان می‌دهد که سیستم‌های دو کاناله خیلی بهتر از سیستم‌های تک کاناله می‌باشد. در تحقیقی که توسط هگازی^۲ انجام گرفت دیده شد که برای به حداکثر رساندن گرما در کلکتورهای خورشیدی باید بر روی شکل هندسی کانال جریان سیال متمرکز شد. او همچنین یافت که نسبت عمق به طول کانال برای بهینه‌شدن عملکرد سیستم باید ۰/۰۲۵ باشد [۳۰].



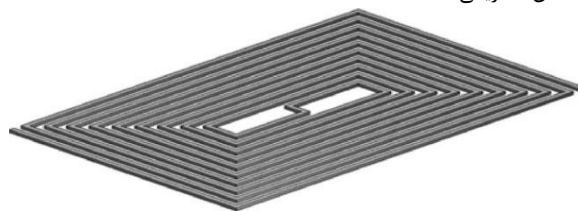
شکل ۱۰ تغییرات عملکرد کلکتورهای ترکیبی برحسب دمای جریان ورودی در مبدل حرارتی

راندمان حرارتی با افزایش سرعت در کلکتورهای هوایی افزایش می‌یابد در حالی که راندمان الکتریکی با افزایش سرعت جریان هوا کاهش پیدا می‌کند. برای بهبود در انتقال حرارت در کلکتورهای هوایی تعداد کانال‌ها افزایش پیدا کرده است. تجزیه و تحلیل پارامتری نشان داد که با افزایش دمای ورودی، راندمان حرارتی کاهش و با زاویه‌دار کردن سطح عایق، راندمان حرارتی بیشتر

کار می‌کند. نتایج شبیه سازی حاکی از آن است که تولید انرژی الکتریکی در سلول‌های پلی کریستال در مقایسه با سلول‌های بی‌نظم بیشتر است در حالی که اگر به جای آن از سلول‌های خورشیدی بی‌نظم استفاده شود تولید انرژی حرارتی بیشتر می‌شود. از سال ۲۰۰۷ تحقیق بر روی گردش طبیعی سیال در سیستم ترکیبی آبی مطابق شکل ۷ آغاز گردید. نتیجه این آزمایش‌ها حاکی از آن است که به ازای هر واحد سطح نصب شده میزان انرژی بیشتری در مقایسه با پانل‌های فتولتاییک آب داغ تولید می‌شود [۲۷].



شکل ۷ ساختار جعبه تخت کلکتور ترکیبی با آلیاژ آلومینیوم برای سیستم آب گرم بعد از آن شبیه‌سازی راندمان کلکتورهای ترکیبی با کلکتورهای جاذب گرمای متفاوت در سال ۲۰۰۹ مورد مطالعه قرار گرفت. شبیه‌سازی کلکتورها اثر متغیرهایی مثل شدت نور خورشید، دمای هوای اطراف و سرعت جریان سیال را نشان می‌دهد [۲۸]. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهند که بهترین طراحی همان طراحی جریان حلزونی شکل ۸ با راندمان حرارتی ۵۰/۱۲٪ و راندمان الکتریکی ۱۱/۹۸٪ است.



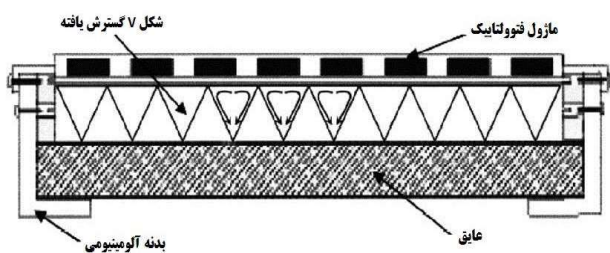
شکل ۸ ساختار طرح حلزونی جریان سیال

شش مدل از کلکتورهای تک پوششی با پوشش شفاف طراحی و با هم مقایسه شده‌اند و انواع مختلف مسیرهای جریان سیال در آنها در نظر گرفته شد که عبارت است از مستقیم، نوسانی، مارپیچ و مارگونه. طبق شکل ۸ بهترین نتایج و عملکرد در طراحی جریان مارپیچ بوجود آمده است. یک عامل مهم در طول جریان، افت فشار می‌باشد که هر چقدر افت فشار بیشتر شود نیاز به انرژی بیشتری برای پمپ کردن گردش سیال می‌باشد. نتایج تجربی از مقایسه و شبیه‌سازی دو مدل چنگالی و مارپیچی توسط پیپر^۳ در سال ۲۰۱۱ بدست آمده که نتایج آن نشان داد که مدل چنگالی برای سرعت جریان بالا بهتر از مدل مارپیچ است [۲۹]. به طور کلی عملکرد سلول‌های ترکیبی آبی بستگی به درجه حرارت آب، سرعت جریان، شکل کانال، اندازه کانال جریان آب، نوع سلول فتولتاییک، شرایط آب و هوا و مکان مورد استفاده دارد. برخی از مشکلات فنی ارائه شده جهت بهبود سیستم‌های ترکیبی مبتنی بر آب، تغییرات دمای آب در طول عملیات و مشکل انجماد در محیط آب و هوای سرد در منطقه خاص می‌باشد.

2. Hegazy

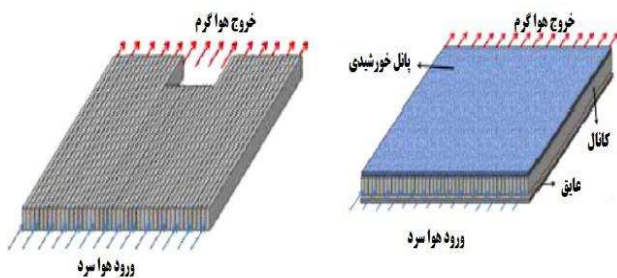
1. Pieper

در طرحی دیگر از کلکتورهای ترکیبی تک گذر مطابق شکل ۱۳ کلکتورهای ترکیبی به صورت شیارهای ۷ طراحی شده و در زیر صفحه فتولتائیک نصب شده است، در این طرح از هوا به عنوان انتقال دهنده گرما استفاده شده و در حین آزمایش سرعت جریان هوا تقریباً ثابت نگه داشته شده است. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که با اضافه کردن شیارهای ۷ شکل به این طراحی، راندمان کلکتورهای ترکیبی در مقایسه با دیگر کلکتورها ۳۰٪ افزایش می‌یابد [۳۵].



شکل ۱۳ سطح مقطع کلکتورهای ترکیبی ۷ شکل گسترش یافته

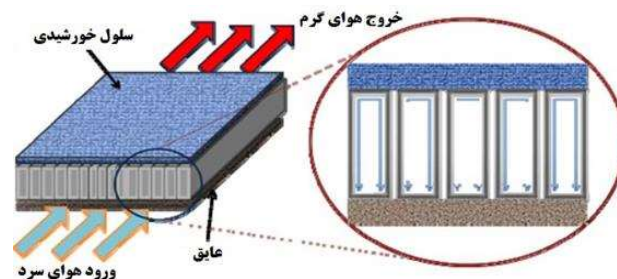
همچنین آزمایشی دیگر بر روی جاذب‌های تک گذر مستطیلی شکل در سال ۲۰۱۰ انجام شده است، در این آزمایش تونل مستطیلی شکل نقش کلکتور جاذب حرارت را داشته است که در زیر پانل‌های فتولتائیک قرار دارد. هدف اصلی این آزمایش بررسی تاثیر جریان مناسب هوا برای خنک کردن پانل‌های فتولتائیک بوده است. نتایج این آزمایش نشان داد که راندمان کلکتورهای ترکیبی ۶۴/۷۲٪ و راندمان حرارتی آنها ۵۴/۷۰٪ تحت تابش خورشیدی ۸۱۷/۴ وات بر متر مربع (W/m²) است. سرعت در این آزمایش برای جریان ۰/۰۲۸۷ کیلوگرم بر ثانیه در دمای محیط ۲۵ درجه سانتیگراد بوده است. نتیجه آزمایش نشان می‌دهد که کلکتورهای ترکیبی با تونل مستطیلی راندمان بهتری نسبت به سیستم‌های قدیمی دارد (شکل ۱۴) [۳۶].



شکل ۱۴ طراحی کانال مستطیلی شکل تک گذر در کلکتورهای ترکیبی

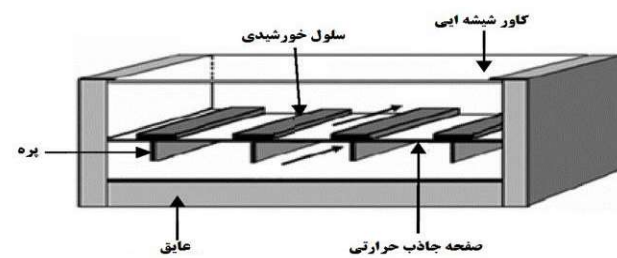
کلکتور ترکیبی هوایی دوگذره با پره و تمرکز دهنده ترکیبی سهموی توسط عثمان آ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ مورد استفاده قرار گرفت، این کار با هدف مطالعه راندمان سیستم در شرایط مختلف انجام شده است. آنها در کار خود تمرکز دهنده ترکیبی سهموی را اضافه کرده‌اند تا تولید انرژی حرارتی و الکتریکی را بالا ببرند. همچنین پره‌ها را اضافه کرده‌اند تا مشکل راندمان سلول‌های خورشیدی در دماهای بسیار بالا را حل کنند [۳۷]. همان طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، نحوه جریان هوا مانند جریان هوا در کلکتورهای پره‌دار است، اما با وجود تمرکز دهنده ترکیبی سهموی تابش خورشیدی

می‌شود. نتایج بدست آمده مشخص کرد زمانی که عمق کانال بهینه باشد بازده حرارتی حداکثر می‌شود. عمق مطلوب کانال در حدود ۰/۵ تا ۰/۱ متر می‌باشد. اثر پره‌ها، عمق کانال، سرعت جریان، دمای ورودی، فاکتور بسته‌بندی در راندمان حرارتی و الکتریکی سیستم توسط کومار در سال ۲۰۱۱ مورد بررسی قرار گرفت این آزمایش نشان داد وجود پره باعث کاهش دمای سلول از ۸۲ به ۶۶ درجه سانتیگراد شده و منجر به بهبود در راندمان الکتریکی سیستم می‌شود [۳۱]. مقایسه‌ای که بین ماژول‌های شیشه‌ای با ماژول‌هایی که با تدرل پوشیده شده‌اند انجام گرفته است، نشان می‌دهد بهترین راندمان الکتریکی مربوط به ماژول‌هایی است که دارای پوشش شیشه-ای شفاف و کانال می‌باشند [۳۲]. با توجه به مطالعاتی که گوواراچ^۱ انجام داده است مشخص شد که ماژول‌های نیمه شفاف Pc-Pv برای یک کلکتور هوا باعث گرم شدن هوا و افزایش راندمان ۶٪ بالاتر از راندمان سلول مورد استفاده بوده است [۳۳]. یک مطالعه مقایسه‌ای برای بررسی اثر سرعت جریان سیال در کلکتورهای ترکیبی انجام شده است [۳۴]. در این مقایسه همان طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود نتایج آزمایش نشان می‌دهد که کلکتور جاذب تک گذر ترکیبی، راندمان ۶۴٪ و راندمان الکتریکی ۱۱٪ دارد و حداکثر خروجی انرژی آن به ۲۵/۳۵ وات می‌رسد. این راندمان برای جاذب مستطیلی تک گذر ۵۵٪ و راندمان الکتریکی ۱۰٪ با خروجی انرژی ۲۲/۴۵ وات می‌باشد.



شکل ۱۱ سطح مقطع کلکتورهای ترکیبی هوایی با طرح مستطیل شکل

شکل ۱۲ آزمایشی را نشان می‌دهد که در آن سلول‌های فتولتائیک بر روی پره‌ها قرار دارند. این آزمایش به منظور بررسی تاثیر جریان سیال سیستم طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با وجود پره‌های زیری، راندمان فتولتائیک را از ۴۹/۱۳۵٪ به ۶۲/۸۲۳٪ افزایش داده و سرعت جریان سیال نیز از ۰/۰۳۱۶ تا ۰/۰۹ کیلوگرم بر ثانیه متغیر است، تابش خورشیدی در این آزمایش ۶۰۰ وات بر متر مربع (W/m²) و دما نیز ۳۵ درجه سانتیگراد بوده است.



شکل ۱۲ سطح مقطع کلکتورهای ترکیبی تک گذر با پره و دو مسیر هوای گرم



موازی	پوشش دار	0.005
موازی	پوشش دار	0.0054-0.0064
موازی	پوشش دار	0.015
جعبه	پوشش دار	0.025-0.04

۵- نتیجه‌گیری

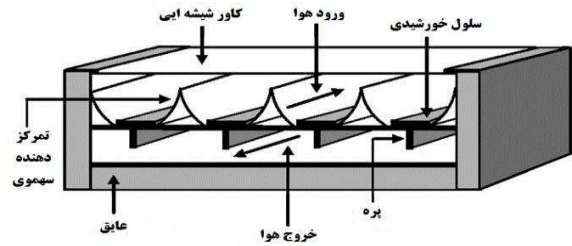
این مقاله شامل مروری کامل بر طراحی‌های انواع گوناگون صفحات جاذب خورشیدی در سیستم‌های ترکیبی است. این بررسی نشان می‌دهد که این سیستم‌ها دقیقاً چگونه طراحی شده و راندمان آنها چگونه است. در این بررسی مشخص می‌گردد که کلکتور خورشیدی فتوولتاییک/حرارتی را می‌توان براساس الگوی جریان سیال، جاذب زیر ماژول نیز طبقه‌بندی کرد. برای طرح‌هایی از نوع طرح‌های خورشیدی فتوولتاییک/حرارتی آبی، باید به الگوی جریان آب زیر صفحات درون ورقه‌ها و لوله‌ها و یا شکل مربعی، مستطیلی و گرد بودن آنها توجه کرد. برای نوع هوایی، باید به الگوی جریان هوا و نصب آنها در بالا، زیر و یا دو طرف کلکتورهای جاذب دقت شود. کلکتورهای نوع هوایی را همچنین می‌توان با نوع آبی ترکیب کرد. تحقیقات قابل توجهی در زمینه کلکتورهای ترکیبی به عمل آمده است که عمدتاً در طراحی صفحات جاذب، انتخاب مواد و نوع پوشش در کاهش هزینه و عملکرد سیستم موثر می‌باشد.

پیشرفت‌هایی که در مدل‌های نظری و تجربی صورت گرفته است به منظور پیش‌بینی راندمان سیستم‌های ترکیبی در شرایط عملیاتی بوده است. با توجه به انتقال حرارت و شرایط مرزی مناسب مدل تحلیلی سیستم‌های ترکیبی به معادلات انرژی بستگی دارد. نتایج مقایسه‌ای راندمان سیستم‌های ترکیبی آبی برحسب پارامترهای مختلف موثر در جدول ۲ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که اقداماتی مبنی بر بررسی تاثیر پارامترهای دیگر که در سیستم‌های ترکیبی هوایی و ترکیب آب و هوا موثر هستند تاکنون انجام نگرفته است.

جدول ۲ راندمان حرارتی و الکتریکی در کلکتورهای ترکیبی آبی

نوع صفحه	نوع کلکتور	سرعت جریان (kg/sm ²)	راندمان حرارتی	راندمان الکتریکی	نوع آنالیز و تحلیل
ورق و لوله	بدون پوشش	0.02	66%	14%	تجربی
ورق و لوله	پوشش دار	0.02	58%	8.9%	عددی
ورق و لوله	بدون پوشش	0.02	52%	9.7%	عددی
جعبه کانال	بدون پوشش	0.02	70%	15%	تجربی
جعبه کانال	پوشش دار	0.02	57%	12%	عددی
جعبه کانال	پوشش دار	N/A	45% daily	10.15% daily	تجربی
جعبه کانال	پوشش دار	0.02	60%	9%	عددی

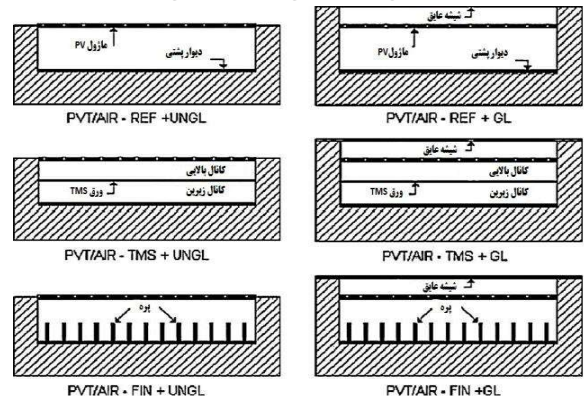
افزایش می‌یابد. پره‌هایی که در زیر سلول‌های فتوولتایی قرار دارند کمک می‌کنند تا گرمای موجود در سلول‌های فتوولتایی از بین برود.



شکل ۱۵ سطح مقطع دو گذره کلکتورهای ترکیبی با پره و تمرکز دهنده سهموی

۳-۳- کلکتورهای ترکیبی (آبی/هوایی)

شکل ۱۶ سطح مقطع طرح‌های ترکیبی که برای تولید آب و هوای داغ استفاده می‌شود را نشان می‌دهد. در این طرح‌ها از صفحات صاف و نازک فلزی با دیوارهای مجهز به کانال‌های هوا که در میانه سیستم قرار دارد استفاده کردند. در این آزمایشی که برای بررسی اثر پارامترهای موثر صورت گرفت، تاثیر عمق کانال، طول کانال و سرعت جریان بر راندمان الکتریکی و حرارتی هم برای آب و هم برای هوا بررسی شد. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که کلکتورهای ترکیبی آبی راندمان بهتری نسبت به کلکتورهای ترکیبی هوایی دارند، زیرا مشخصه‌های ترمودینامیکی آب در مقایسه با هوا بهتر است. نتیجه‌ی آزمایش نشان می‌دهد که راندمان حرارتی ۵۲٪ و راندمان الکتریکی ۹٪ تا ۱۰٪ خواهد بود، یعنی راندمان کلی ۶۱٪ تا ۶۲٪ می‌باشد [۳۸].



شکل ۱۶ سطح مقطع مدل‌های کلکتورهای فتوولتایی

۴- خصوصیات هندسی، شرایط عملیاتی و محیطی

جدول ۱ مقادیر بهینه جریان برای انواع کلکتورهای ترکیبی را بیان می‌کند. پارامتر دیگری که بر عملکرد و راندمان حرارتی و الکتریکی در کلکتورهای ترکیبی تاثیر می‌گذارد دمای آب بوده است.

جدول ۱ سرعت جریان مطلوب در کلکتورهای ترکیبی

نوع کانال	نوع کلکتور	سرعت جریان (kg/sm ²)
موازی	پوشش دار	0.0027
موازی	پوشش دار	0.0014
رول باند	پوشش دار	0.0014-0.0049



- [14] Jakhar, Soni, M.S., Gakkhar, 2016. Historical and recent development of concentrating photovoltaic cooling technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 60, 41–59.
- [15] Fujisawa, Tani 1997. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Review of 65th ref on Riffat and Cuce (2011). Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 47 (1–4), 135–148.
- [16] Fraisse, G., Menezo, C., Johannes, K., 2007. Energy performance of water hybrid PVT collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. *Sol. Energy* 81(11), 1426–1438.
- [17] Morita, Y., Fujisawa, Moment performance of photovoltaic/thermal hybrid panel (numerical analysis and exergetic evaluation). *Review of 213th ref on Riffat and Saffa (2011). Electr. Eng. Jpn* 133 (2), 43–51.
- [18] Aste, Niccolò, del Pero, Claudio, Leonforte, Fabrizio, 2014. Water flat plate PV-thermal collectors: a review. *Sol. Energy* 102, 98–115.
- [19] Matuska, Tomas., 2014. Performance and economic analysis of hybrid PVT collectors in solar DHW system. *Energy Procedia* 48, 150–156.
- [20] Bombarda, Di Marcoberardino, Lucchini, Leva, Manzolini, Molinaroli, Ellipsis & Simonetti, 2016. Thermal and electric performances of roll-bond flat plate applied to conventional PV modules for heat recovery. *Appl. Therm. Eng.* 105, 304–313.
- [21] Cristofari, 2012. Innovative patented PV/TH solar collector: optimization and performance evaluation. *Energy Procedia* 14, 235–240.
- [22] Zondag, H.A., 2008. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: a review. *Review of 14th ref on Riffat and Cuce (2011). Renew. Sustain. Energy Rev.* 12(4), 891–959.
- [23] Ibrahim A, Jin GL, Daghig R, Salleh MHM, Othman MY, Ruslan MH, et al. Hybrid photovoltaic thermal (PV/T) air and water based solar collectors suitable for building integrated applications. *American Journal of Environmental Sciences* 2009;5:24-618.
- [24] Staebler DL, Urli NB, Kiss ZJ. Development of high efficiency hybrid PV-thermal modules. In: *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE* 2002.
- [25] Chow TT. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy* 2003;75: 52-143.
- [26] Bodaert S, Caccavelli D. Hybrid PVTh Panel optimisation using a Femlab/Matlab/ISEIM approach. *Environment Identities and Mediterranean Area, ISEIMA'06*. In: *First international Symposium on* 2006. 2006. 6-121.
- [27] Ji J, Lu J-P, Chow T-T, He W, Pei G. A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation. *Applied Energy* 2007;37:222.
- [28] Ibrahim A, Othman MY, Ruslan MH, Alghoul MA, Yahya M, Zaharim A, et al. Performance of photovoltaic thermal collector (PVT) with different absorbers design. *WSEAS Transactions on Environment and Development* 2009;30:321.
- [29] Pieper, M., Klein, P., 2011. A simple and accurate numerical network flow model for bionic micro heat exchangers. *Heat Mass Transf.* 47 (5), 491–503.
- [30] Hegazy, A.A., 2000. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Review of 127th ref on Riffat and Saffa. Energy Convers. Manage.* 41 (8), 861–881.
- [31] Tiwari, A., Sodha, M.S., 2007. Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: experimental validation of theoretical model. *Review of 181th ref on Riffat and Saffa (2011). Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 91 (1), 17–28.
- [32] Garg, H.P., Adhikari, R.S., 1999. Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. *Int. J. Energy Res.* 23 (15), 1295–1304.
- [33] Guiavarch, A., Peuportier, B., 2006. Photovoltaic collectors efficiency according to their integration in buildings. *Review of 137th ref on Riffat and Saffa (2011). Sol. Energy* 80 (1), 65–77.
- [34] Alfegi MEA, Sopian K, Othman MYH, Yatim BB. Transient mathematical model of both side single pass photovoltaic thermal air collector. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences* 2007;6:22.
- [35] Alfegi MEA, Sopian K, Othman MYH, Yatim BB. Experimental investigation of single pass, double duct photovoltaic thermal (PV/T) air collector with CPC and fins. *American Journal of Applied Sciences* 2008;71-866.

تجربی	N/A	71%	N/A	پوشش دار	جعبه کانال
تجربی	N/A	76%	N/A	بدون پوشش	جعبه کانال
عددی	10.3% yearly	49.3% yearly	0.01	پوشش دار	رول باند
تجربی	8.7% daily	79%	0.02	پوشش دار	رول باند

۶- پیشنهادات و مطالعات آینده

با توجه به بررسی به عمل آمده برای کارهای بعدی پیشنهاد می‌شود که سیستم خورشیدی فتولتائیک/حرارتی با سیال هوا و به طور مجزا با سیال آب برای طراحی الگویی جریان سیال مورد بررسی قرار گیرد. مطالعات نشان دهنده آن است که الگوی صفحه‌های میدان جریان سیال می‌تواند در راندمان کلی این گونه سیستم‌ها بسیار موثر باشد.

۷- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از موسسه آموزش عالی صنعت آب و برق و سازمان انرژی‌های نو به خاطر حمایت‌های خود قدردانی می‌نمایند. همچنین از دانشگاه آزاد مجلسی به خاطر پشتیبانی صمیمانه تشکر می‌کنند.

۸- مراجع

- [1] Aste N, Chiesa G, Verri F. Design, development and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) air collector. *Renewable Energy* 2008, pp:27-914.
- [2] Zondag HA. Flat-plate PV-thermal collectors and systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2008;12:891–959.
- [3] Prakash J. Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for cogeneration of electricity & hot air/water. *Energy Conversion Management* 1994;35(11):72-967.
- [4] Bhargava AK, Garg HP, Agarwal RK. Study of a hybrid solar system—solar air heater combined with solar cells. *Energy Conversion and Management* 1991;9:471.
- [5] Bakker M, Zondag HA, Elswijk MJ, Strootman KJ, Jong MJM. Performance and costs of a roof-sized PV/thermal array combined with a ground coupled heat pump. *Solar Energy* 2005;9:331.
- [6] Siddiqui, M., Usama, A.F.M., Arif, Leah Kelley, Dubowsky, Steven, 2012. Threedimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions. *Sol. Energy* 86 (9), 2620–2631.
- [7] Teo, H.G., Lee, P.S., Hawlader, M.N.A., 2012. An active cooling system for photovoltaic modules. *Appl. Energy* 90 (1), 309–315.
- [8] Siddiqui, O.K., Zubair, S.M., 2017. Efficient energy utilization through proper design of microchannel heat exchanger manifolds: a comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74, 969–1002.
- [9] Frankl, P., Gamberale, M., Bttisti, F., 2000. Life cycle assessment of a PV cogenerative system: comparison with a solar thermal collector and a PV system. In: *16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow*.
- [10] Bhargava AK, Garg HP, Agarwal RK. Study of a hybrid solar system—solar air heater combined with solar cells. *Energy Conversion and Management* 1991;9:471.
- [11] W.Chow, P.Pei, G. Chan, 2006. Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water. *Review of 81th ref on Riffat and Cuce (2011). Appl. Energy* 83 (3), 199–210.
- [12] Zondag, H.A., de Vries, D.W., van Helden, W.G.J., van Zolingen, R.J.C., van Steenhoven, 2003. The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Sol. Energy* 74 (3), 253–269.
- [13] Sahay, Sethi, V.K., Tiwari, A.C., 2013. Design, optimization and system integration of low cost Ground Coupled Central Panel Cooling System (GCCPCS). *Int. J. Current Eng. Technol.* 3 (4), 1473–1479.



- [36] Jin GL, Ibrahim A, Chean YK, Daghigh R, Ruslan H, Mat S, et al. Evaluation of single-pass photovoltaic-thermal air collector with rectangle tunnel absorber. American Journal of Applied Sciences 2010;82-277.
- [37] Othman, Mohd Yusof, Yatim, Baharudin, Sopian, Kamaruzzaman, Bakar, Mohd Nazari Abu, 2007. Desalination 2009 (1-3), 43-49.
- [38] Tonui JK, Tripanagnostopoulos Y. Air-cooled PV/T solar collectors with 1 Cost performance improvements. Solar Energy 2007;498-511.

