

الحمد لله
الذي هدانا لهذا
ما كنا لنهتدي لولا
هدى الله لنا



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

مهندسی سیستم های انرژی- تکنولوژی انرژی

مدل سازی و بررسی تجربی خنک کاری پنل های فتوولتاییک با استفاده از ماژول های ترموالکتریک

TEC/TEG

نگارنده

مهدی نیک زاد

اساتید راهنما

دکتر محمد ضامن

دکتر محمد حسین احمدی

مهرماه ۱۳۹۹



فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مهدی نیک زاد با شماره دانشجویی ۹۷۱۶۹۳۴ رشته مهندسی سیستم های انرژی گرایش تکنولوژی انرژی تحت عنوان مدلسازی و بررسی تجربی خنک کاری پنل های فتوولتاییک با استفاده از ماژول های ترموالکتریک TEC/TEG که در تاریخ ۱۳۹۹/۰۷/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒	ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹ ☐	د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☒ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد ضامن	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمدحسین احمدی	استادیار	
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر احمد نظری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر اکبر ملکی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تقدیم به همسر عزیزم و فرزندانم:

به پاس قدردانی که از روزهای آغازین این راه طولانی با وجود دو فرشته آسمانی مان کارن و کامیار، با قلبی آکنده از عشق و معرفت، محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش را برایم فراهم آوردی.

تورا

هی دوست دارم و

هی تمام نمی شود این

دوستت دارم هایت...!

و کارن و کامیار عزیزم بابت وقت هایی که می بایست با شما می گذراندم ولیکن نتوانستم کنار شما باشم.

سپاس و قدردانی

بر خود لازم می دانم از صمیم قلبم از همراهی، راهنمایی و مشاوره های اساتید عزیزم **دکتر محمد ضامن** و **دکتر محمدحسین احمدی** که با بردباری و شکیبایی کاستی های بنده را جبران نموده تشکر نموده و از خداوند متعال برایشان تندرستی و سلامتی آرزو نمایم. که بدون شک اگر راهنمایی این عزیزان نبود نمی توانستم در این مسیر موفق باشم.

و همچنین وظیفه خود می دانم که از خانم مهندس **فاطمه سوهانی** به پاس زحمات بی دریغ و کمک های ارزنده ای که در زمینه برنامه نویسی داشتند، سپاسگزاری نمایم.

تعهدنامه

اینجانب مهدی نیک‌زاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم‌های انرژی گرایش تکنولوژی انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدل‌سازی و بررسی تجربی خنک‌کاری پنل‌های فتوولتاییک با استفاده از مازول‌های ترموالکتریک TEC/TEG تحت راهنمایی‌های آقایان دکتر محمد ضامن و دکتر محمدحسین احمدی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا "Shahrood University of Technology" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ
امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

استفاده از پنل‌های فتوولتاییک برای تولید برق در دنیا توسعه روز افزونی دارد. با توجه به اینکه بازده این پنل‌ها با افزایش دما کاهش می‌یابد، بنابراین برای بهبود کارایی این سیستم‌ها باید دمای سلول‌های فتوولتاییک را تا حد امکان کاهش داد. برای خنک‌کاری پنل‌های فتوولتاییک روش‌هایی مانند اسپری کردن آب روی پنل، استفاده از سیال‌هایی مانند آب در گردش پشت پنل، استفاده از جابجایی طبیعی و اجباری هوا، مواد تغییر فاز دهنده، نانوسیال‌ها، غوطه‌وری در آب، استفاده از ترموالکتریک و... پیشنهاد و گاهی اجرا شده است. در این پایان نامه بررسی جامعی به صورت عملی و نظری بر روی کاربرد فناوری ترموالکتریک در خنک‌کاری پنل‌های فتوولتاییک صورت گرفته است. به منظور بکارگیری ترموالکتریک در ترکیب با پنل فتوولتاییک روش‌های مختلفی مانند استفاده از TEC بصورت مستقیم در پشت پنل، استفاده از TEC و TEG بصورت چسبیده به یکدیگر، استفاده از TEG بدون خنک‌کاری، خنک‌کاری بوسیله‌ی هوا و خنک‌کاری با آب ارزیابی گردید. نتایج کلی نشان داد که با نگاه کلی به مجموعه و با در نظر گرفتن مصارف الکتریکی TEC و فن‌های خنک‌کننده ترموالکتریک، بکارگیری روش‌های ذکر شده به جز مورد آخر (خنک‌کاری با آب) از دیدگاه انرژی توجیه‌پذیر نمی‌باشد. لذا طرح ترکیب ترموالکتریک با پنل فتوولتاییک حرارتی آب خنک (PVT-TEG) به عنوان گزینه نهایی برای ارزیابی تئوری و عملی انتخاب گردید. در مدل‌سازی این سیستم ترکیبی اجزایی مانند شدت تابش خورشید، پنل فتوولتاییک ساده و ترموالکتریک وجود دارد. جهت افزایش قابلیت اطمینان مدل، در ابتدا با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه اعتبارسنجی این اجزا با داده‌های تجربی صورت گرفت. مدل نهایی بر اساس طراحی صورت گرفته برای سیستم PVT-TEG تهیه گردید. به صورت همزمان ساخت و نصب دستگاه آزمایشگاهی انجام و آزمایش‌های عملی بر روی دستگاه از فروردین ماه تا شهریور ماه سال ۱۳۹۹ در آزمایشگاه انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود صورت پذیرفت. با قرار دادن یک پنل فتوولتاییک ساده در کنار پنل اصلی مقایسه عملکرد این دو در شرایط یکسان محیطی انجام شد. اعتبارسنجی مدل با داده‌های تجربی با خطای کمتر از ۱۸ درصد صورت گرفت. تولید الکتریسیته در پنل PVT-TEG نسبت به پنل ساده حدود ۸/۵ درصد افزایش داشت. تولید توان توسط ترموالکتریک سهم کمی از کل توان تولیدی پنل را دارد و لذا ارزیابی اقتصادی دقیق‌تری برای کاربرد این سیستم در حالت تجاری ضرورت خواهد داشت. در انتها نیز تحلیل

پارامتری مدل نهایی صورت گرفت که نتایج آن بازده کلی حدود ۷۰ درصدی را برای پنل ترکیبی پیش‌بینی می‌نماید.

کلمات کلیدی :

پنل فتوولتاییک، خنک‌کاری، ترموالکتریک خنک‌کننده (TEC)، ترموالکتریک ژنراتور (TEG)، فتوولتاییک حرارتی

فهرست مطالب

۱- فصل اول مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- پیدایش.....	۲
۳-۱- تقسیم‌بندی پنل‌های فتوولتائیک.....	۳
۴-۱- تاثیر دمای سلول بر بازده.....	۴
۵-۱- روش های خنک‌کاری.....	۵
۱-۵-۱- اسپری کردن آب.....	۶
۲-۵-۱- سیال در گردش پشت پنل.....	۶
۳-۵-۱- جابجایی طبیعی و اجباری هوا.....	۷
۴-۵-۱- مواد تغییر فاز دهنده.....	۸
۵-۵-۱- غوطه وری در آب.....	۹
۶-۵-۱- استفاده از ترموالکتریک.....	۱۰
۱-۶-۵-۱- معرفی فناوری ترموالکتریک.....	۱۰
۲-۶-۵-۱- انواع ترموالکتریک و کاربرد آن‌ها.....	۱۲
۱-۶-۵-۳- تجهیزات مورد نیاز استفاده از TEC.....	۱۴
۶-۱- جمع بندی.....	۱۵
۲- فصل دوم مروری بر پژوهش‌های پیشین.....	۱۷
۱-۲- مقدمه.....	۱۸
۲-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین.....	۱۸
۳-۲- معرفی پژوهش حاضر.....	۲۸
۳- فصل سوم معادله‌های حاکم و مدل‌سازی.....	۳۱
۱-۳- مقدمه.....	۳۲
۲-۳- معادله‌های حاکم و مدل‌سازی شدت تابش خورشید.....	۳۲

۳-۳	معادله‌های حاکم بر پنل فتوولتاییک و مدل‌سازی آن	۳۷
۴-۳	معادله‌های حاکم بر ضریب پُری (FF)	۴۱
۵-۳	مدل‌سازی و معادلات حاکم بر ترموالکتریک	۴۴
۶-۳	مدل‌سازی و معادله‌های حاکم بر سامانه ترکیبی PVT-TEG	۴۵
۴-۵۳	فصل چهارم اعتبارسنجی و ساخت	
۱-۴	مقدمه	۵۴
۲-۴	اعتبار سنجی	۵۴
۱-۲-۴	اعتبار سنجی مدل محاسباتی شدت تابش خورشید	۵۴
۲-۲-۴	اعتبار سنجی مدل پنل فتوولتاییک	۵۵
۳-۲-۴	اعتبار سنجی ترموالکتریک	۵۷
۳-۴	ارزیابی بکارگیری حالت‌های مختلف ترموالکتریک TEG و TEC	۵۹
۱-۳-۴	استفاده از TEC بصورت مستقیم در پشت پنل	۵۹
۲-۳-۴	استفاده از TEC و TEG بصورت چسبیده به یکدیگر	۶۰
۳-۳-۴	استفاده از TEG بدون خنک‌کاری	۶۳
۴-۳-۴	استفاده از TEG با خنک‌کاری بوسیله هوا	۶۳
۵-۳-۴	استفاده از TEG با خنک‌کاری بوسیله آب	۶۴
۴-۴	ارزیابی عملکرد مدل ترکیبی PVT-TEG	۶۵
۵-۷۳	فصل پنجم تحلیل پارامتری سیستم PVT-TEG	
۱-۵	مقدمه	۷۴
۲-۵	تاثیر میزان پوشش دهی سطح پنل با ترموالکتریک	۷۵
۳-۵	تاثیر شدت تابش	۷۷
۴-۵	تاثیر دمای محیط	۷۸
۵-۵	تاثیر سرعت باد	۸۰
۶-۵	تاثیر دمای آب ورودی	۸۱

۷-۵- تاثیر سرعت آب در بلوک خنک کننده..... ۸۳

۶- فصل ششم..... ۸۵

۱-۶- نتیجه گیری..... ۸۶

۲-۶- ارائه پیشنهادات..... ۸۷

مراجع..... ۸۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ سطح مقطع یک سلول فتوولتائیک [۴]..... ۳
- شکل ۲-۱ تاثیر دما بر توان تولیدی انواع پنل [۸]..... ۵
- شکل ۳-۱ اسپری آب روی سطح پنل [۱۰]..... ۶
- شکل ۴-۱ الف) شماتیک ب) سیستم طراحی شده ج) پشت پنل..... ۷
- شکل ۵-۱ خنککاری با جابجایی طبیعی هوا [۱۳]..... ۷
- شکل ۶-۱ خنک کاری پنل با جریان اجباری هوا [۱۴]..... ۸
- شکل ۷-۱ پیکربندی یک سیستم PV-PCM و مسیر عبور انرژی [۱۵]..... ۹
- شکل ۸-۱ غوطه ور کردن پنل در آب [۱۶]..... ۹
- شکل ۹-۱ شماتیک برش خورده یک ترموالکتریک [۱۹]..... ۱۰
- شکل ۱۰-۱ مقایسه اثر سبک و پلتیر [۲۳]..... ۱۲
- شکل ۱۱-۱ ترموالکتریک مینیاتوری [۲۵]..... ۱۳
- شکل ۱۲-۱ ترموالکتریک تک مرحله‌ای [۲۵]..... ۱۳
- شکل ۱۳-۱ ترموالکتریک چند مرحله ای..... ۱۴
- شکل ۱۴-۱ ترموالکتریک با سوراخ مرکزی [۲۵]..... ۱۴
- شکل ۱۵-۱ تجهیزات جانبی مورد نیاز..... ۱۵
- شکل ۱-۲ شماتیک ارائه شده توسط منگ و همکاران [۲۷]..... ۱۹
- شکل ۲-۲ شماتیک ارائه شده در پژوهش وانگ و همکاران [۲۸]..... ۱۹
- شکل ۳-۲ شماتیک ترموالکتریک خنک کننده مینیاتوری [۲۹]..... ۲۰
- شکل ۴-۲ شماتیک دیاگرام سیستم دومرحله ای TEC/TEG [۳۰]..... ۲۱
- شکل ۵-۲ شماتیک طراحی جدید لین و همکاران [۳۱]..... ۲۱
- ۶-۲ دستگاه آزمایش بن قائم و همکاران [۳۳]..... ۲۲
- شکل ۷-۲ شماتیک ارائه شده در مدل لامبا و همکاران [۳۴]..... ۲۳
- شکل ۸-۲ شماتیک ارائه شده توسط ماکي و همکاران [۳۵]..... ۲۴
- شکل ۹-۲ شماتیک اتصال سری پنل با TEC و TEG [۳۶]..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲ شماتیک مدل بررسی شده دیمیری و همکاران [۳۸]..... ۲۶
- شکل ۱۱-۲ سیستم طراحی شده توسط دیمیری و همکاران [۳۸]..... ۲۶
- شکل ۱۲-۲ شماتیک سیستم طراحی شده توسط دقیق و همکاران..... ۲۷
- شکل ۱۳-۲ سیستم طراحی شده توسط دقیق و همکاران [۳۹]..... ۲۸
- شکل ۱-۳ رابطه بین زمین و خورشید [۴۱]..... ۳۲

شکل ۳-۲ مسیر روزانه خورشید از طلوع تا غروب [۴۱].....	۳۳
شکل ۳-۳ تعریف عرض جغرافیایی، زاویه ساعت و زاویه انحراف محور زمین [۴۱].....	۳۵
شکل ۳-۴ معادله زمان [۴۱].....	۳۵
شکل ۳-۵ ضریب تصحیح منطقه آب و هوایی.....	۳۷
شکل ۳-۶ تابش مستقیم بروی سطح افقی و شیبدار [۴۱].....	۳۷
شکل ۳-۷ شماتیک مقاومت حرارتی پنل فتوولتاییک ساده.....	۳۸
شکل ۳-۸ منحنی جریان-ولتاژ.....	۴۳
شکل ۳-۹ شماتیک سیستم طراحی شده PVT-TEG با جریان سیال موازی از نمای پشت پنل.....	۴۶
شکل ۳-۱۰ شماتیک سیستم طراحی شده PVT-TEG با جریان سیال سری از نمای پشت پنل.....	۴۶
شکل ۳-۱۱ شماتیک مقاومت حرارتی سیستم طراحی شده PVT-TEG.....	۴۷
شکل ۳-۱۲ شماتیک بلوک خنک کننده آلومینیومی.....	۴۸
شکل ۴-۱ پیرانومتر مدل ۱۶۱۰۳ شرکت آلمانی Lambrecht.....	۵۴
شکل ۴-۲ مقایسه بین نمودار $Q_c - I$ کاتالوگ و مدل در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتیگراد.....	۵۸
شکل ۴-۳ مقایسه بین نمودار $V-I$ کاتالوگ و مدل در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتیگراد.....	۵۸
شکل ۴-۴ استفاده مستقیم از TEC در پشت پنل.....	۵۹
شکل ۴-۵ شماتیک ارائه شده در مقاله [۳۶].....	۶۰
شکل ۴-۶ ترموالکتریک TEC1-12706 آزمایش شده.....	۶۰
شکل ۴-۷ آزمایش جریان و ولتاژ عبوری.....	۶۱
شکل ۴-۸ حداقل دمای سطح ترموالکتریک.....	۶۱
شکل ۴-۹ نحوه قرار گیری TEC و TEG.....	۶۲
شکل ۴-۱۰ نمای داخلی TEC از کار افتاده.....	۶۲
شکل ۴-۱۱ استفاده از TEG با خنک کاری بوسیله هوا.....	۶۴
شکل ۴-۱۲ نحوه قرار گیری بلوک خنک کننده و TEG در پشت پنل.....	۶۵
شکل ۴-۱۳ نمای پشتی ست آپ نهایی PVT-TEG.....	۶۵
شکل ۴-۱۴ ست آپ نهایی در مقایسه با پنل ساده.....	۶۷
شکل ۴-۱۵ استفاده همزمان از سه مولتی متر جهت اندازه گیری جریان و ولتاژ.....	۶۷
شکل ۴-۱۶ مقایسه دمای پنل ساده با پنل PVT-TEG.....	۶۸
شکل ۴-۱۷ مقایسه توان پنل PVT-TEG در حالت تئوری و عملی نسبت به تابش.....	۷۰
شکل ۴-۱۸ مقایسه توان پنل PVT-TEG با پنل ساده نسبت به تابش.....	۷۰
شکل ۴-۱۹ بازده پنل در مقایسه با تابش.....	۷۱

- شکل ۴-۲۰ تغییرات توان تولیدی پنل PVT-TEG نسبت به دمای آب ورودی به بلوک خنک‌کننده ۷۱
- شکل ۴-۲۱ توان تولیدی ترموالکتریک نسبت به دمای آب ورودی به بلوک خنک‌کننده ۷۲
- شکل ۵-۱۱ تاثیر تغییرات پوشش دهی با ترموالکتریک بر توان پنل ترکیبی PVT-TEG ۷۵
- شکل ۵-۲ تاثیر تغییرات پوشش دهی با ترموالکتریک بر توان ترموالکتریک ۷۵
- شکل ۵-۳ بازده پنل PVT-TEG نسبت به میزان پوشش دهی ۷۶
- شکل ۵-۴ تاثیر شدت تابش بر توان پنل ساده و PVT-TEG ۷۷
- شکل ۵-۵ تاثیر شدت تابش بر توان تولیدی ترموالکتریک ۷۷
- شکل ۵-۶ تاثیر دمای محیط بر توان پنل ساده و PVT-TEG ۷۸
- شکل ۵-۷ تاثیر دمای محیط بر توان ترموالکتریک ۷۹
- شکل ۵-۸ تاثیر دمای محیط بر بازده سیستم PVT-TEG ۷۹
- شکل ۵-۹ تاثیر سرعت باد بر توان تولیدی پنل ساده و PVT-TEG ۸۰
- شکل ۵-۱۰ تاثیر تغییرات سرعت باد بر توان ترموالکتریک ۸۱
- شکل ۵-۱۱ تاثیر تغییرات دمای آب ورودی بر تولید توان پنل PVT-TEG ۸۱
- شکل ۵-۱۲ تاثیر تغییرات دمای آب ورودی بر توان ترموالکتریک ۸۲
- شکل ۵-۱۳ تاثیر دمای آب ورودی به بلوک خنک‌کننده بر بازده PVT-TEG ۸۲
- شکل ۵-۱۴ تاثیر تغییرات سرعت آب داخل بلوک خنک‌کننده بر توان پنل PVT-TEG ۸۳
- شکل ۵-۱۵ تاثیر تغییرات سرعت آب داخل بلوک خنک‌کننده بر توان ترموالکتریک ۸۴

فهرت جدول‌ها

جدول ۱-۱ جدول خصوصیات پنل های کاربردی [۶].....	۴
جدول ۱-۳ ضخامت هر لایه از پنل فتوولتاییک.....	۴۰
جدول ۲-۳ مقادیر و مشخصات فیزیکی پنل.....	۴۲
جدول ۳-۳ مشخصات پنل در شرایط استاندارد.....	۴۴
جدول ۴-۳ مشخصات بلوک خنک کننده آلومینیومی.....	۵۲
جدول ۱-۴ مقایسه بین داده های تابش تجربی و تئوری.....	۵۵
جدول ۲-۴ مقایسه داده های تئوری و عملی پنل فتوولتاییک.....	۵۶
جدول ۳-۴ ضرایب داخلی ترموالکتریک (دمای سطح گرم °C ۵۰).....	۵۷
جدول ۴-۴ مشخصات فنی اجزا ست آپ نهایی PVT-TEG.....	۶۶
جدول ۵-۴ مقایسه آزمایش های عملی و تئوری PVT-TEG.....	۶۹
جدول ۱-۵ مقادیر ثابت پارامترهای مختلف در تحلیل پارامتری.....	۷۴
جدول ۱-۶ خلاصه نتایج اعتبارسنجی اجزا.....	۸۶
جدول ۲-۶ مقادیر ثابت پارامترهای مختلف در تحلیل پارامتری.....	۸۷

فهرست علائم

نام	علامت	واحد
ضریب سیبک	α	V/K
اختلاف ولتاژ	ΔV	V
اختلاف دما	ΔT	K
ولتاژ مدار باز	V_{oc}	V
جریان اتصال کوتاه	I_{sc}	A
نسبت تمرکز	C	-
پنل فتوولتاییک	PV	-
ترموالکتريک خنک کننده	TEC	-
ترموالکتريک ژنراتور	TEG	-
ردیابی توان حداکثری	MPPT	-
ثابت خورشیدی	G_{sc}	W/m^2
شماره روز سال	n	-
تشعشع دریافتی در n امین روز	G_{on}	W/m^2
زاویه سمت الراس	ϕ	°

عرض جغرافیایی	L	°
زاویه انحراف محور زمین	δ	°
زاویه ساعت	h	°
زمان خورشیدی	AST	min
زمان استاندارد محلی	LST	min
معادله زمان	ET	min
طول جغرافیایی استاندارد	SL	°
طول جغرافیایی محلی	LL	°
صرفه جویی روشنایی روز	DS	-
ضریب هندسی	R_b	-
زاویه پنل نسبت به سطح افق	β	°
ضریب انعکاس	ρ_g	-
ارتفاع از سطح دریای آزاد	A	km
ضخامت شیشه	δ_g	mm
سلول خورشیدی ضخامت	δ_{pv}	mm
ضخامت EVA	δ_{eva}	mm
ضخامت تدلار	δ_{ted}	mm
ضریب جذب شیشه	α_g	-
ضریب عبور شیشه	τ_g	-

-	ϵ_g	ضریب انتشار شیشه
-	A_g/A_t	مساحت کل / شیشه
mm^2	A_{pv}	مساحت سلول
-	n_{cell}	تعداد سلول
-	STC	شرایط استاندارد
%	η_{ref}	بازده سلول @STC
-	α_{pv}	ضریب جذب سلول
-	α_{ted}	ضریب جذب تدلار
K	$T_{pv,ref}$	دمای سلول @STC
$1/K$	γ	ضریب دمای پنل
$W/m.K$	k_g	رسانش گرمایی شیشه
$W/m.K$	k_{pv}	رسانش گرمایی سلول خورشیدی
$W/m.K$	k_{eva}	رسانش گرمایی EVA
$W/m.K$	k_{ted}	رسانش گرمایی تدلار
$W/m^2.K^4$	σ	ثابت استفان-بولتزمن
$W/m^2.K$	h_{rad}	ضریب گرمای تابشی
K	T_a	دمای محیط
	T_{sky}	دمای آسمان

K/W	R_i	مقاومت حرارتی لایه مورد نظر
m/s	u	سرعت باد
-	FF	ضریب پُری
A/K	$\mu_{I_{sc}}$	ضریب دمای جریان اتصال کوتاه
V/K	$\mu_{V_{oc}}$	جریان مدار باز
V	V_m^{ref}	ولتاژ ماکزیمم @STC
A	I_m^{ref}	جریان ماکزیمم @STC
V	I_{sc}^{ref}	جریان اتصال کوتاه @STC
A	V_{oc}^{ref}	ولتاژ مدار باز @STC
W	Q_h	شار حرارتی ورودی به سمت گرم
W	Q_c	شار حرارتی خروجی از سمت سرد
Ω	R_{in}	مقاومت داخلی ترموالکتریک
Ω	R_L	مقاومت بار ترموالکتریک
W	P_{teg}	توان ترموالکتریک ژنراتور
K	T_h	سمت گرم ترموالکتریک
K	T_c	سمت سرد ترموالکتریک
-	β_u	نسبت مساحت سلول به مساحت کل
-	β_b	نسبت مساحت ترموالکتریک به مساحت کل

-	wb	بلوک خنک کننده
K/W	R_{wb}	مقاومت حرارتی سطح بلوک خنک کننده
K/W	R_w	مقاومت حرارتی آب
K	T_m	میانگین دمای آب ورودی و خروجی به بلوک
mm^2	A_w	ابعاد بلوک خنک کننده
mm	D_{tu}	قطر لوله
mm	L_{tu}	طول لوله
-	N_{tu}	تعداد لوله
$W/m.K$	k_w	رسانش گرمایی آب
kg/m^3	ρ_w	چگالی آب
m^2/s	ν_w	ویسکوزیته سینماتیکی آب
$J/(kg.K)$	c_p	ظرفیت گرمایی آب
-	Nu	عدد ناسلت
-	Re	عدد رینولدز
-	Gz	عدد گراتز
-	Pr	عدد پرانتل
-	C_{teg}	پوشش دهی با ترموالکتریک

١- فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه با افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در جهان و با توجه به محدود بودن این منابع انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نقش پررنگی در سبد انرژی جهان، ایفا می‌کند. محدود بودن منابع انرژی فسیلی و مشکلات ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، توجه بیش از پیش به انرژی‌های تجدیدپذیر را بر همگان روشن و ضروری کرده است.

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و روش‌های سازگار با محیط زیست برای تولید برق یکی از اولویت‌های امروز کشورهای توسعه یافته به شمار می‌رود. یکی از فناوری‌های جدید و گسترش یافته در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های فتوولتاییک می‌باشد که برای تبدیل نور خورشید به انرژی الکتریکی استفاده می‌شود [۱].

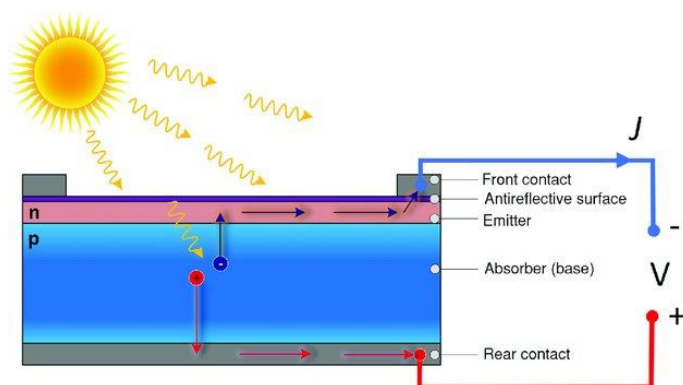
امروزه انرژی خورشیدی دارای بزرگترین قابلیت برای برآوردن نیاز جهان در آینده به عنوان یکی از منابع تجدیدپذیر است، بطوری که تا پایان سال ۲۰۱۸ بیش از ۵۱۰ گیگاوات برق تولیدی جهان توسط فناوری‌های خورشیدی در دو بخش فناوری‌های فتوولتاییک و فناوری‌های حرارتی خورشیدی تامین می‌شود [۲]. لذا استفاده از انرژی‌های خورشیدی به دلایل مختلفی مانند دسترسی آسان و سهولت تبدیل شدن به انرژی الکتریکی، سازگاری با محیط زیست و تجدیدپذیری، از مطلوبیت زیادی برخوردار است.

۱-۲- پیدایش

مهمترین روش تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته استفاده از اثر فتوولتاییک است که برای نخستین بار توسط بکرل^۱ مشاهده گردید. تقریباً اساس کار تمام دستگاه‌های فتوولتاییک استفاده از نیمه هادی p-n است. این سلول‌ها به دو منظور بصورت ماژول‌های چندتایی مونتاژ شده که بصورت

¹ Becquerel

سری به یکدیگر متصل شده‌اند برای استفاده عمومی به بازار ارائه می‌شوند، یکی حفاظت در برابر محیط اطراف و دیگری بالا رفتن تولید ولتاژ نسبت به یک سلول تک می‌باشد [۳]. در شکل (۱-۱) سطح مقطع یک سلول فتوولتاییک مشاهده می‌شود [۴].



شکل ۱-۱ سطح مقطع یک سلول فتوولتاییک [۴]

۳-۱- تقسیم‌بندی پنل‌های فتوولتاییک

تحقیقات گسترده‌ای روی تکنولوژی مواد پنل‌های فتوولتاییک جهت افزایش بازده صورت گرفته است. آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر^۱ (NREL) طی چهل سال گذشته از سال ۱۹۷۶ تاکنون پنل‌های فتوولتاییک را به پنج گروه زیر تقسیم نموده است [۵]:

۱. سلول‌های چند منظوره^۲

۲. سلول‌های آرسنید گالیوم تک اتصالی^۳

۳. سلول‌های سیلیکون کریستال

۴. فناوری‌های فیلم نازک^۴

۵. فتوولتاییک نوظهور

^۱ National Renewable Energy Laboratory

^۲ Multi Junction

^۳ Single-Junction GaAs

^۴ Thin Film

در جدول (۱-۱) خلاصه خصوصیات سه مدل پنل کاربردی آورده شده است.

جدول ۱-۱ جدول خصوصیات پنل های کاربردی [۶]

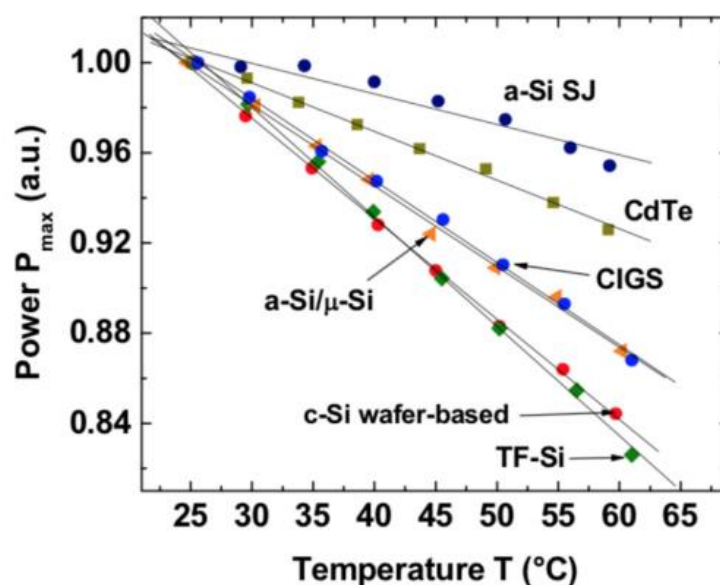
نوع پنل	جنس	بازده	قیمت	ظاهر
مونوکریستال	کریستال سیلیکون خالص	بالا (۱۸ درصد یا بالاتر)	بسیار گران قیمت	آبی سیاه یا سیاه با گوشه های گرد
پلی کریستال	قطعات سیلیکون	متوسط (۱۵ تا ۱۷ درصد)	گران قیمت	مستطیلی آبی رنگ
فیلم نازک	متفاوت	پایین (۱۱ تا ۱۵ درصد)	پایین	سطح آبی

۴-۱- تاثیر دمای سلول بر بازده

تکنولوژی مواد در ساخت سلول های خورشیدی نقش مهمی را ایفا می کنند ولیکن از لحاظ فنی نیز راه حل هایی وجود دارد که این بازده افزایش یابد. سلول های فتوولتائیک بخش کمی از انرژی تابشی خورشید جذب شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند و بخش زیادی از آن به انرژی حرارتی تبدیل می شود که باعث بالا رفتن دمای سلول ها می گردد.

سلول های فتوولتائیک مهمترین قسمت سیستم های فتوولتائیک هستند و بازده این سیستم ها با افزایش دمای سلول ها کاهش می یابد. بنابراین برای بهبود کارایی و بازده این سیستم ها باید دمای سلول های فتوولتائیک را تا حد امکان کاهش داد [۷]. همانگونه که در شکل (۱-۲) مشاهده می شود با افزایش دما بازده انواع مختلف سلول ها کاهش می یابد.

در این شکل تاثیر دما بر ۶ نوع سلول از جنس‌های مختلف ($a\text{-Si SJ}^1$, CdTe^2 , CIGS^3 , $a\text{-Si}/\mu\text{-Si}$, c-Si wafer-based , TF-Si^4) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نوع c-Si که همان کریستال سیلیکونی یا جنس غالب در استفاده از نسل اول سلول‌های خورشیدی است شیب تغییرات بیشتری نسبت به دما دارد. این مطلب نشان دهنده اهمیت خنک‌کاری سلول‌های خورشیدی در محصولات تولیدی کنونی در جهان است.



شکل ۱-۲ تاثیر دما بر توان تولیدی انواع پنل [۸]

۵-۱- روش‌های خنک‌کاری

برای خنک‌کاری پنل‌های فتوولتایک روش‌هایی مانند اسپری کردن آب روی پنل، استفاده از سیال‌هایی مانند آب در گردش پشت پنل، استفاده از جابجایی طبیعی و اجباری هوا، مواد تغییر فاز دهنده، نانوسیال‌ها، غوطه‌وری در آب، استفاده از ترموالکتریک و... پیشنهاد و گاهی اجرا شده است [۹]. در ادامه به اختصار چند مورد از روش‌های خنک‌کاری متداول بررسی می‌شود.

¹ Single Junction Amorphous Silicon

² Cadmium Telluride

³ Copper Indium Gallium Selenide

⁴ Tandem Micromorph

۱-۵-۱- اسپری کردن آب

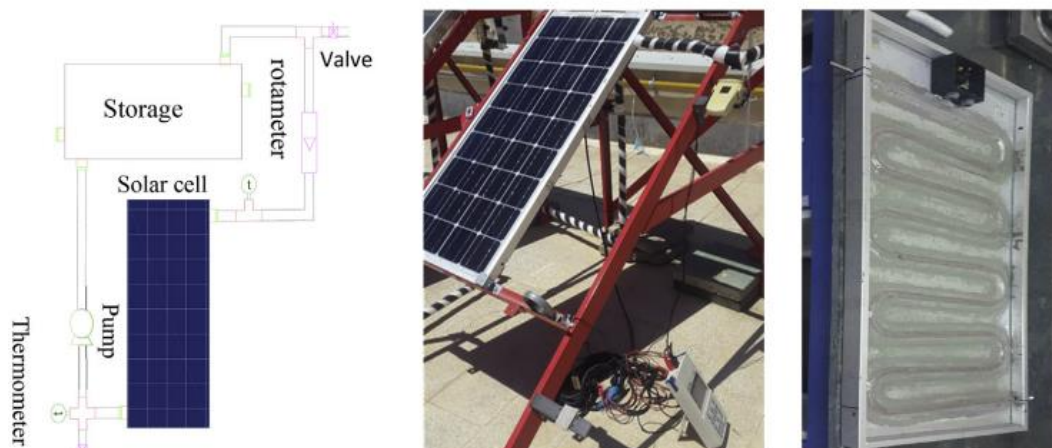
اسپری کردن آب روی پنل مرسوم‌ترین روش خنک‌کاری است که می‌تواند دمای سطح را تا حد چشم‌گیری کاهش دهد و در حالت اوج تابش بازده آن را حدود ۱۴ درصد افزایش دهد. مزیت اصلی این روش تاثیر خود پاک‌کنندگی سطح پنل می‌باشد [۱۰]. در شکل (۱-۳) یک نمونه از اسپری آب روی سطح پنل آورده شده است ولیکن با توجه به مصرف بالای آب برای خنک‌کاری و هدر رفت آب بعد از خنک‌کاری و کمبود شدید منابع آب بخصوص در ایران استفاده از این روش توصیه نمی‌شود.



شکل ۱-۳ اسپری آب روی سطح پنل [۱۰]

۱-۵-۲- سیال در گردش پشت پنل

با ایجاد تغییراتی در پشت پنل امکان عبور سیالی مانند آب از آن را فراهم نموده و علاوه بر خنک‌کاری پنل و افزایش بازده الکتریکی آن می‌توان از حرارت جذب شده توسط سیال نیز استفاده نمود. همانگونه که در شکل (۱-۴) مشاهده می‌شود کیانفرد و همکاران با مدل‌سازی، طراحی و ساخت یک سیستم خنک‌کننده جدید با استفاده از نیم لوله، تا ۷۰ درصد بازده حرارتی و ۱۱/۵ درصد بازده الکتریکی دست یافتند که در مقایسه با پنل مشابه بدون خنک‌کاری بازده حرارتی ۱۰ تا ۱۳ درصد و بازده الکتریکی ۰/۴ تا ۰/۶ درصد بیشتر می‌باشد [۱۱].



شکل ۱-۴ (الف) شماتیک (ب) سیستم طراحی شده (ج) پشت پنل

۱-۵-۳- جابجایی طبیعی و اجباری هوا

در این روش خنک‌کاری، همانگونه که در شکل (۱-۵) مشاهده می‌شود پشت پنل کانال‌هایی تعبیه می‌شود تا بتواند جریان طبیعی هوا را از خود عبور دهد و علاوه بر کاهش دمای پنل باعث پیش گرم شدن هوای عبوری شود و در صورتی که ساختمانی که پنل روی آن نصب شده است بر این اساس طراحی شده باشد می‌توان از این هوای گرم برای گرمایش فضای داخلی ساختمان استفاده نمود [۱۲].



شکل ۱-۵ خنک‌کاری با جابجایی طبیعی هوا [۱۳]

در جابجایی اجباری هوا مطابق شکل (۱-۶) پنل بروی محفظه‌ای قرار دارد که کانال‌هایی برای عبور جریان اجباری هوا از پشت پنل توسط فن تعبیه شده است که نسبت به جابجایی طبیعی اثر

بیشتری بر خنک‌کاری پنل خواهد داشت [۱۴]. اما به دلیل اضافه شدن مصرف فن و نیز پایین بودن رسانش گرمایی هوا استفاده از این روش تاثیر بسزایی در بالا بردن بازده پنل ندارد.

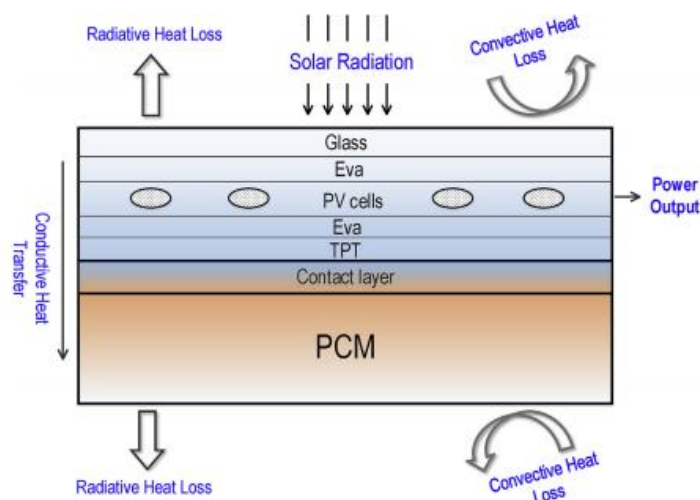


شکل ۱-۶ خنک‌کاری پنل با جریان اجباری هوا [۱۴]

۱-۵-۴- مواد تغییر فاز دهنده^۱

روش دیگری که برای خنک‌کاری پنل‌های فتوولتائیک استفاده می‌شود استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) است. این روش برای دمای عملیاتی بالا در پنل‌های خورشیدی کاربرد دارد، و در آن مواد تغییر فاز دهنده حرارت را از پنل گرفته و از طریق مبدل حرارتی به یک دستگاه کوپل شده با پنل خورشیدی منتقل می‌کند. در شکل (۷-۱) شماتیک یک سیستم PV-PCM به همراه مسیر عبور انرژی مشاهده می‌شود [۱۵].

¹ Phase Change Material



شکل ۷-۱ پیکربندی یک سیستم PV-PCM و مسیر عبور انرژی [۱۵]

۱-۵-۵- غوطه‌وری در آب

همانگونه که در شکل (۸-۱) مشاهده می‌شود یکی دیگر از روش‌های ابداعی برای کاهش دمای سطح پنل غوطه‌ور کردن آن در آب است. در این روش کل پنل در عمق مشخصی از آب قرار داده می‌شود [۱۶]. و معمولاً در جایی که حجم زیادی از آب مانند رودخانه و دریا وجود دارد کاربرد خواهد داشت. از معایب اصلی این روش می‌توان شکست نور در آب، یونیزه شدن آب، تاثیر عمق در تولید توان پنل اشاره نمود که استفاده از این روش را بصورت عمومی گسترش نداده است.



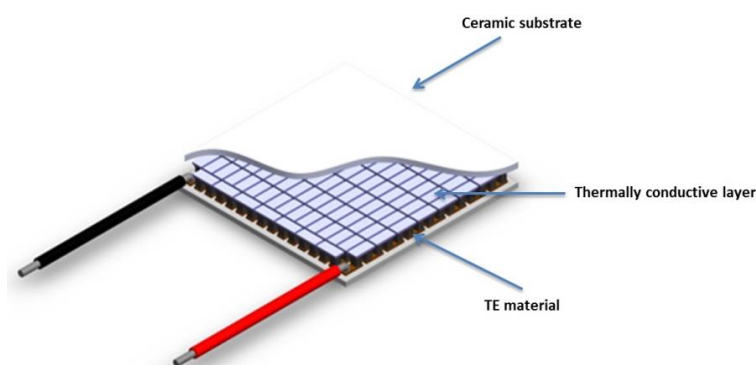
شکل ۸-۱ غوطه‌ور کردن پنل در آب [۱۶]

۵-۶- استفاده از ترموالکتریک

ماژول‌های ترموالکتریک می‌توانند جریان الکتریکی را به اختلاف دما در دو سطح خود تبدیل نمایند و استفاده از آن‌ها برای خنک‌کاری و همچنین افزایش توان الکتریکی پنل‌های فتوولتاییک رو به افزایش می‌باشد. در تحقیقات مختلفی روش‌های نوین ترکیب آن‌ها با پنل‌های فتوولتاییک بصورت نظری و عملی مورد بررسی قرار گرفته است [۱۷]. گزارش‌های مختلف ارایه شده نتایج مختلفی را از کاربرد این روش نشان داده است. لذا در این پایان نامه بررسی جامعی به صورت عملی و نظری بر روی کاربرد این فناوری بر روی پنل‌های فتوولتاییک صورت خواهد گرفت. لذا در ادامه معرفی مختصری از نحوه عملکرد ترموالکتریک‌ها ارایه شده و سپس در فصل دوم پژوهش‌های پیشین در این زمینه بررسی خواهد شد.

۵-۶-۱- معرفی فناوری ترموالکتریک

ترموالکتریک‌ها دستگاه‌های حالت جامد هستند. آنها مبدل‌های قابل اطمینان انرژی بوده و از آنجا که هیچ قسمت متحرک مکانیکی در آن‌ها وجود ندارد هیچ سر و صدا و لرزشی ندارند. اندازه آن‌ها کوچک است و وزن کمی دارند. این قطعات به عنوان یک خنک کننده، دوست‌دار محیط زیست هستند زیرا از گاز CFC یا هر نوع گاز مبرد دیگر در آن استفاده نمی‌شود [۱۸]. در شکل (۹-۱) شماتیک یک ترموالکتریک مشاهده می‌شود [۱۹].



شکل ۹-۱ شماتیک برش خورده یک ترموالکتریک [۱۹]

از نظر فناوری، ماژول ترموالکتریک یک دستگاه دو جهته است که به دو روش کار می‌کند:

۱. به عنوان یک ژنراتور^۱ (TEG) هنگامی که دو سمت ماژول تحت گرادیان دما باشد با بهره

گیری از اثر سیبک^۲، ولتاژ خروجی با جریان مستقیم (DC) ایجاد می‌کند [۲۰].

۲. به عنوان یک خنک کننده^۳ (TEC)، هنگامی که ماژول به یک منبع تغذیه DC متصل می‌شود

با بهره برداری از اثر پلتیر^۴، اختلاف دما بین دو طرف گرم و سرد آن ایجاد می‌شود [۱۸].

به تولید ولتاژ الکتریکی با قرار دادن یک نیمه‌هادی در یک گرادیان دما، اثر سیبک گفته می‌شود و

با نماد α نشان داده می‌شود، و همانگونه که در معادله (۱-۱) مشاهده می‌شود به عنوان نسبت ولتاژ

الکتریکی تولید شده به اختلاف دما تعریف می‌شود [۲۱].

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad 1-1$$

به مقدار گرمایی که هنگام عبور جریان از یک سمت به سمت دیگر ماده توسط جریان الکتریکی

حمل می‌شود، اثر پلتیر گفته می‌شود و با نماد Π نشان داده می‌شود، و همانگونه که در معادله (۲-۱)

مشاهده می‌شود به عنوان نسبت گرمای عبوری به جریان تعریف می‌شود [۲۲].

$$\Pi = \frac{Q}{I} \quad 2-1$$

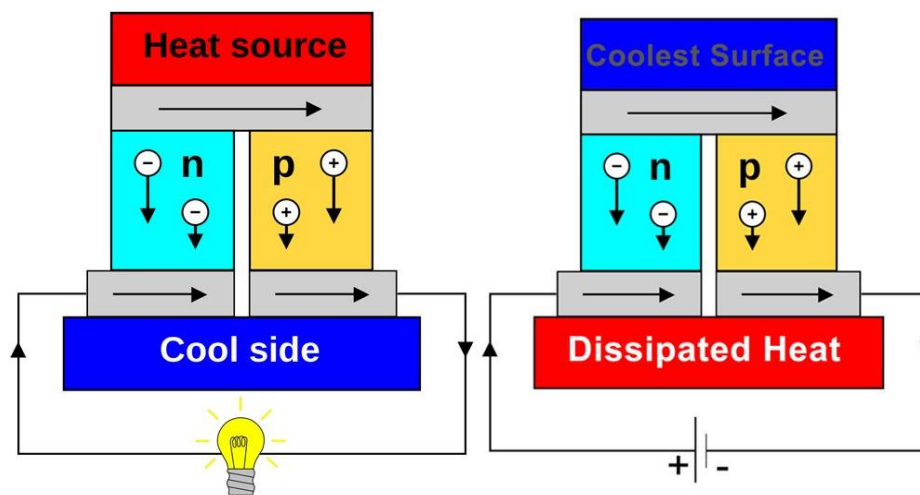
در شکل (۱-۱۰) اثر سیبک و پلتیر قابل مشاهده است [۲۳].

¹ Thermoelectric Generator

² Seebeck

³ Thermoelectric Cooler

⁴ Peltier



شکل ۱-۱۰ مقایسه اثر سبیک و پلتیر [۲۳]

از مزایای اصلی یک خنک‌کننده پلتیر می‌توان به عدم حرکت قطعات آن یا مایع در گردش، عمر طولانی، آسیب ناپذیری به نشت، اندازه کوچک و شکل انعطاف‌پذیر آن اشاره کرد. بنابراین به‌طور خلاصه خنک‌کننده ترموالکتریک (TEC) از اثر پلتیر برای ایجاد یک شار حرارتی بین محل اتصال دو نوع مختلف از مواد استفاده می‌کند و ژنراتور ترموالکتریک (TEG) یک روش مستقیم با استفاده از اثر سبیک برای تولید برق از گرماست [۲۴].

۱-۵-۶-۲ انواع ترموالکتریک و کاربرد آن‌ها

امروزه با گسترش روزافزون بکارگیری ترموالکتریک‌ها و برای کاربردهای مختلف، انواع متنوعی از آن طراحی و ساخته می‌شود. در ادامه توضیح مختصری در خصوص هر کدام از آن‌ها داده می‌شود.

۱. ترموالکتریک مینیاتوری^۱: سری مینیاتوری که در شکل (۱-۱۱) مشاهده می‌گردد، برای موارد مختلف خنک‌کنندگی و گرمایش که فقط مقدار کمی گرما در آن نقش دارد مناسب است. محدوده‌ی کاربرد آن شامل خنک‌کننده دیود لیزر، سیستم‌های مادون قرمز، الکترواپتیک و تجهیزات الکترونیکی و سایر تجهیزات با توان پایین است [۲۵].

¹ Miniature Modules



شکل ۱-۱۱ ترموالکتریک مینیاتوری [۲۵]

۲. ترموالکتریک تک مرحله‌ای^۱: سری تک مرحله‌ای که در شکل (۱-۱۲) مشاهده می‌گردد، برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای مختلف سرمایش و گرمایش که به ظرفیت پمپاژ متوسط یا زیاد نیاز دارند، مناسب است. محدوده‌ی کاربرد آن شامل ابزارهای پزشکی، محصولات مصرفی، تجهیزات صنعتی و الکتریکی و همچنین ابزارهای آزمایشگاهی و علمی است [۲۵].



شکل ۱-۱۲ ترموالکتریک تک مرحله‌ای [۲۵]

۳. ترموالکتریک چند مرحله‌ای^۲: سری چند مرحله‌ای که در شکل (۱-۱۳) مشاهده می‌گردد، بر مبنای تامین اختلاف دمای بالا (ΔT) طراحی شده است. این سری برای کاربردهای دمای پایین که به یک ظرفیت خنک‌کننده کوچک یا متوسط نیاز است مناسب هستند. محدوده‌ی کاربرد آن شامل آشکارسازهای مادون قرمز، شیفت رجیستر آنالوگ^۳ (CCD) و الکترواپتیک است [۲۵].

¹ Single-Stage Modules

² Multi-Stage Modules

³ Charge-coupled Device



شکل ۱-۱۳ ترموالکتریک چند مرحله ای

۴. ترموالکتریک با سوراخ مرکزی^۱: این سری که در شکل (۱-۱۴) مشاهده می‌گردد، برای کاربردهای مختلف خنک‌کننده و گرمایشی که معمولاً به ظرفیت پمپاژ متوسط نیاز دارند مناسب است. محدوده‌ی کاربرد آن شامل تجهیزات صنعتی و الکتریکی و همچنین آزمایشگاه است [۲۵].



شکل ۱-۱۴ ترموالکتریک با سوراخ مرکزی [۲۵]

۱-۵-۳- تجهیزات مورد نیاز استفاده از TEC

تجهیزات جانبی مورد نیاز برای استفاده از TEC می‌توان به منبع تغذیه (DC) ۱۲ ولت جهت تامین توان، هیت سینک فن‌دار جهت دفع حرارت و خمیر سیلیکون جهت افزایش انتقال حرارت از

¹ Center-Hole Modules

سطح ترموالکتریک به هیت سینک اشاره نمود که در شکل (۱-۱۵) مشاهده می شود.



شکل ۱-۱۵ تجهیزات جانبی مورد نیاز

۱-۶- جمع بندی

در این فصل به معرفی کلی موضوع خنک کاری سلول های خورشیدی و اهمیت آن پرداخته شد و سپس روش های مختلف در خنک کاری معرفی گردید. خنک کاری پنل های فتوولتایک با ترموالکتریک موضوع این پژوهش می باشد و لذا فناوری ترموالکتریک نیز به اختصار معرفی گردید. در فصل آینده پیشینه موضوع مورد بررسی قرار گرفته و معرفی دقیق تری از پژوهش حاضر ارائه خواهد شد.

۲- فصل دوم

مروری بر پژوهش‌های پیشین

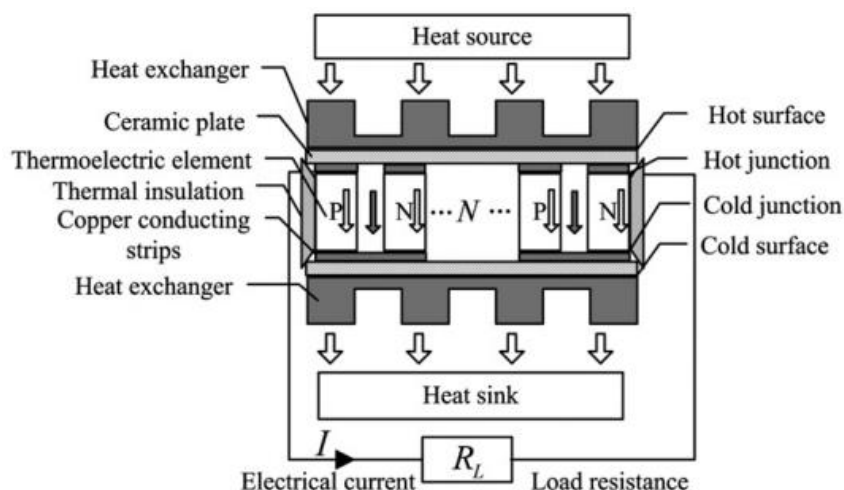
۲-۱- مقدمه

همانطور که در فصل اول اشاره گردید، خنک کردن پنل‌های فتوولتاییک عامل مهمی در بالا بردن بازده الکتریکی، کاهش میزان تخریب سلول‌های خورشیدی و به حداکثر رساندن طول عمر این پنل‌ها می‌باشد [۲۶]. همچنین بیان گردید که یکی از روش‌هایی که امروزه برای خنک‌کاری پنل‌های فتوولتاییک بسیار مورد توجه قرار گرفته است استفاده ترکیبی از ترموالکتریک با پنل می‌باشد. در این فصل پیشینه این فناوری و استفاده از آن در پنل‌های فتوولتاییک مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

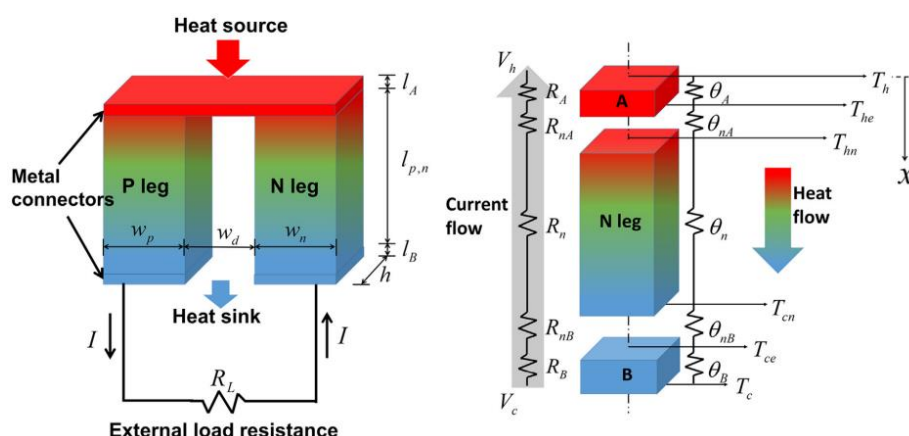
در ابتدا جهت آشنایی با عملکرد ترموالکتریک‌ها در تولید الکتریسیته و یا حرارت و سرمایش مروری بر چند مطالعه مرتبط انجام می‌شود و سپس پژوهش‌های مرتبط با استفاده از ترموالکتریک در پنل‌های فتوولتاییک معرفی می‌گردد.

مینگ و همکاران [۲۷] در تحقیقی مدل‌سازی عددی یک TEG با ۱۲۷ کوپل را انجام داده و به بررسی تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل ابعاد هندسی، خواص فیزیکی، دما و جریان سیال پرداختند. در این تحقیق آب به عنوان سیال مورد استفاده قرار گرفت که دمای سطح داغ بین ۶۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد و دمای سطح سرد در محدوده دمای اتاق قرار داشت. نتایج نشان داد که حداکثر توان خروجی ژنراتور ترموالکتریک مدل شده ۰/۱۳ وات و حداکثر بازده ۰/۸۷ درصد است. ولتاژ مدار باز (V_{oc}) ۱/۸۰ ولت و جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) ۰/۲۸ آمپر است. و بین اختلاف دمای دو سطح، ولتاژ و جریان خروجی رابطه‌ای خطی برقرار است و نتایجی را برای امکان‌سنجی و کارایی آن با استفاده از مصرف انرژی کم یا گرمای اتلافی ارایه دادند. در شکل (۱-۲) شماتیک ارائه شده توسط مینگ و همکاران مشاهده می‌شود.



شکل ۱-۲ شماتیک ارائه شده توسط منگ و همکاران [۲۷]

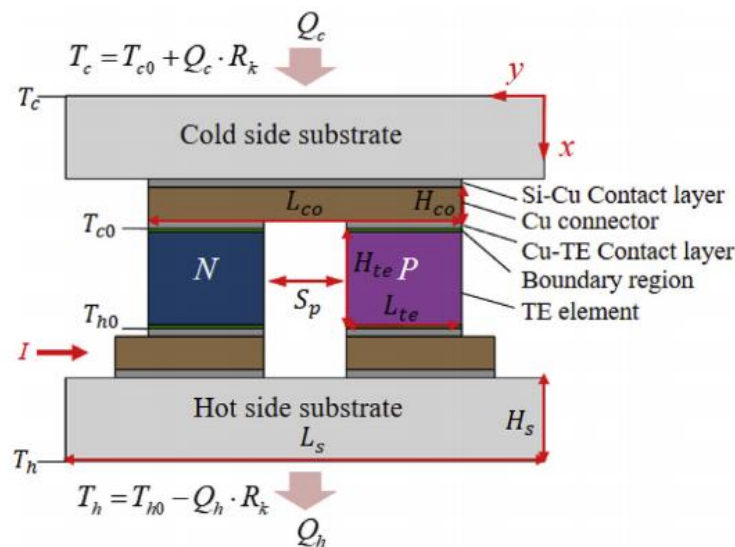
وانگ و همکاران [۲۸] در پژوهشی به بررسی مجدد ایرادات موجود در مدل ریاضی ترموالکتریک ژنراتور (TEG) پرداخته و یک مدل تحلیلی برای ارزیابی عملکرد آن ارائه نمودند. این مدل مقاومت در برابر تماس^۱ بین پایه ترموالکتریک و الکتروود و خصوصیات وابسته به دمای ماده ترموالکتریک را در نظر می‌گیرد. آنها از طریق مدل تحلیلی، برای محاسبه مشخصات دمای پایه، بازده تبدیل انرژی و توان خروجی برای یک جفت ترموکوپل، عبارات ساده‌ای ارائه دادند که در شکل (۲-۲) شماتیک مدل آنها مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۲ شماتیک ارائه شده در پژوهش وانگ و همکاران [۲۸]

¹ Contact Resistance

سان و همکاران [۲۹] تاثیر اندازه، خصوصیات سطح و ضریب تامسون را در مدل عددی یک ترموالکتریک خنک‌کننده مینیاتوری بر عملکرد خنک‌کنندگی آن در شرایط دمایی و بار سرمایشی مختلف بررسی نمودند. و نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ضریب تامسون مثبت می‌تواند ظرفیت سرمایشی آن را ارتقا داده و جریان الکتریکی و ضخامت بالاتر متناظر با افزایش تاثیر ضریب تامسون است. در شکل (۳-۲) شماتیک یک ترموالکتریک مینیاتوری مشاهده می‌گردد.



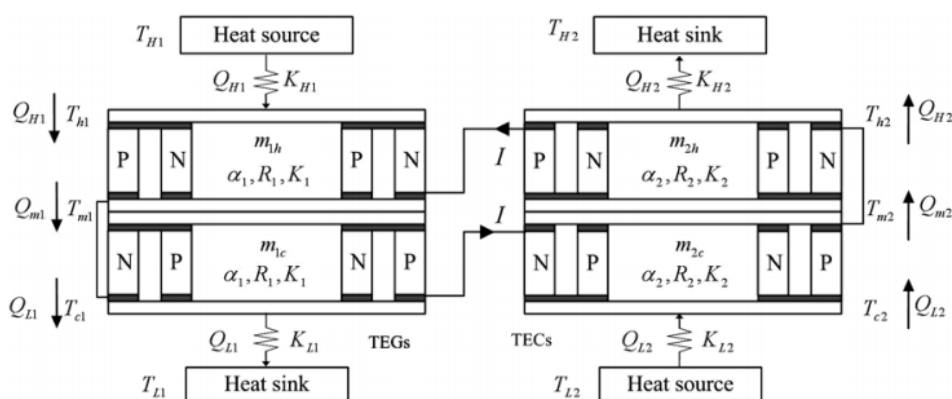
شکل ۳-۲ شماتیک ترموالکتریک خنک‌کننده مینیاتوری [۲۹]

مینگ و همکاران [۳۰] با استفاده از قانون انتقال حرارت نیوتن، مدل عددی یک ترموالکتریک خنک‌کننده دو مرحله‌ای^۱ را که جریان الکتریکی آن توسط یک ترموالکتریک ژنراتور دو مرحله‌ای^۲ تامین شود را بررسی نمودند. چند ترکیب مختلف از المان خنک‌کننده (TEC) را با استفاده از المان ژنراتور (TEG) مورد آزمایش قرار دادند و نتایج بدست آمده از این ترکیب‌ها را بر ضریب عملکرد و تولید توان با یکدیگر مقایسه نمودند که نتایج این بررسی نشان می‌دهد که به طور جزئی، دو مرحله‌ای برای دستیابی به عملکرد بالا به ترموکوپل بیشتری نسبت به TEC دو مرحله‌ای نیاز دارد.

¹ Two-Stage TEC

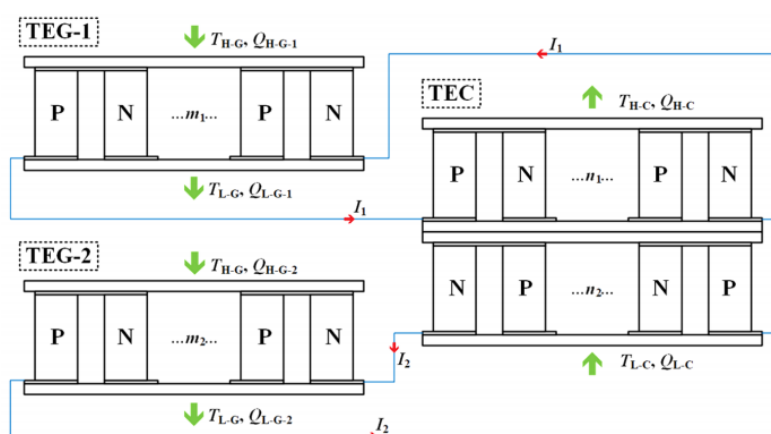
² Two-Stage TEG

شکل (۴-۲) شماتیک مدل بررسی شده توسط منگ و همکاران می‌باشد [۳۰].



شکل ۴-۲ شماتیک دیاگرام سیستم دومرحله ای TEC/TEG [۳۰]

لین و همکاران [۳۱] در یک بررسی عددی طرحی جدید از ترکیب ترموالکتریک‌های خنک‌کننده و ژنراتور (TEC-TEG) ارائه دادند که در آن دو ژنراتور (TEG) تک مرحله‌ای بصورت مجزا در دو طرف سطح سرد و گرم ترموالکتریک خنک‌کننده دو مرحله‌ای (TEC) قرار داشتند که مزیت اصلی آن در جریان الکتریکی جداگانه آن نهفته است. شکل (۵-۲) شماتیک ارائه شده در پژوهش آن‌ها می‌باشد.



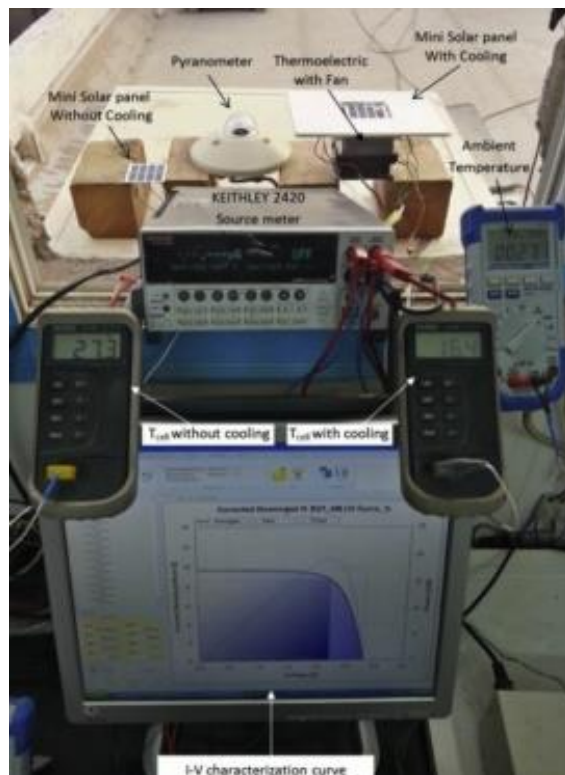
شکل ۵-۲ شماتیک طراحی جدید لین و همکاران [۳۱]

مانیکندان و همکاران [۳۲] با استفاده از تکنیک ردیابی توان حداکثری (MPPT)^۱ و شبیه سازی در

^۱ Maximum Power Point Tracking

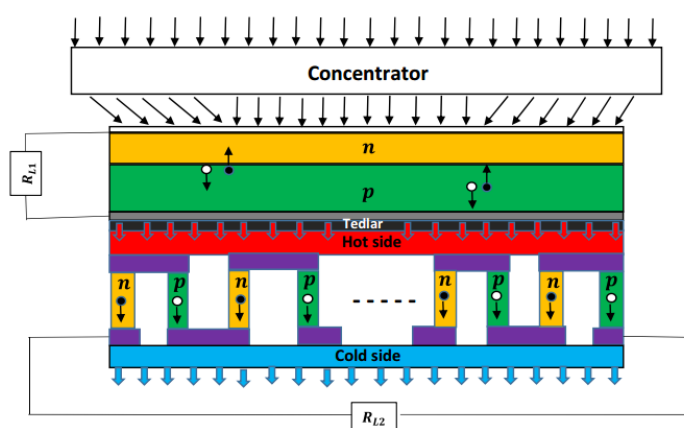
MATLAB اثر دمایی منبع ترموالکتریک TEG و TEC و اثر محدوده‌ی انتقال حرارت را در توان خنک‌کاری و بازده عملکرد ترکیبی این سیستم بررسی نمودند. مطالعات این شبیه‌سازی نشان می‌دهد استفاده از تکنیک (MPPT) بازده کلی سیستم، توان خنک‌کاری TEC و توان خروجی از TEG در سیستم ترکیبی در مقایسه با زمانی که از این تکنیک استفاده نمی‌شود افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت.

بن قانم و همکاران [۳۳] به بررسی تجربی اثر دما بر پنل فتوولتاییک در شهر مدینه پرداختند و با چسباندن یک TEC در پشت یک سلول فتوولتاییک مشاهده نمودند بازده سلول ۰/۵ درصد به ازای هر درجه سانتیگراد کاهش دما افزایش می‌یابد و سیستم ترکیبی پیشنهادی آن‌ها در سایت‌های گرم عملکرد خوبی دارد در حالی‌که هزینه‌ی اضافی حدود ۶٪ از کل هزینه‌ی سیستم فتوولتاییک است. شکل (۶-۲) دستگاه آزمایش شده توسط بن قانم و همکاران مشاهده می‌شود.



۶-۲ دستگاه آزمایش بن قانم و همکاران [۳۳]

لامبا و همکاران [۳۴] نیز در نرم افزار MATLAB ترکیب متمرکزکننده فتوولتاییک و TEG (CPV_TEG) را مدل‌سازی کرده و تاثیر نسبت تمرکز، تعداد ترموالکتریک، میزان شدت تابش، جریان پنل فتوولتاییک و TEG بر توان خروجی و بازده را بررسی نمودند. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با در نظر گرفتن اثر تامسون در ماژول TEG، میزان خروجی سیستم‌های PV، TE و سیستم‌های ترکیبی PV-TEG کاهش می‌یابد و در نسبت تمرکز^۱ $C = 1$ و $C = 5$ ، خروجی سیستم ترکیبی را به ترتیب ۰/۷ درصد و ۴/۷۸ درصد کاهش می‌دهد. و نسبت تمرکز و شدت تابش بهینه را که در آن بازده حداکثر می‌شود را گزارش دادند. شکل (۷-۲) شماتیک مدل ارائه شده در مدل‌سازی لامبا و همکاران می‌باشد.



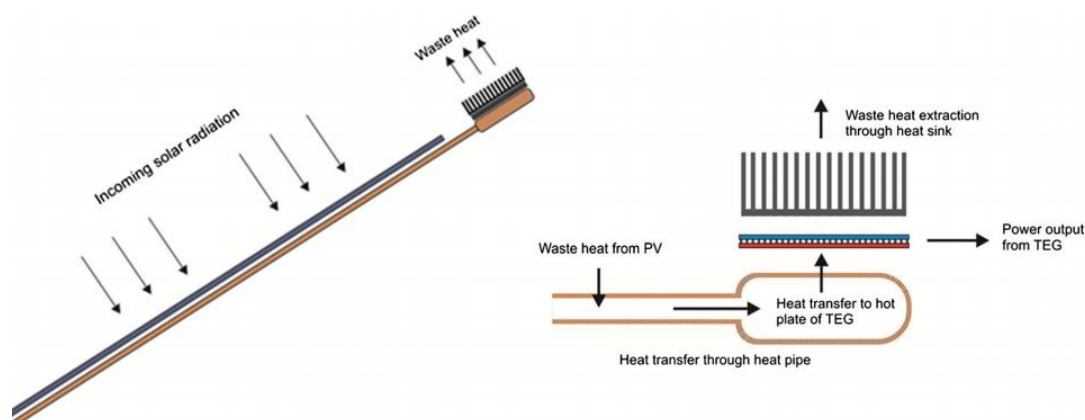
شکل ۷-۲ شماتیک ارائه شده در مدل لامبا و همکاران [۳۴]

ماکی و همکاران [۳۵] به بررسی عددی یک سیستم ترکیبی فتوولتاییک-ترموالکتریک ژنراتور مبتنی بر لوله حرارتی^۲ (HP-PV/TEG) پرداختند. در این پژوهش در پشت پنل به منظور هدایت حرارت دفع شده از پنل به سمت ترموالکتریک ژنراتور یک لوله حرارتی قرار داده شد و مشاهده گردید ادغام ماژول‌های TEG با سلول‌های PV به این ترتیب علاوه بر استفاده از حرارت هدر رفته، به بهبود عملکرد سلول‌های PV کمک می‌کند و منجر به افزایش توان خروجی می‌شود. در شکل (۸-۲)

¹ Concentrated Ratio

² Heat Pipe

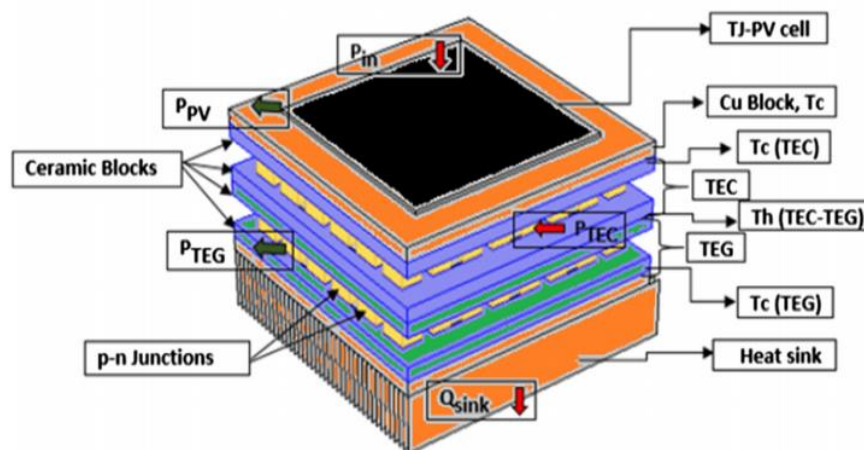
شماتیک مدل ارائه شده توسط ماکي و همکاران مشاهده می‌شود. [۳۵]



شکل ۸-۲ شماتیک ارائه شده توسط ماکي و همکاران [۳۵]

تفاح و همکاران [۳۶] به مدل‌سازی و بررسی عددی ترکیب جدید پنل فتوولتاییک با سه نقطه اتصال^۱ (TJSC) با نسبت تمرکز بالا (۳۰۰ تا ۱۰۰۰) و ترموالکتریک های TEC و TEG که بصورت سری بهم متصل شده بودند پرداختند و با بررسی پارامترهای مختلف مانند شدت تابش و نسبت تمرکز اثرات آن بر بازده و توان خروجی این ترکیب جدید را بررسی نمودند. مشاهده گردید در نسبت تمرکز ۳۰۰ و ۱۰۰۰ ترموالکتریک خنک‌کننده دمای پنل را به ترتیب از ۳۶۸/۲ کلوین به حدود ۳۲۲/۶ کلوین و از ۵۲۹ کلوین به حدود ۴۰۳ کلوین کاهش داد و مجموع تولید توان پنل فتوولتاییک به ترتیب به ۱ وات و ۳ وات افزایش یافت. در شکل (۹-۲) شماتیک ارائه شده در تحقیق آقای تفاح و همکاران که در نرم افزار COMSOL مدل شده است، مشاهده می‌شود [۳۶].

¹ Triple-Junction Solar Cell

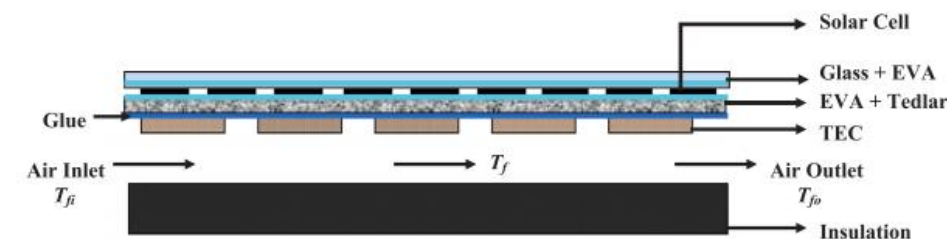


شکل ۹-۲ شماتیک اتصال سری پنل با TEC و TEG [۳۶]

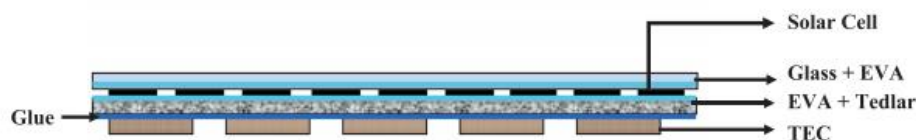
کین و همکاران [۳۷] به بررسی عددی تاثیر دما بر عملکرد TEC مبتنی بر ردیابی توان حداکثری (MPPT) در ترکیب با پنل فتوولتاییک پرداختند و نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد بکارگیری این سیستم در شرایط آب‌وهوایی گرم که دمای محیط بالایی دارند توجیه‌پذیر است.

دیمری و همکاران [۳۸] مدل‌سازی و ساخت تجربی ترکیب یک کلکتور خوشیدی بر پایه پنل فتوولتاییک مات^۱ و ماژول خنک‌کننده TEC بدون فاصله هوایی و با فاصله هوایی را انجام دادند و آن را برای دو حالت بخشی پوشش داده شده توسط ترموالکتریک (مورد a) و پوشش کامل توسط ترموالکتریک (مورد b) و اثر ناشی از آن بر افزایش انرژی الکتریکی، انرژی حرارتی و انرژی کلی سیستم را بررسی نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که بازده الکتریکی در مورد b بین ۴/۴۶ تا ۶/۲۳ درصد نسبت به مورد a بالاتر است. علاوه بر آن در ترکیب بدون فاصله هوایی تنها تولید توان الکتریکی دارد ولیکن با فاصله هوایی علاوه بر تولید توان الکتریکی انرژی حرارتی نیز تولید می‌شود. در شکل (۲-۱۰) و (۲-۱۱) به ترتیب شماتیک مدل بررسی شده و سیستم طراحی شده توسط دیمری و همکاران مشاهده می‌شود [۳۸].

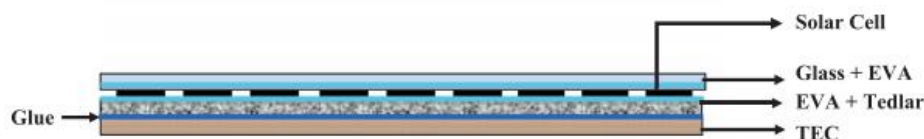
¹ Opaque Photovoltaic



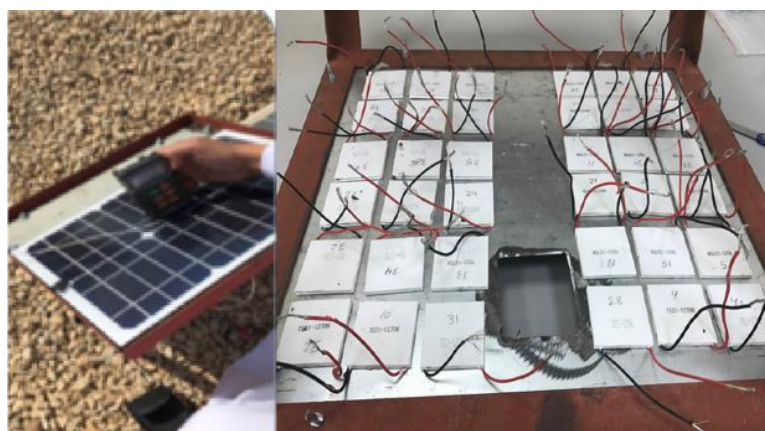
(a) opaque PV-TEC collector with air duct ($\dot{m}_f > 0$; $T_f > T_a$)



(b) opaque PV-TEC collector partially covered with TEC without air duct
($\beta_{tec} = 0.4324$; $\dot{m}_f \approx 0$; $T_f = T_a$) [case (a)]



شکل ۱۰-۲ شماتیک مدل بررسی شده دیمیری و همکاران [۳۸]

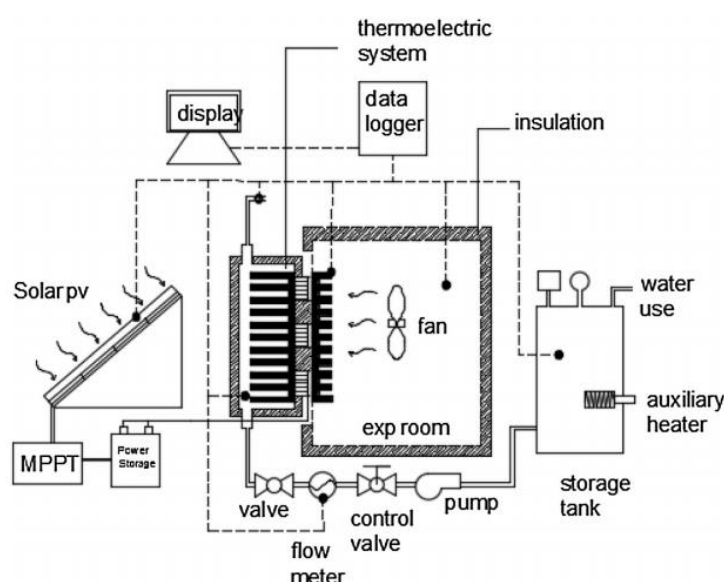


شکل ۱۱-۲ سیستم طراحی شده توسط دیمیری و همکاران [۳۸]

دقیق و همکاران [۳۹] به بررسی تئوری و تجربی سیستم‌های سرمایشی/گرمایشی با ترکیب ترموالکتریک و کلکتور خورشیدی در سنج‌پرداختند. سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک به عنوان یک سیستم کمکی برای جلوگیری از مصرف زیاد انرژی اولیه توسط سیستم تبرید تراکمی از ساعت ۱۱:۰۰ تا ۱۲:۱۲ و افزایش ضریب عملکرد آن از ۱۲:۰۰ تا ۱۸:۰۰ مورد آزمایش قرار گرفت به این

ترتیب که ابتدا سیستم خنک‌کننده ترموالکتریک وارد مدار شده و دما را تا حد معینی کاهش می‌دهد و سپس سیستم تبرید تراکمی دما را تا حد تعیین شده نهایی کاهش می‌دهد.

در بازه زمانی اول مجموع انرژی مصرفی ترموالکتریک ۵۶/۴۶۵ کیلوژول و انرژی تولیدی پنل فتوولتائیک ۳۶۱/۴۰۶ کیلوژول بود و حداقل دمای محفظه خنک‌کننده و حداکثر دمای آب خروجی سیستم ترموالکتریک در بازه‌ی زمان ابتدایی به ترتیب ۱۲ و ۴۵ درجه سانتیگراد بود. در شکل (۲-۱۲) شماتیک سیستم طراحی شده توسط دقیق و همکاران قابل مشاهده است.



شکل ۲-۱۲ شماتیک سیستم طراحی شده توسط دقیق و همکاران

نتایج این تحقیق نشان داد که مدت زمان فعالیت، مصرف انرژی و ضریب عملکرد^۱ (COP) سیستم تبرید تراکمی به تنهایی به ترتیب ۱۶۳۸۰ ثانیه، ۸۶۳۶/۸ کیلوژول و ۵/۳ بود و در حالت ترکیبی با ترموالکتریک ۱۵۰۰۰ ثانیه، ۷۹۱۱ کیلوژول و ۵/۴ بود که نشان دهنده عملکرد بهتر این سیستم در ترکیب با ترموالکتریک نسبت به حالت استفاده تکی از آن می‌باشد. در شکل (۲-۱۳) ست آپ طراحی شده و آزمایش شده توسط دقیق و همکاران مشاهده می‌شود [۳۹].

¹ Coefficient Of Performance



شکل ۱۳-۲ سیستم طراحی شده توسط دقیق و همکاران [۳۹]

لی و همکاران [۴۰] در مطالعه‌ای عددی، به بررسی مقایسه‌ای تاثیر هندسه ترموالکتریک در یک سیستم ترموالکتریک-فتوولتاییک (PV-TEG) با یک سیستم ترموالکتریک خورشیدی^۱ (STEG) پرداختند و نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که ابعاد هندسی بهینه TEG بکاررفته در سیستم ترموالکتریک-فتوولتاییک در شرایط یکسان با سیستم ترموالکتریک خورشیدی متفاوت است.

۳-۲- معرفی پژوهش حاضر

در این پژوهش ترموالکتریک و ترکیب آن با پنل فتوولتاییک با روش‌هایی مانند استفاده از TEC بصورت مستقیم در پشت پنل، استفاده از TEC و TEG بصورت چسبیده به یکدیگر، استفاده از TEG بدون خنک‌کاری، خنک‌کاری بوسیله‌ی هوا و خنک‌کاری با آب به بررسی جامع تئوری‌های ارائه شده توسط محققین پرداخته می‌شود و طرح نهایی که در واقع یک سیستم PVT-TEG می‌باشد ارائه می‌گردد.

بر این اساس در فصل سوم به مدل‌سازی و بررسی معادله‌های حاکم اجزای مختلف این سیستم

¹ Solar Teg

مانند شدت تابش خورشید، پنل فتوولتاییک ساده، ضریب پُری¹ (FF) و ترموالکتریک در MATLAB پرداخته می‌شود و در انتها مدل ریاضی طرح نهایی در این فصل ارائه خواهد شد. در ابتدای فصل چهارم، اعتبارسنجی اجزا مختلف سیستم با نتایج عملی بررسی می‌شود و سپس به ارزیابی بکارگیری حالت‌های مختلف ترموالکتریک TEC و TEG در ترکیب با پنل فتوولتاییک و بررسی مزایا و معایب آن از جمله میزان مصرف TEC و میزان تولید TEG بصورت عملی پرداخته می‌شود و در آخر با توجه به ارزیابی نتایج حاصل از این بخش، اعتبارسنجی طرح برگزیده شده‌ی نهایی ترکیب ترموالکتریک با پنل فتوولتاییک، انجام خواهد شد. فصل پنجم تحلیل پارامتری سیستم منتخب می‌باشد و در آن تاثیر عوامل مختلف مانند میزان پوشش‌دهی با ترموالکتریک، شدت تابش، دمای محیط، سرعت باد، دمای آب ورودی و سرعت آب در بلوک خنک‌کننده بر میزان تولید توان پنل و ترموالکتریک بررسی خواهد شد.

¹ Fill Factor

۳- فصل سوم

معادله‌های حاکم و مدل سازی

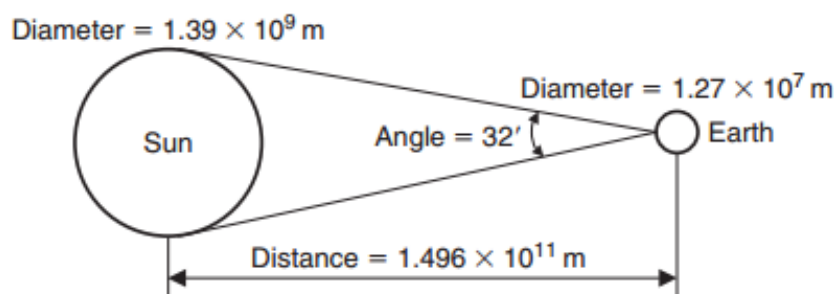
۳-۱- مقدمه

همانگونه که در فصل های گذشته نیز بیان گردید از عوامل تاثیرگذار در بازده می توان به شرایط آب و هوایی، دمای سطح پنل و زاویه نصب پنل اشاره نمود. موارد ذکر شده تاثیر خود را در بخش های مختلف مانند تابش، پنل فتوولتاییک و ترموالکتریک نشان می دهد. در ادامه این فصل ابتدا معادله های حاکم بر اجزا در بخش های مختلف و سپس به مدل سازی سیستم طراحی شده نهایی پرداخته خواهد شد.

۳-۲- معادله های حاکم و مدل سازی شدت تابش خورشید

بدون شک تخمین صحیح شدت تابش خورشید اولین گام در طراحی صحیح یک سیستم خورشیدی می باشد. مدل های مختلفی برای شدت تابش از سوی محققین ارائه گردیده است که در این پژوهش از مدل ارائه شده توسط کالوگرو استفاده شده است [۴۱].

ثابت خورشیدی^۱ (G_{sc}) یا میزان انرژی خورشیدی دریافتی در واحد زمان روی صفحه ای عمود بر خورشید به اندازه ی یک متر مربع در فاصله ی میانگین زمین و خورشید خارج از جو زمین تعریف می گردد که این شرایط در شکل (۳-۱) مشاهده می شود. بر اساس مقادیر ارائه شده در مراجع عدد (1367 W/m^2) برای آن در نظر گرفته می شود.



شکل ۳-۱ رابطه بین زمین و خورشید [۴۱]

¹ Solar Constant

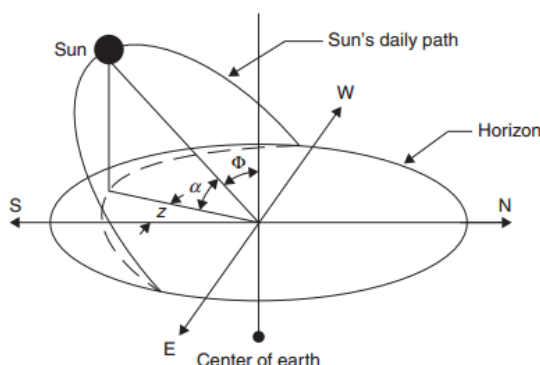
با توجه به حرکت زمین در مداری بیضی در طول سال شار تشعشعی دریافتی خارج از جو تغییر می کند لذا وابستگی ثابت خورشیدی با تشعشع دریافتی در n -امین روز سال نسبت به روز اول سال میلادی از معادله (۱-۳) بدست می آید:

$$G_{on} = G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad 1-3$$

ابتدا برای محاسبه میزان شدت تابش روی یک صفحه افقی بدون در نظر گرفتن جو زمین از معادله (۲-۳) استفاده می شود:

$$G_o = G_{on} \cos \phi \quad 2-3$$

که در آن ϕ زاویه سمت الراس^۱ می باشد که در شکل (۲-۳) مشاهده می گردد.



شکل ۲-۳ مسیر روزانه خورشید از طلوع تا غروب [۴۱]

با استفاده از روابط مثلثاتی و روابط تجربی زمانی، ثابت می شود که زاویه برخورد پرتو مستقیم با جهت عمود بر صفحه افقی (ϕ) از معادله (۳-۳) بدست می آید.

$$\cos \phi = \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) + \sin(\phi) \sin(\delta) \quad 3-3$$

¹ Zenith Angle

در معادله بالا L عرض جغرافیایی^۱ ($-90 \leq L \leq +90$) که برای شمال خط استوا مثبت در نظر گرفته می شود و δ زاویه انحراف محور زمین^۲ نسبت به موقعیت خاص اولیه ($-23.45 \leq \delta \leq +23.45$) است که از معادله (۳-۴) محاسبه می شود و h زاویه ساعت^۳ یا زاویه جابجایی خورشید نسبت به طول جغرافیایی است. این زاویه قبل از ظهر منفی و بعد از ظهر مثبت بوده و مقدار آن به ازای هر ساعت ۱۵ درجه می باشد که منظور از ظهر در اینجا، ظهر خورشیدی است که از معادله (۳-۵) بدست می آید.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad ۴-۳$$

$$h = 15(AST - 12) \quad ۵-۳$$

در معادله بالا AST زمان خورشیدی در منطقه مورد نظر است. در واقع در رابطه فوق اختلاف ساعت خورشیدی از ظهر خورشیدی محاسبه شده است و از معادله (۳-۶) قابل محاسبه است. در شکل (۳-۳) زاویه خط مرکزی بین خورشید و زمین و تصویر آن بر روی صفحه استوایی مشاهده می شود.

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad ۶-۳$$

که در آن LST زمان استاندارد محلی^۴، ET معادله زمان^۵، SL طول جغرافیایی استاندارد^۶، LL طول جغرافیایی محلی^۷ و DS صرفه جویی روشنایی روز^۱ با مقدار ۰ یا ۶۰ می باشد.

¹ Latitude

² Declination

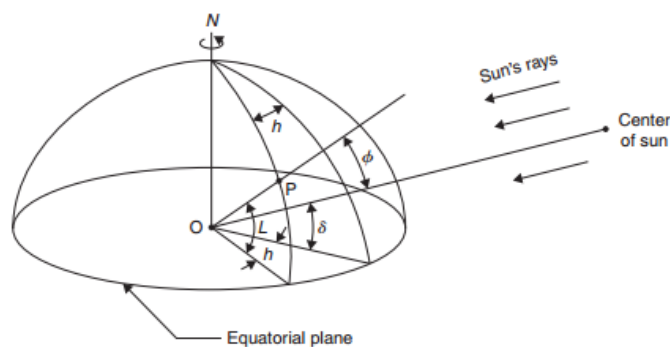
³ Hour Angle

⁴ Local Standard Time

⁵ Equation Of Time

⁶ Standard Longitude

⁷ Local Longitude

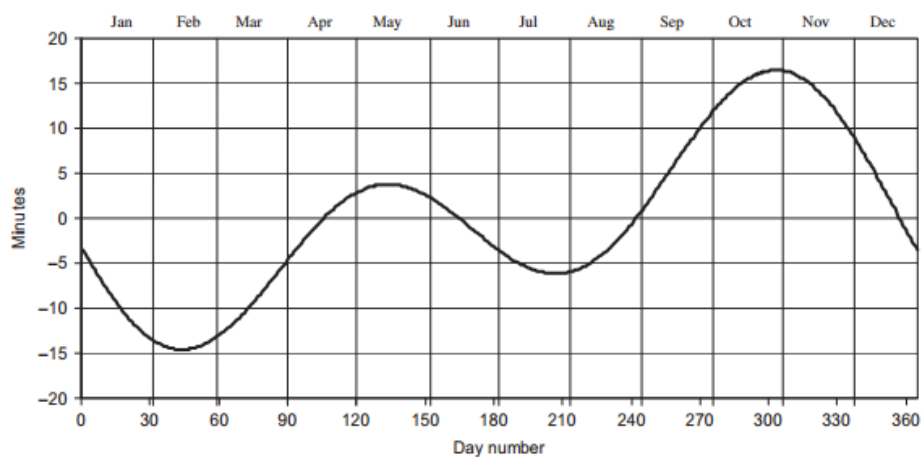


شکل ۳-۳ تعریف عرض جغرافیایی، زاویه ساعت و زاویه انحراف محور زمین [۴۱]

از معادله (۷-۳) مقدار معادله زمان (ET) قابل محاسبه است که علاوه بر آن می توان از شکل (۳-۳) بصورت مستقیم مقدار آن را بدست آورد.

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \quad ۷-۳$$

$$B = (n - 81) \frac{360}{364} \quad ۸-۳$$



شکل ۴-۳ معادله زمان [۴۱]

تابش خورشید بعد از ورود به جو زمین و برخورد به لایه ازن، ملکول های هوا، گرد و غبار و بخار آب و همچنین ابرها، تضعیف می شود. لذا این اثر با استفاده از روابط تجربی در معادلات لحاظ گردیده

¹ Daylight Saving

است که در ادامه مطرح می شود. از طرفی مدل های فراوانی برای محاسبه تابش کل روی سطح شیبدار ارائه شده است که اولین آن ها مدل ایزوتروپیک^۱ است که توسط هاتل و همکارانش توسعه داده شد و بعد از آنها توسط ليو و جوردن بازنویسی گردید [۴۲]. از معادله (۳-۹) تا (۳-۱۴) کل تابش روی سطح شیبدار بر اساس این مدل محاسبه می شود.

$$G_{cT} = G_{cb}R_b + G_{cd}\left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + (G_{cb} + G_{cd})\rho_g\left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad ۹-۳$$

$$G_{cb} = G_o\tau_b \quad ۱۰-۳$$

$$G_{cd} = G_o\tau_d \quad ۱۱-۳$$

$$\tau_d = 0.271 - 0.294\tau_b \quad ۱۲-۳$$

$$\tau_b = a_0 + a_1e^{-k/\cos\phi} \quad ۱۳-۳$$

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\phi} \quad ۱۴-۳$$

که ضریب هندسی^۲ (R_b) نسبت تشعشع مستقیم روی سطح شیب دار به تشعشع مستقیم رسیده روی سطح افقی در هر زمان می باشد. β زاویه پنل نسبت به سطح افق و ρ_g ضریب انعکاس^۳ تابش از زمین اطراف است که بطور میانگین محاسبه شده و برای زمین مسطح معمولی $0/۲$ بوده و در صورت برفی بودن حتی میتواند بیش از $0/۶$ باشد. ضریب تصحیح منطقه ی آب و هوایی از معادله های (۳-۱۵) تا (۳-۲۰) و شکل (۳-۵) قابل محاسبه است که در معادله ها A ارتفاع از سطح دریای آزاد بر حسب کیلومتر می باشد.

$$a_1 = a_1^* \times r_1 \quad ۱۵-۳$$

^۱ Isotropic

^۲ Beam Radiation Tilt Factor.

^۳ Ground Albedo

$$a_0 = a_0^* \times r_0 \quad ۱۶-۳$$

$$k = k^* \times r_k \quad ۱۷-۳$$

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \quad ۱۸-۳$$

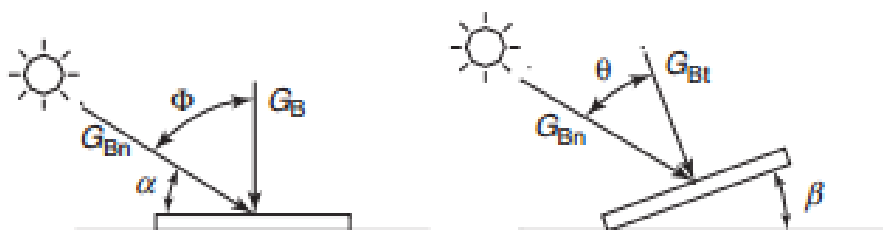
$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595(6.5 - A)^2 \quad ۱۹-۳$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858(2.5 - A)^2 \quad ۲۰-۳$$

Climate Type	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Midlatitude summer	0.97	0.99	1.02
Subarctic summer	0.99	0.99	1.01
Midlatitude winter	1.03	1.01	1.00

شکل ۳-۵ ضریب تصحیح منطقه آب و هوایی

در شکل (۳-۶) تابش مستقیم بروی دو سطح افقی و شیبدار قابل مشاهده است.



شکل ۳-۶ تابش مستقیم بروی سطح افقی و شیبدار [۴۱]

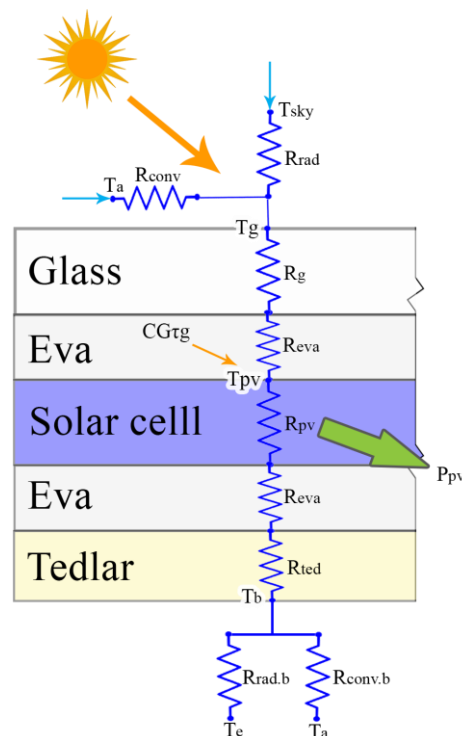
۳-۳- معادله های حاکم بر پنل فتوولتاییک و مدل سازی آن

در این بخش مدل ریاضی پنل فتوولتاییک بر اساس تئوری مقاومت حرارتی ارائه می گردد. در این روش دمای لایه های مختلف بخصوص سلول های خورشیدی که تاثیر قابل توجهی در تولید الکتریسیته و جریان حرارت دارد مورد بررسی قرار می گیرد.

برای دست یافتن به نتیجه مطلوب، شرایط عملیاتی و تلفات حرارتی مختلف، بخصوص تلفات

حرارتی تابشی^۱ و همرفتی^۲ در نظر گرفته می شوند. شرایط مرزی و مفروضات دیگر در مدل بر اساس شرایط محیطی واقعی در نظر گرفته شده است.

همانگونه که در شکل (۷-۳) مشاهده می شود مدل مقاومت حرارتی پنل ساده براساس تحقیق آقای گو و همکاران آورده شده است [۴۳].



شکل ۷-۳ شماتیک مقاومت حرارتی پنل فتوولتائیک ساده

با توجه به پیچیدگی های مدل سازی عددی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. شبیه سازی این فرایند یک بعدی و انتقال حرارت حالت پایدار در نظر گرفته می شود.
۲. اتلاف انرژی فقط از سطح بالایی شیشه و سطح پشت پنل صورت می پذیرد. و از اتلاف انرژی حرارتی از اطراف صرف نظر گردیده است.

¹ Radiation Heat Loss

² Convection Heat Loss

بر اساس فرضیات بالا و مقاومت حرارتی ارائه شده بالانس انرژی پنل فتوولتاییک برای لایه شیشه، سلول و سطح پشت پنل در معادله های (۲۱-۳) تا (۲۶-۳) آورده شده است.

الف) لایه شیشه:

$$\alpha_g G A_g + \frac{T_{pv} - T_g}{R_{eva} + R_g} - \frac{T_g - T_a}{R_{conv}} - \frac{T_g - T_{sky}}{R_{rad}} = 0 \quad 21-3$$

ب) لایه سلول خورشیدی:

$$\begin{aligned} \tau_g G A_t [\alpha_{pv} \beta_u + \alpha_{ted} (1 - \beta_u)] - P_{pv} A_{pv} - \frac{T_{pv} - T_g}{R_{eva} + R_g} \\ - \frac{T_{pv} - T_b}{R_{pv} + R_{eva} + R_{ted}} = 0 \end{aligned} \quad 22-3$$

که در آن مساحت کل (A_t) برابر مساحت شیشه (A_g) و β_u نسبت مساحت سلول های خورشیدی به مساحت کل طبق معادله (۲۳-۳) در نظر گرفته شده است.

$$\beta_u = \frac{A_{pv}}{A_t} \quad 23-3$$

و توان سلول (P_{pv}) از معادله (۲۴-۳) و (۲۵-۳) محاسبه می گردد.

$$P_{pv} = \eta_{pv} \tau_g G \quad 24-3$$

$$\eta_{pv} = \eta_{ref} (1 - \gamma (T_{pv} - T_{pv,ref})) \quad 25-3$$

ج) لایه پشتی پنل:

$$\frac{T_{pv} - T_b}{R_{pv} + R_{eva} + R_{ted}} - \frac{T_b - T_a}{R_{conv,b}} - \frac{T_b - T_e}{R_{rad,b}} = 0 \quad 26-3$$

که در آن T_e دمای زمین است و با توجه به نوع سطح از روی جداول مربوطه بدست می آید.

در جدول (۱-۳) ضخامت و رسانش گرمایی هر لایه جهت محاسبه مقاومت حرارتی آورده شده است.

جدول ۱-۳ ضخامت هر لایه از پنل فتوولتاییک

ردیف	لایه	علامت	ضخامت (mm)	رسانش گرمایی ($W/m.K$)
۱	شیشه	g	۳	۱/۸
۲	EVA	eva	۰/۵	۰/۳۵
۳	سلول	PV	۰/۴	۱۴۸
۴	تدلا ر	ted	۰/۳۳	۰/۱۵

ضریب گرمای تابشی (h_{rad}) شیشه از معادله (۲۷-۳) قابل محاسبه است [۴۴]:

$$h_{rad} = \varepsilon_g \sigma A_g (T_g^2 + T_{sky}^2) (T_g + T_{sky}) \quad 27-3$$

که در آن σ ، ثابت استفان-بولتزمن^۱ می باشد و مقدار T_{sky} از معادله (۲۸-۳) محاسبه می شود [۴۴]:

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad 28-3$$

T_a در رابطه فوق دمای محیط و براساس داده های هواشناسی سنجیده می شود. برای محاسبه مقاومت حرارتی تابشی شیشه از معادله (۲۹-۳) استفاده می شود [۴۴]:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} A_g} \quad 29-3$$

ضریب انتقال حرارت همرفتی از معادله (۳۰-۳) محاسبه می شود [۴۴].

¹ Stefan-Boltzmann

$$h_{conv} = 2.8 + 3u \quad 30-3$$

که در آن u سرعت باد بوده و مقدار آن بر اساس داده های هواشناسی تعیین می گردد. مقاومت حرارتی همرفتی از معادله (۳۱-۳) قابل محاسبه است [۴۴]:

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A_g} \quad 31-3$$

مقدار مقاومت حرارتی بقیه لایه ها (شیشه، سلول خورشیدی، تدار، EVA) از رابطه استاندارد معادله (۳۲-۳) محاسبه می شود [۴۴].

$$R_i = \frac{\delta_i}{k_i A_i} \quad 32-3$$

در جدول (۲-۳) مقدار پارامترها آورده شده است.

۳-۴- معادله های حاکم بر ضریب پُری^۱ (FF)

در پنل های خورشیدی جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) و ولتاژ مدار باز (V_{oc}) بیشترین مقدار جریان و ولتاژی است که یک سلول می تواند تولید کند با این وجود در این دو نقطه توان صفر است. ضریب پُری پارامتری است که در تعامل با جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) و ولتاژ مدار باز (V_{oc}) بیشترین مقدار توان قابل دست یابی از سلول را مشخص می نماید. همانگونه که از شکل (۳-۸) مشخص است ضریب پُری با تقریب خوبی از معادله (۳۳-۳) بدست می آید [۴۵].

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad 33-3$$

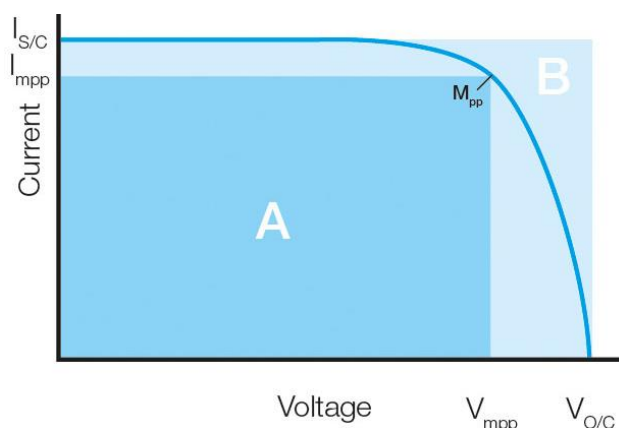
که در آن I_m و V_m به ترتیب جریان و ولتاژ بیشینه می باشد و از معادله های (۳۶-۳) و (۳۷-۳)

¹ Fill Factor

محاسبه می شود..

جدول ۲-۳ مقادیر و مشخصات فیزیکی پنل

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
ضریب جذب شیشه	α_g	۰/۰۱۸	-
ضریب عبور شیشه	τ_g	۰/۸۵	-
ضریب انتشار شیشه	ε_g	۰/۸۵	-
مساحت کل / شیشه	A_g/A_t	۱۲۰۰*۱۱۰	mm*mm
مساحت سلول	A_{pv}	۷۸*۵۲	mm*mm
تعداد سلول	n_{cell}	۲۱	-
بازده سلول @STC	η_{ref}	۱۷	%
ضریب جذب سلول	α_{pv}	۰/۹	-
ضریب جذب تدلار	α_{ted}	۰/۶۵	-
دمای سلول @STC	$T_{pv,ref}$	۲۹۸	K
ضریب دمای پنل	γ	۰/۰۰۴	1/K



شکل ۳-۸ منحنی جریان-ولتاژ

با محاسبه جریان و ولتاژ حداکثر با توجه به دمای سلول که در بخش قبل محاسبه گردید و تابشی که از پیرانومتر ثبت شده است می توان در هر لحظه به شرط داشتن دمای سلول ضریب پُری را محاسبه نمود. برای این منظور می توان از معادله (۳-۳۴) و (۳-۳۵) استفاده نمود [۴۶].

$$I_{sc} = I_{sc}^{ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I_{sc}}(T - T_{ref}) \quad ۳۴-۳$$

$$V_{oc} = V_{oc}^{ref} + V_t \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \mu_{V_{oc}}(T - T_{ref}) \quad ۳۵-۳$$

که در آن $\mu_{I_{sc}}$ و $\mu_{V_{oc}}$ به ترتیب ضریب دمای جریان اتصال کوتاه و جریان مدار باز می باشد. برای محاسبه جریان و ولتاژ حداکثر از معادله (۳-۳۶) و (۳-۳۷) استفاده می شود [۴۶].

$$I_m = I_m^{ref} \frac{G}{G_{ref}} + \mu_{I_{sc}}(T - T_{ref}) \quad ۳۶-۳$$

$$V_m = V_m^{ref} + V_t \ln\left(\frac{G}{G_{ref}}\right) + \mu_{V_{oc}}(T - T_{ref}) \quad ۳۷-۳$$

که در هم معادله های بالا V_t از معادله (۳-۳۸) محاسبه می شود [۴۶].

$$V_t = \frac{2V_m - V_{oc}}{\frac{I_m}{I_{sc} - I_m} + \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}}\right)} \quad ۳۸-۳$$

اطلاعات پنل در شرایط استاندارد ($T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, $G = 1000 \text{ W/m}^2$) در جدول (۳-۳) آورده

شده است.

جدول ۳-۳ مشخصات پنل در شرایط استاندارد

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
توان نامی پنل	P	۲۶/۵	W
ولتاژ ماکزیمم	V_m^{ref}	۱۱/۵۵	V
جریان ماکزیمم	I_m^{ref}	۲/۴	A
جریان اتصال کوتاه	I_{sc}^{ref}	۲/۶۵	A
ولتاژ مدار باز	V_{oc}^{ref}	۱۳/۶۵	V

۳-۵- مدل سازی و معادلات حاکم بر ترموالکتریک

همانطور که در فصل اول نیز اشاره گردید ترموالکتریک ها انرژی حرارتی به الکتریکی را به واسطه اثر سیبک و انرژی الکتریکی به گرمایی را بواسطه اثر پلتیر تبدیل می کنند [۴۷]. از این خاصیت دو طرفه می توان برای تولید انرژی اضافی در پنل های خورشیدی استفاده نمود [۴۸]. ترموالکتریک ها از نیمه هادی های نوع n و p تشکیل شده است که بصورت سری به یکدیگر متصل شده اند [۴۹].

یک سمت ترموالکتریک سرد و سمت دیگر آن گرم در نظر گرفته می شود. شار حرارتی ورودی به سمت گرم (Q_h) و خروجی از سمت سرد (Q_c) از معادله (۳-۳۹) و (۳-۴۰) بدست می آید که از بخش های حرارتی پلتیر ($\alpha I_{teg} T_h$)، انتقال حرارت نیوتن ($k(T_h - T_c)$) و حرارتی ژول ($\frac{1}{2} I_{teg}^2 R_{in}$) تشکیل شده است [۴۳].

$$Q_h = \alpha I_{teg} T_h + k(T_h - T_c) - \frac{1}{2} I_{teg}^2 R_{in} \quad 39-3$$

$$Q_c = \alpha I_{teg} T_c + k(T_h - T_c) + \frac{1}{2} I_{teg}^2 R_{in} \quad 40-3$$

در آن α ضریب سیبک، k و R_{in} به ترتیب ضریب انتقال حرارت رسانش و مقاومت داخلی ترموالکتریک می باشد. حال می توان توان تولید شده توسط یک ترموالکتریک را از معادله (3-41) محاسبه نمود [43].

$$P_{teg} = Q_h - Q_c = I_{teg}^2 R_L \quad 41-3$$

که در آن R_L مقاومت بار است. از معادله (3-42) می توان جریان در ترموالکتریک را محاسبه نمود و همانگونه که می دانیم بیشترین توان ترموالکتریک زمانی است که مقاومت داخلی ترموالکتریک با مقاومت بار برابر باشد [43].

$$I_{teg} = \frac{\alpha(T_h - T_c)}{R_{in} + R_L} \quad 42-3$$

لذا توان ماکزیمم را از معادله (3-43) بدست آورد [43].

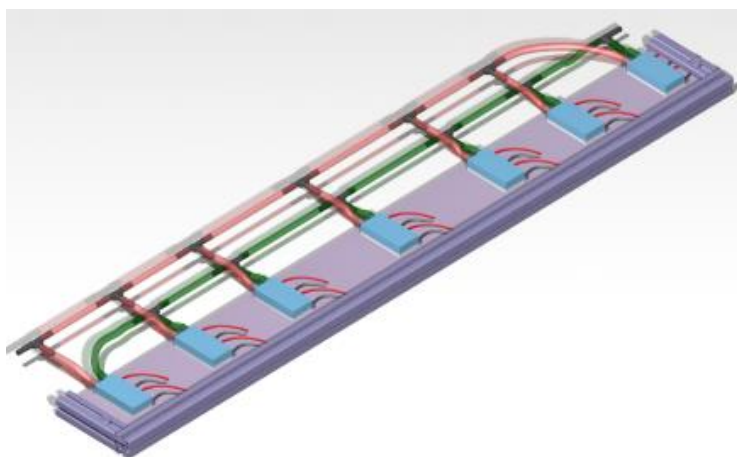
$$P_{teg,max} = \frac{[\alpha(T_h - T_c)]^2}{4R_{in}} \quad 43-3$$

3-6- مدل سازی و معادله های حاکم بر سامانه ترکیبی PVT-TEG

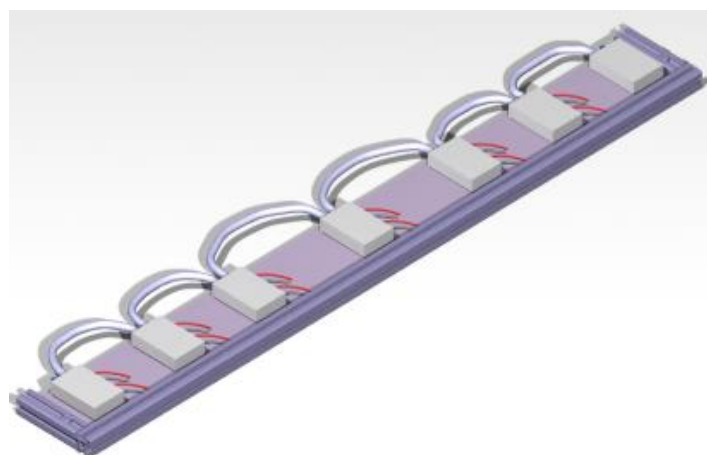
یکی از موارد مورد بررسی در این پژوهش بکارگیری ترموالکتریک در پنل های فتوولتائیک حرارتی (PVT) است. هنگامی که پنل های خورشیدی در معرض تابش خورشید قرار می گیرند با افزایش دما بازده آنها کاهش می یابد [50]. لذا می توان آنها را به عنوان سیستمی در نظر گرفت که علاوه بر تولید الکتریسیته، انرژی حرارتی نیز تولید می نمایند و می تواند بصورت ترکیبی با دستگاه دیگر از این حرارت تولید شده جهت افزایش بازده سیستم استفاده نمود. در این بین ترموالکتریک ژنراتور بعنوان

سیستمی که حرارت از هر منبعی مثل خورشید یا حرارت اتلافی را بصورت مستقیم به الکتریسیته تبدیل می کند بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۵۱].

در پژوهش حاضر برای مدل ترکیبی TEG با پنل فتوولتائیک حرارتی (PVT-TEG) سطح گرم ترموالکتریک به صورت مستقیم بر روی پنل قرار گرفته و حرارت را از پنل دریافت می نماید. با استفاده از بلوک خنک کننده سمت دیگر ترموالکتریک خنک می شود. بر اساس نحوه تقسیم جریان آب در بلوک خنک کننده، دو حالت سری و موازی را می توان در نظر گرفت که به ترتیب در شکل های (۹-۳) و (۱۰-۳) مشاهده می شود.

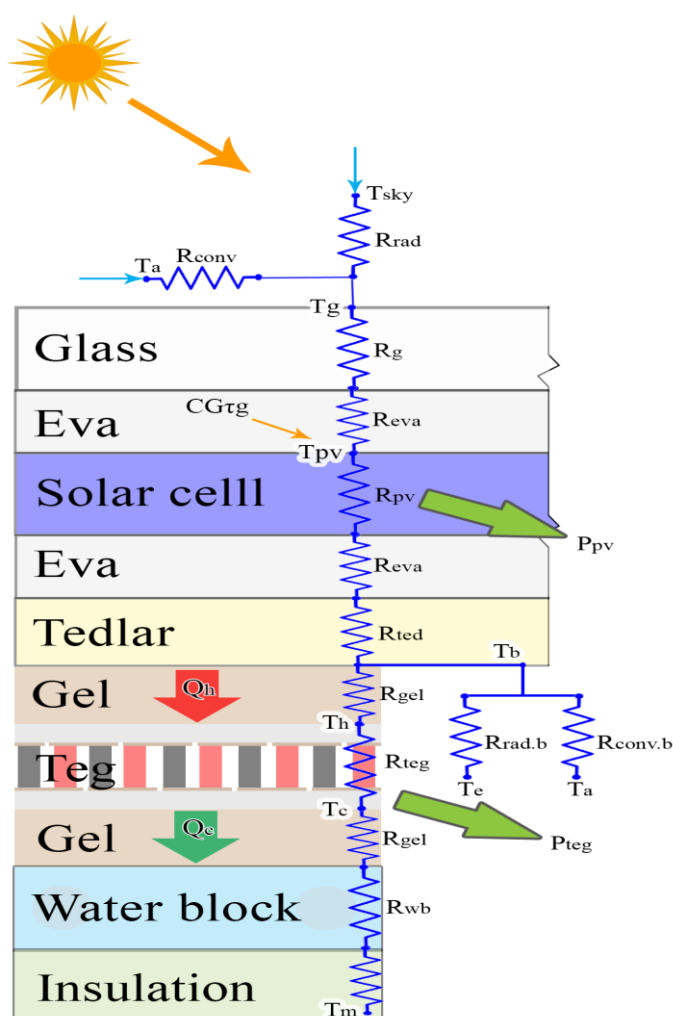


شکل ۹-۳ شماتیک سیستم طراحی شده PVT-TEG با جریان سیال موازی از نمای پشت پنل



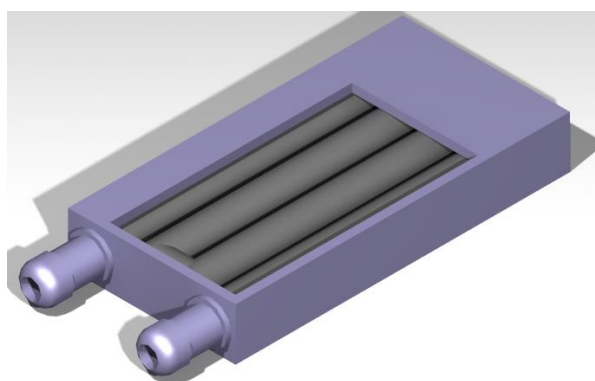
شکل ۱۰-۳ شماتیک سیستم طراحی شده PVT-TEG با جریان سیال سری از نمای پشت پنل

مزیت جریان موازی نسبت به حالت سری، کاهش بیشتر دمای پنل است زیرا دمای هر بلوک با دمای آب ورودی یکسان می باشد ولی تقسیم جریان سیال در سرعت های پایین بین بلوک های خنک کننده به درستی انجام نمی شود، در مقابل جریان سیال مشکل تقسیم جریان سیال برطرف شده علاوه بر آن می توان به اختلاف دمای بیشتر آب خروجی نسبت به ورودی از بلوک های خنک کننده نسبت به حالت موازی اشاره نمود ولیکن جریال در بلوک ها دچار افت فشار می شود. پس از بررسی مزایا و معایب دو حالت سری و موازی، حالت جریان سیال سری به عنوان حالت جریان منتخب در سیستم نهایی PVT-TEG انتخاب گردید. در شکل (۳-۱۱) شماتیک مقاومت حرارتی لایه های مختلف سیستم طراحی شده مشاهده می گردد.



شکل ۳-۱۱ شماتیک مقاومت حرارتی سیستم طراحی شده PVT-TEG

همانگونه که مشاهده می شود بخشی از تابش خورشید توسط سلول خورشیدی به الکتریسیته و بخش دیگر به حرارت تبدیل می شود که این حرارت از پشت پنل دفع می گردد. یک بخش از پنل خورشیدی با ترموالکتریک پوشش داده شده است و بخش دیگر با محیط در ارتباط است. طبق آنچه در عکس برداری با دوربین حرارتی نیز مشاهده گردید می توان این دو قسمت را مستقل از یکدیگر در نظر گرفت بدین معنی که برای مدل کردن کلی پنل ترکیبی با ترموالکتریک می توان یک بخش را کاملاً پوشش داده شده با ترموالکتریک و بخش دیگر را بعنوان پنل ساده در نظر گرفت. بخشی که با ترموالکتریک پوشش داده شده است حرارت دفع شده را جذب می نماید و شار حرارتی ایجاد شده در ترموالکتریک ژنراتور، مستقیماً الکتریسیته تولید می نماید. برای بالا بردن توان تولیدی ترموالکتریک می بایست در سمت سرد خنک کاری صورت پذیرد که این خنک کاری توسط بلوک های خنک کننده آلومینیومی انجام می شود که در شکل (۳-۱۲) شماتیک بلوک خنک کننده مشاهده می شود.



شکل ۳-۱۲ شماتیک بلوک خنک کننده آلومینیومی

برای انجام مدل سازی لایه های مختلف پنل به ترتیب در نظر گرفته شده است:

الف) لایه شیشه:

معادله ی حاکم بر لایه شیشه مانند رابطه ی (۳-۲۱) در بخش مدل سازی پنل خورشیدی ساده

است.

(ب) لایه سلول خورشیدی:

در این لایه با توجه به اینکه سلول خورشیدی از قسمت پشت با دو بخش تدلار و ترموالکتریک در ارتباط است لذا بالانس انرژی به شکل معادله (۴۴-۳) نوشته می شود.

$$\begin{aligned} \tau_g G A_t [\alpha_{pv} \beta_u + \alpha_{ted} (1 - \beta_u)] - P_{pv} A_{pv} - \frac{T_{pv} - T_g}{R_{eva} + R_g} \\ - \beta_b \left(\frac{T_{pv} - T_h}{R_{pv} + R_{eva} + R_{ted} + R_{gel}} \right) \\ - (1 - \beta_b) \left(\frac{T_{pv} - T_b}{R_{pv} + R_{eva} + R_{ted}} \right) = 0 \end{aligned} \quad 44-3$$

که در آن β_b به شکل معادله (۴۵-۳) تعریف می شود.

$$\beta_b = \frac{A_{teg}}{A_t} \quad \text{معادله ۴۵-۳}$$

(ج) لایه ترموالکتریک:

سمت گرم (T_h) ترموالکتریک به پشت پنل و سمت سرد (T_c) به بلوک خنک کننده متصل می شود. معادله (۴۶-۳) و (۴۷-۳) به ترتیب بالانس انرژی سمت گرم و سرد ترموالکتریک می باشد.

$$Q_h - \beta_b \left(\frac{T_{pv} - T_h}{R_{pv} + R_{eva} + R_{ted} + R_{gel} + R_{teg}} \right) = 0 \quad 46-3$$

$$Q_c - \frac{T_c - T_m}{R_{gel} + R_{wb} + R_{teg}} = 0 \quad 47-3$$

(د) لایه بلوک خنک کننده:

معادله (۴۸-۳) بالانس انرژی بلوک خنک کننده می باشد [۵۲].

$$\frac{T_c - T_m}{R_{gel} + R_{wb}} - \rho_w * c_p * A_{tu} * N_{tu} * u_w (T_{out} - T_{in}) = 0 \quad 48-3$$

که در آن T_m میانگین دمای آب ورودی و خروجی به بلوک می باشد و از معادله (3-49) بدست می آید [52].

$$T_m = \frac{T_{out} + T_{in}}{2} \quad 49-3$$

R_{wb} مقاومت حرارتی بلوک خنک کننده می باشد و از مجموع مقاومت حرارتی ضخامت سطح بالایی بلوک خنک کننده و مقاومت حرارتی آب (R_w) در معادله (3-50) محاسبه می گردد [52].

$$R_{wb} = \frac{\delta_{wb}}{k_{al} A_w} + R_w \quad 50-3$$

و مقاومت حرارتی آب (R_w) از معادله (3-51) بدست می آید [52].

$$R_w = \frac{1}{h_w \pi D_{tu} L_{tu} N_{tu}} \quad 51-3$$

که در آن D_{tu} و L_{tu} و N_{tu} به ترتیب قطر لوله، طول لوله و تعداد لوله های داخل بلوک خنک کننده می باشد و h_w ضریب گرمای همرفتی آب می باشد که از معادله (3-52) محاسبه می گردد [52].

$$h_w = \frac{k_w Nu}{D_{tu}} \quad 52-3$$

که در آن ناسلت¹ (Nu) از معادله (3-53) و (3-54) محاسبه می شود [52].

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 Gz}{1 + 0.04 Gz^{2/3}} \quad (Re \leq 2300) \quad 53-3$$

¹ Nusselt Number

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}\left[1 + \left(\frac{D_{tu}}{L_{tu}}\right)^{0.7}\right] \quad (Re > 2300) \quad 54-3$$

و رینولدز^۱ (Re)، گراتز^۲ (Gz) و پرانتل^۳ (Pr) از معادله (۵۵-۳) تا (۵۷-۳) قابل محاسبه است [۵۲].

$$Re = \frac{u_w D_{tu}}{\nu_w} \quad 55-3$$

$$Gz = \frac{D_{tu}}{L_{tu}} Re * Pr \quad 56-3$$

$$Pr = \frac{\rho_w c_p \nu_w}{k_w} \quad 57-3$$

برای محاسبه بازده الکتریکی، حرارتی و بازده کل از معادله های (۵۸-۳) تا (۶۲-۳) استفاده می شود [۵۲]:

$$P_{total} = P_{teg} + P_{pvT-teg} \quad 58-3$$

$$P_{pvT-teg} = A_{pv} * G * \tau_g * [C_{teg} * \eta_{pvT-teg} + (1 - C_{teg}) * \eta_{pv}] \quad 59-3$$

$$\eta_{ele} = 100 * \left(\frac{P_{total}}{G * A_{pv}}\right) \quad 60-3$$

$$\eta_{th} = 100 * \left(\frac{Q_{wa}}{G * A_{pv}}\right) \quad 61-3$$

$$\eta_{total} = \eta_{ele} + \eta_{th} \quad 62-3$$

که در آن C_{teg} میزان پوشش دهی با TEG در پشت پنل می باشد و Q_{wa} مقدار حرارتی است که توسط آب جذب شده است و از معادله (۶۳-۳) محاسبه می شود.

¹ Reynolds Number

² Graetz Number

³ Prandtl Number

$$Q_{wa} = \dot{m} * c_p * (T_{out} - T_{in}) \quad ۶۳-۳$$

$\dot{m}$ میزان جرم آب عبور کرده از سطح مقطع کانال بلوک خنک کننده در هر لحظه بر حسب g/s می باشد.

در جدول (۴-۳) مشخصات بلوک خنک کننده آلومینیومی آورده شده است.

جدول ۴-۳ مشخصات بلوک خنک کننده آلومینیومی

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
ضخامت بلوک	δ_{wb}	۱۲	mm
رسانش گرمایی آلومینیوم	k_{al}	۲۰۰	$W/m.K$
ابعاد بلوک خنک کننده	A_w	۸۰*۴۰	mm*mm
قطر لوله	D_{tu}	۵	mm
طول لوله	L_{tu}	۸۰	mm
تعداد لوله	N_{tu}	۴	-
رسانش گرمایی آب	k_w	۰/۵۹۹	$W/m.K$
چگالی آب	ρ_w	۹۹۸/۲	kg/m^3
ویسکوزیته سینماتیکی آب	ν_w	۱/۰۰۶	$10^{-6} * m^2/s$
ظرفیت گرمایی آب	c_p	۴۱۸۳	$J/(kg.K)$

۴- فصل چهارم

اعتبارسنجی و ساخت

۴-۱- مقدمه

در این فصل در ابتدا اعتبارسنجی برای اجزایی مانند شدت تابش خورشید، پنل فتوولتاییک ساده و ترموالکتریک به صورت جداگانه ارایه می‌گردد. سپس به ارزیابی روش‌های مختلف بکارگیری TEC و TEG به صورت ترکیبی با پنل فتوولتاییک پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است مدل‌سازی اجزا که در فصل قبل روابط آنها ارایه گردید در نرم افزار متلب انجام شده است. و داده‌های عملی از فروردین ماه تا شهریور ماه سال ۱۳۹۹ در روزها و شرایط آب و هوایی مختلف اندازه‌گیری شده است.

۴-۲- اعتبارسنجی

۴-۲-۱- اعتبارسنجی مدل محاسباتی شدت تابش خورشید

در فصل ۳ از معادله (۳-۱) تا (۳-۲۰) در خصوص مدل‌سازی تابش خورشید توضیحاتی داده شد و در این قسمت به اعتبارسنجی آن با داده‌های عملی پراخته می‌شود. داده‌های عملی با استفاده از پیرانومتر^۱ آزمایشگاه انرژی که در شکل (۴-۱) مشاهده می‌شود، اندازه‌گیری شده است که خطای اندازه‌گیری آن طبق کاتالوگ دستگاه ± 25 وات بر متر مربع است.



شکل ۴-۱ پیرانومتر مدل ۱۶۱۰۳ شرکت آلمانی Lambrecht

در جدول (۴-۱) مقایسه بین داده‌های تئوری و عملی و میزان خطای آن قابل مشاهده است. اعداد

¹ Pyranometer

تابش در ساعت‌های مختلف روز ثبت گردیده است و برای همان ساعت محاسبات انجام و ارایه گردیده است. مختصات جغرافیایی شاهرود ($L=36/38$ ، $LL=54/92$ ، $A=1/38$)، آب و هوای تابستانی ($r_0 = 0.97, r_1 = 0.99, r_k = 1.02$) و شیب پنل ($\beta = 32^\circ$) به عنوان ورودی MATLAB در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین خطا $5/76\%$ و میانگین خطا $3/8\%$ بوده است.

جدول ۱-۴ مقایسه بین داده های تابش تجربی و تئوری

ردیف	$G_{exp}(W/m^2)$	$G_{theory}(W/m^2)$	$error(\%)$
۱	۳۴۷/۶	۳۳۸/۷۸	۲/۵۴
۲	۴۹۱/۷	۴۷۷/۵۳	۲/۸۸
۳	۵۸۶/۳	۵۶۲/۳۲	۴/۰۹
۴	۶۶۸/۲	۶۴۲/۵۴	۳/۸۴
۵	۷۵۴/۸	۷۱۷/۵۵	۴/۹۳
۶	۸۷۰/۹	۸۲۰/۷	۵/۷۶
۷	۹۶۲/۳۹	۹۹۱/۰۹	۲/۹۸
۸	۱۰۵۴/۳	۱۰۱۸/۶۷	۳/۳۸

۴-۲-۲-۴ اعتبار سنجی مدل پنل فتوولتاییک

در فصل ۳ از معادله (۳-۲۱) تا (۳-۳۲) مدل سازی پنل فتوولتاییک مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است. در این بخش اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از مدل و پنل آزمایش شده ارایه

می‌شود. ضریب پُری^۱ (FF) برای محاسبه توان بیشینه عملی بر اساس ولتاژ مدار باز (V_{oc}) و جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) در هر لحظه با توجه به دمای سلول محاسبه شده است. همانگونه که در جدول (۴-۲) مشاهده می‌شود مقایسه بین توان و بازده پنل در دو حالت تئوری و عملی صورت گرفته است. از داده‌های ثبت شده برای پنج روز مختلف جهت اعتبارسنجی استفاده شده است.

جدول ۴-۲ مقایسه داده های تئوری و عملی پنل فتوولتاییک

روز و ساعت	$P_{exp}(W)$	$\eta_{exp}(\%)$	$P_{theory}(W)$	$\eta_{theory}(\%)$	$error(\%)$
اول، ۱۱:۵۵	۱۰/۵۴	۱۳/۲۱	۱۰/۹۴	۱۳/۷۱	۳/۸۳
اول، ۱۲:۵۰	۱۰/۶۷	۱۲/۹۸	۱۱/۲۳	۱۳/۶۶	۵/۲۸
دوم، ۱۲:۱۰	۱۱/۰۷	۱۳/۲۷	۱۲/۷۴	۱۵/۲۷	۱۵/۰۵
دوم، ۱۳:۲۳	۱۰/۹۸	۱۲/۸۹	۱۲/۳۷	۱۴/۵۲	۱۲/۵۵
سوم، ۱۲:۲۸	۱۱/۱۴	۱۳/۳۷	۱۲/۷۱	۱۵/۲۶	۱۴/۱۲
سوم، ۱۳:۳۸	۱۰/۵۵	۱۲/۷۴	۱۲/۶۴	۱۵/۲۶	۱۹/۷۵
چهارم، ۱۲:۰۲	۱۰/۷۲	۱۳/۳۵	۱۱/۷۵	۱۴/۶۳	۹/۶۱
چهارم، ۱۲:۵۸	۱۰/۸۸	۱۳/۲۷	۱۱/۹۷	۱۴/۶۱	۱۰/۰۵
پنجم، ۱۲:۴۵	۱۰/۶۴	۱۲/۴۹	۱۲/۴۳	۱۴/۶۱	۱۶/۹
پنجم، ۱۳:۴۰	۱۰/۲۹	۱۲/۱۲	۱۲/۳۹	۱۴/۶۱	۲۰/۴۸

¹ Fill Factor

بر اساس نتایج این جدول خطای بیشینه برابر $20/48$ درصد و میانگین خطا برابر $12/76$ درصد بوده است. با توجه به اینکه فاصله‌ی زمانی داده‌های دمای محیط و سرعت بادی که در مدل استفاده شده است هر سه ساعت بود لذا در طول آزمایش آنها را ثابت فرض کردیم و می‌توان بعنوان یکی از دلایل خطای ایجاد شده به آن اشاره نمود.

۴-۲-۳- اعتبار سنجی ترموالکتریک

شرکت‌های تولید کننده، ضرایب داخلی ترموالکتریک (K, ρ, α) را به دلیل مسایل امنیتی و رقابتی در اختیار کاربران قرار نمی‌دهند و به جای آن در کاتالوگ محصولات خود نمودارهای عملکرد را قرار می‌دهند.

ضرایب داخلی ترموالکتریک‌ها به دما وابستگی دارند و می‌بایست برای ترسیم نمودار آنها، رابطه آن با دما مشخص باشد ولیکن می‌توان با ساده سازی و با استفاده از روابط $(3-39)$ تا $(3-43)$ که در فصل قبل بیان گردید و نیز با استفاده از نمودارهای ارائه شده در کاتالوگ خطای کمی این ضرایب را در هر اختلاف دما محاسبه نمود. ضرایب استفاده شده برای اختلاف دمای 10 درجه سانتیگراد مطابق جدول $(3-4)$ می‌باشد.

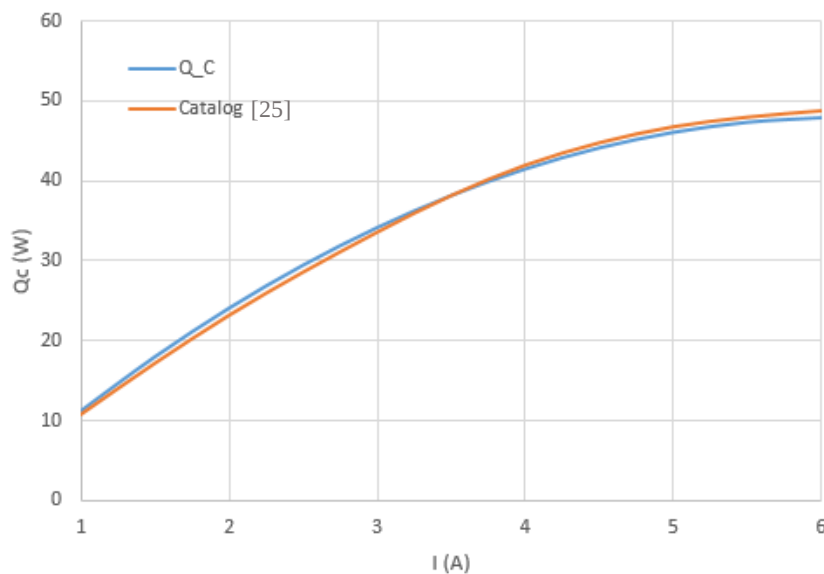
جدول ۳-۴ ضرایب داخلی ترموالکتریک (دمای سطح گرم 50°C)

ردیف	ضریب داخلی	مقدار	واحد
۱	α	$0/0543$	V/K
۲	ρ	$2/758$	Ω
۳	K	$0/444485$	W/K

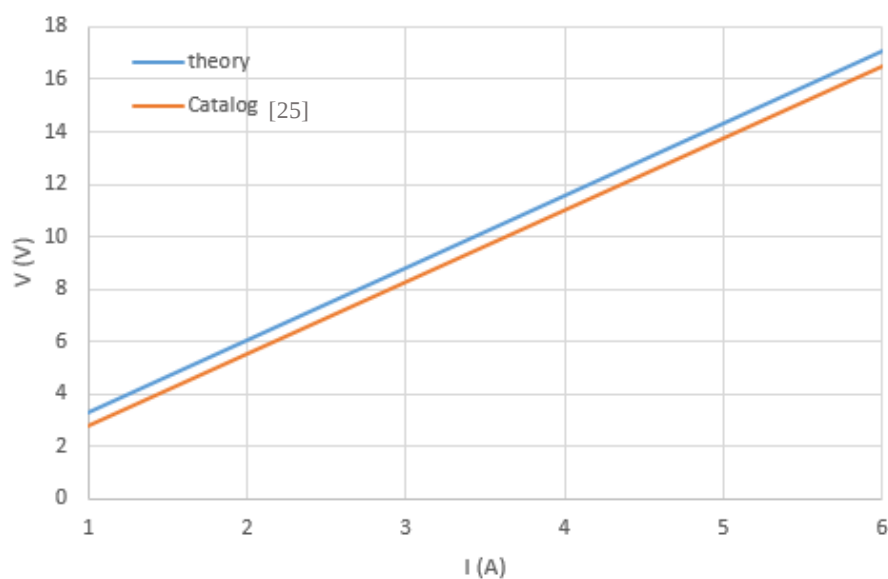
در این قسمت برای اعتبار سنجی ترموالکتریک با استفاده از کاتالوگ شرکت فروتک^۱ یک نمونه از

¹ Ferrotec

TEC آن شرکت را مدل نموده و با نمودار ارایه شده در کاتالوگ مقایسه شده است [۲۵]. شکل (۲-۴) مقایسه بین نمودار حرارت پمپ شده بر حسب جریان $(Q_c - I)$ کاتالوگ و مدل می‌باشد و در شکل (۳-۴) مقایسه بین ولتاژ بر حسب جریان کاتالوگ و مدل آورده شده است. میانگین خطای مدل‌سازی برای ولتاژ ۷/۰۹ درصد و برای حرارت پمپ شده ۲/۱۱ درصد می‌باشد.



شکل ۲-۴ مقایسه بین نمودار $Q_c - I$ کاتالوگ و مدل در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتیگراد



شکل ۳-۴ مقایسه بین نمودار $V-I$ کاتالوگ و مدل در اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتیگراد

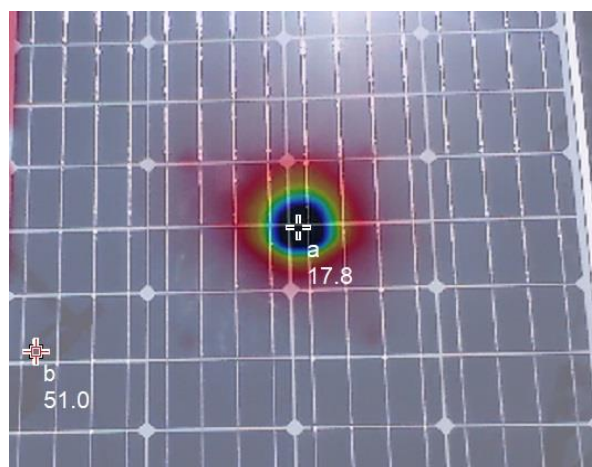
۳-۴- ارزیابی بکارگیری حالت های مختلف ترموالکتریک TEG و TEC

با توجه به مطالعات پیشین برای بکارگیری ترموالکتریک در پنل های فتوولتایک حالت های مختلفی برای ترکیب این دو فناوری پیشنهاد شده است. در این بخش جهت صحت سنجی عملکرد حالت های پیشنهادی و امکان پذیر بودن حالت های تئوری بیان شده در مقالات استفاده از دو نوع ترموالکتریک در حالت های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است تا در نهایت مشخص گردد که عملاً از کدام یک از این حالت ها می توان استفاده نمود.

۴-۳-۱- استفاده از TEC بصورت مستقیم در پشت پنل

در جهت بررسی میزان و محدوده خنک کاری هر ترموالکتریک، یک TEC را بصورت مستقیم به پشت پنل متصل کرده و مشاهده شد پس از گذشت تقریباً ۱۵ دقیقه از شروع آزمایش، دمای نقطه ای که TEC به آن متصل شده بود به $17/8^{\circ}\text{C}$ رسید در صورتی که دمای سطح پنل تقریباً 51°C بود.

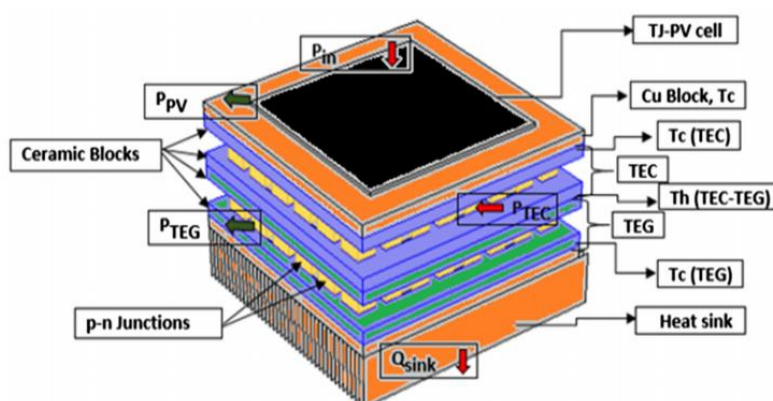
همانگونه که در شکل (۴-۴) مشاهده می شود محدوده خنک کاری بسیار کم بوده و با توجه به میزان مصرف بالای هر TEC که حدوداً ۳۸ وات می باشد استفاده از آن به صورت مستقیم به هیچ عنوان قابل توجیه نمی باشد.



شکل ۴-۴ استفاده مستقیم از TEC در پشت پنل

۴-۳-۲- استفاده از TEC و TEG بصورت چسبیده به یکدیگر

همانطور که در فصل دوم بخش (۲-۲) بیان شد در مقالاتی که در ابتدا مورد بررسی قرار گرفت، تئوری استفاده از TEC و TEG بصورت چسبیده به یکدیگر بیان گردیده بود که در شکل (۴-۵) شماتیک موجود در مقاله تفاح و همکاران [۳۶] قابل مشاهده است که مطابق این شکل سطح گرم TEC به سطح گرم TEG متصل شده است.



شکل ۴-۵ شماتیک ارائه شده در مقاله [۳۶]

در این بخش اطلاعات مربوط به آزمایش‌های ترموالکتریک مدل TEC1-12706 که در شکل (۴-۶) دیده می‌شود ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است ترموالکتریک‌های خریداری شده چینی و بدون کاتالوگ بودند به همین خاطر اطلاعات دقیقی از خواص و کیفیت آنها در دست نبود.



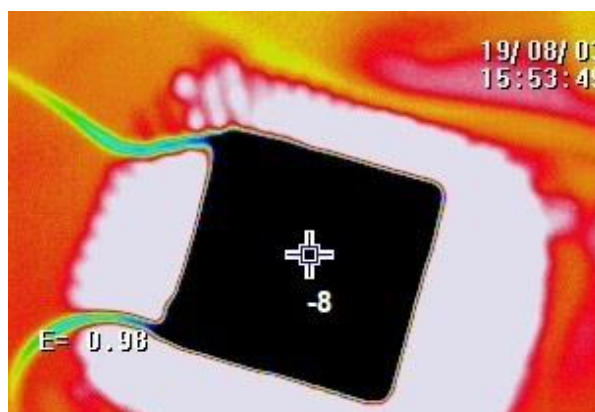
شکل ۴-۶ ترموالکتریک TEC1-12706 آزمایش شده

همانگونه که در شکل (۷-۴) مشاهده می‌شود پس از آزمایش مشخص گردید حداکثر ولتاژ و جریان عبوری از هر ترموالکتریک به ترتیب ۱۲ ولت و ۳/۱۹ آمپر و توان مصرفی آن ۳۸/۲۸ وات می‌باشد.



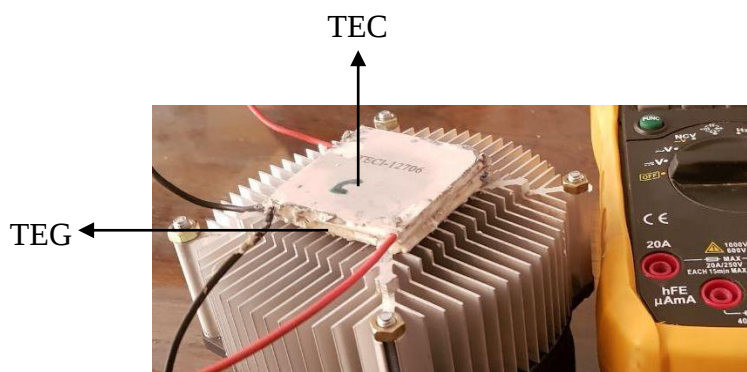
شکل ۷-۴ آزمایش جریان و ولتاژ عبوری

پس از اندازه گیری مدت زمان انجماد آب و حداقل دمای سطح ترموالکتریک مشاهده گردید آب پس از ۳۰ ثانیه روی سطح ترموالکتریک شروع به یخ زدن نمود و دمای ۸- درجه سانتیگراد با این ترموالکتریک قابل دسترسی بود که در شکل (۸-۴) قابل مشاهده است. این آزمایش‌ها نشان دهنده سالم بودن و عملکرد صحیح هر ترموالکتریک بود.



شکل ۸-۴ حداقل دمای سطح ترموالکتریک

بعد از مراحل فوق، TEC و TEG را به یکدیگر چسبانده و با استفاده از منبع تغذیه DC توان به TEC داده شد و همزمان برای ثبت توان تولیدی TEG از مولتی‌متر استفاده گردید. همانگونه که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود TEC در بالا و TEG در پایین قرار داشت و از حرارت دفع شده از سمت گرم TEC (T_h) بعنوان سطح گرم TEG استفاده گردید و برای سمت سرد TEG (T_c) از هیت سینک^۱ استفاده شد.



شکل ۴-۹ نحوه قرار گیری TEC و TEG

به دلیل اینکه دو ترموالکتریک بدون هیچ واسطه‌ای به یکدیگر چسبیده بودند و امکان دفع حرارت مستقیم از TEC گرفته شده بود پس از گذشت مدت زمان کوتاهی از شروع آزمایش، سطح سرد (T_c) TEC شروع به داغ شدن نمود و سپس از کار افتاد و در نتیجه تئوری بیان شده در تحقیق تفاح و همکاران [۳۶] در عمل قابل اجرا نمی باشد. در شکل (۴-۱۰) نمای داخلی TEC از کار افتاده و پایه های n و p ذوب شده قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۰ نمای داخلی TEC از کار افتاده

¹ Heat Sink

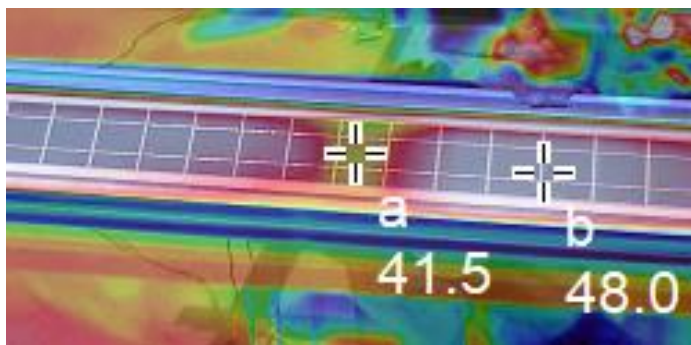
۴-۳-۳- استفاده از TEG بدون خنک کاری

با انجام آزمایش‌های فوق مشخص گردید که استفاده از TEC به صورت چسبیده به پشت پنل عملی نبوده یا به دلیل مصرف بالای برق آن در نهایت تولید برق خالص مجموعه را کاهش می‌دهد. لذا در ادامه استفاده از TEG مدنظر قرار گرفت و اولین آزمایش، استفاده از آن بدون خنک کاری و به واسطه جریان طبیعی هوا بود که مشاهده گردید بعد از گذشت مدت زمان کوتاهی به دلیل هم دما شدن دو سطح گرم (T_h) و سرد (T_c) تولید توان TEG تقریباً به صفر (۵۸ میلی ولت، ۸ میلی آمپر) رسید و نیز تاثیری در خنک کاری روی پنل نداشت.

۴-۳-۴- استفاده از TEG با خنک کاری بوسیله هوا

بواسطه اینکه TEG با جریان طبیعی هوا در پشت پنل تولید توان نداشت می‌بایست دنبال راهی بود که بتوان در دو سمت گرم و سرد آن اختلاف دما ایجاد نمود و علاوه بر تولید توان بر خنک کاری پنل نیز تاثیر گذاشت لذا از جریان اجباری هوا با قرار دادن یک هیت سینک فن دار در سمت سرد TEG استفاده شد.

همانگونه که در شکل (۴-۱۱) مشاهده می‌شود بعد از گذشت ۶ دقیقه از شروع آزمایش دمای سلولی که پشت آن ترموالکتریک قرار داشت نسبت به باقی قسمت‌ها $6/5^{\circ}\text{C}$ کاهش یافت. موضوعی که در اینجا مورد توجه قرار داشت میزان تولید ترموالکتریک‌ها نسبت به مصرف فن برای خنک کاری و نیز عدم استفاده از حرارت دفع شده توسط هوا بود. توان تولیدی یک ترموالکتریک ژنراتور ۰/۰۳۸ وات می‌باشد در صورتی که توان مصرفی فن جهت خنک کاری سمت سرد آن ۱/۹۲ وات می‌باشد. لازم به ذکر است که هر سلول از پنل که یک ترموالکتریک به آن متصل می‌شود توانی حدود ۰/۸۷ وات دارد. لذا استفاده از TEG با هیت سینک نیز تولید برق خالص مجموعه را کاهش خواهد داد.

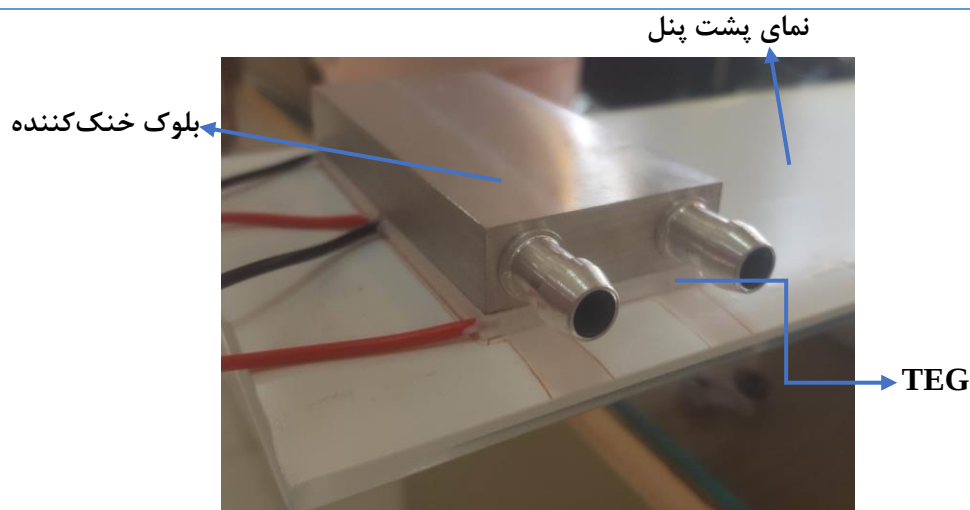


شکل ۴-۱۱ استفاده از TEG با خنک‌کاری بوسیله هوا

۴-۳-۵- استفاده از TEG با خنک‌کاری بوسیله آب

نهایتاً پس از بررسی حالت‌های مختلف در این مرحله برای استفاده از ترموالکتریک در پنل خورشیدی می‌توان از TEG جهت بالا بردن بازده الکتریکی استفاده نمود و با توجه به اینکه می‌بایست سمت گرم (T_h) آن خنک‌کاری صورت گیرد پنل نیز با آب خنک شده و نسبت به پنل مشابه بازده افزایش خواهد یافت. از این رو با انجام آزمایش‌های مختلف در این پژوهش بکارگیری TEG تنها در پنل فتوولتایک حرارتی با سیال آب عملی خواهد بود.

لذا دستگاه آزمایشگاهی نهایی که برای ارزیابی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است مدل ترکیبی PVT-TEG می‌باشد و حرارت جذب شده از پنل توسط ترموالکتریک به بلوک‌های خنک‌کننده دفع شده و به آب منتقل می‌شود که می‌توان از این حرارت نیز استفاده نمود. در شکل (۴-۱۲) نحوه قرارگیری پنل، ترموالکتریک‌ها و بلوک‌های خنک‌کننده در دستگاه آزمایشگاهی نهایی قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به ابعاد بلوک‌ها دو عدد ترموالکتریک زیر هر بلوک قرار گرفته است. در بخش بعد مشخصات دقیق‌تر و نتایج ساخت این مجموعه ارایه خواهد گردید.



شکل ۴-۱۲ نحوه قرار گیری بلوک خنک کننده و TEG در پشت پنل

۴-۴- ارزیابی عملکرد مدل ترکیبی PVT-TEG

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در نهایت استفاده از TEG با خنک‌کاری بوسیله آب به عنوان ترکیب نهایی و با عبارت PVT-TEG انتخاب گردید. از آنجاکه هدف، بررسی تاثیر میزان خنک‌کاری سمت گرم ترموالکتریک‌ها بر سطح پنل می‌باشد و با توجه به هزینه اولیه هر ترموالکتریک، لذا حدود یک سوم از کل سطح پنل با ترموالکتریک و بلوک خنک‌کننده پوشش داده شد و سمت دیگر بلوک‌ها عایق شد. اتصال آب بین بلوک‌ها مطابق شکل (۴-۱۳) سری و اتصال الکتریکی TEG ها نیز ترکیب سری-موازی در نظر گرفته شد. در جدول (۴-۴) مشخصات فنی اجزا قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۳ نمای پشتی ست آب نهایی PVT-TEG

جدول ۴-۴ مشخصات فنی اجزا دستگاه آزمایشگاهی نهایی PVT-TEG

پارامتر	مقدار	واحد
مدل پنل	سفارشی	-
ابعاد پنل	۱۱۰*۱۲۰۰	mm*mm
تعداد سلول	۲۱	-
مدل ترموالکتریک	TEC1-12706	-
ابعاد ترموالکتریک	۴۰*۴۰	mm*mm
تعداد ترموالکتریک	۱۴	-
جنس بلوک خنک کننده	آلومینیوم	-
ابعاد بلوک خنک کننده	۴۰*۸۰	mm*mm
تعداد بلوک خنک کننده	۷	-

پس از طراحی و بررسی ترکیب‌های مختلف قرارگیری TEG و بلوک‌های خنک‌کننده در پشت پنل در نرم افزار CATIA، طرح نهایی انتخاب شد و ترموالکتریک و بلوک به تعداد مورد نیاز خریداری شد. بلوک‌ها و ترموالکتریک‌ها توسط چسب سیلیکونی جهت افزایش انتقال حرارت از پشت پنل به TEG و از TEG به بلوک خنک‌کننده در محل‌های از پیش تعیین شده در پشت پنل چسبانده شد، و سمت دیگر بلوک‌ها عایق گردید.

با توجه به سفارشی بودن پنل‌ها و نداشتن فریم نگهدارنده، T-SLOT آلومینیومی مدل-OBC 2525 و اتصالات مورد نیاز آن از شرکت بلبرینگ اسکویی خریداری و پنل جهت محافظت از ضربه و از بین بردن پیچش جزئی داخل آن ثابت شد. در نهایت جهت شروع آزمایش‌ها ست آپ بر روی سازه‌ی دو درجه آزادی آزمایشگاه انرژی نصب گردید. آزمایش‌ها از فروردین ماه تا شهریور ماه سال ۱۳۹۹

ادامه داشت. همانطور که در شکل (۴-۱۴) مشاهده می شود پنل ساده و PVT-TEG بصورت همزمان و در شرایط یکسان داده برداری شدند.



شکل ۴-۱۴ دستگاه آزمایشگاهی نهایی در مقایسه با پنل ساده

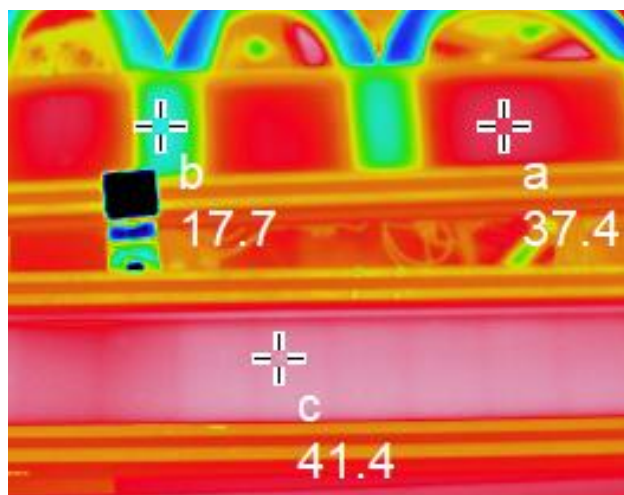
جهت افزایش دقت اندازه گیری همانگونه که در شکل (۴-۱۵) مشاهده می شود در برخی آزمایش ها از سه مولتی متر بصورت همزمان و با خطای تقریبی $\pm 4/95$ درصد در جریان و $\pm 5/06$ درصد در ولتاژ و برای اندازه گیری جریان و ولتاژ ترموالکتریک ها، پنل ساده و پنل PVT-TEG استفاده می گردید.



شکل ۴-۱۵ استفاده همزمان از سه مولتی متر جهت اندازه گیری جریان و ولتاژ

آب ورودی به بلوک های خنک کننده از دو طریق آب لوله کشی برای دماهای ۲۵ درجه سانتیگراد

به بالا و آب همراه با یخ برای دماهای بین صفر تا ۲۰ درجه سانتیگراد که از داخل مخزن پمپ می‌شد، تامین گردید و برای کنترل دبی قبل از ورود به داخل بلوک‌ها شیر تعبیه شد. برای اطمینان از ثابت ماندن دبی آب در طول آزمایش، هر ۱۵ دقیقه دبی خروجی آب اندازه‌گیری می‌شد. شکل (۴-۱۶) عکس دوربین حرارتی پنل PVT-TEG در مقایسه با پنل ساده آورده شده است.



۴-۱۶ مقایسه دمای پنل ساده با پنل PVT-TEG

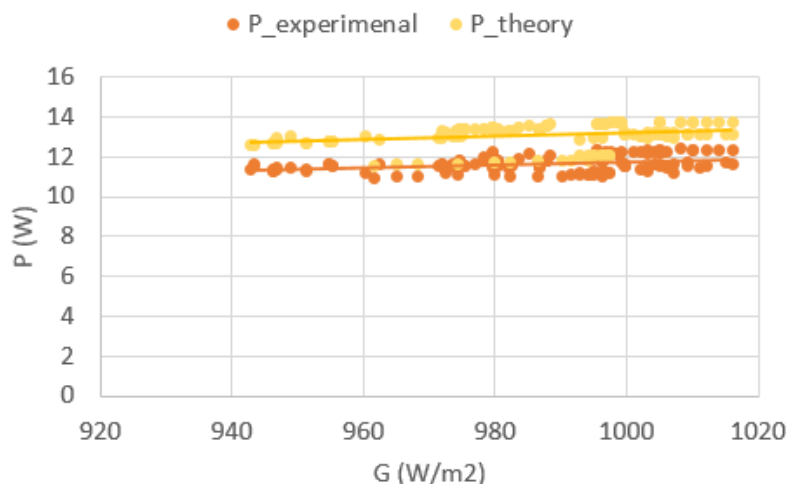
مشاهده می‌شود در زمانیکه دمای سطح پنل ساده $41/4^{\circ}\text{C}$ می‌باشد دمای بخش‌هایی از پنل که با بلوک خنک‌کننده پوشش داده شده است $17/7^{\circ}\text{C}$ و بخش‌هایی که بدون پوشش است $37/4^{\circ}\text{C}$ می‌باشد. و بلوک‌ها باعث کاهش کلی دمای سطح پنل PVT-TEG گردیده و عملکرد پنل به تنهایی نیز بهبود یافته است.

در فصل سوم معادله‌های (۳-۴۴) تا (۳-۶۳) برای مدل‌سازی این مجموعه ارایه گردید. در این بخش با استفاده از آزمایش‌های انجام شده نتایج تئوری و عملی در جدول (۴-۵) با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

جدول ۴-۵ مقایسه آزمایش های عملی و تئوری PVT-TEG

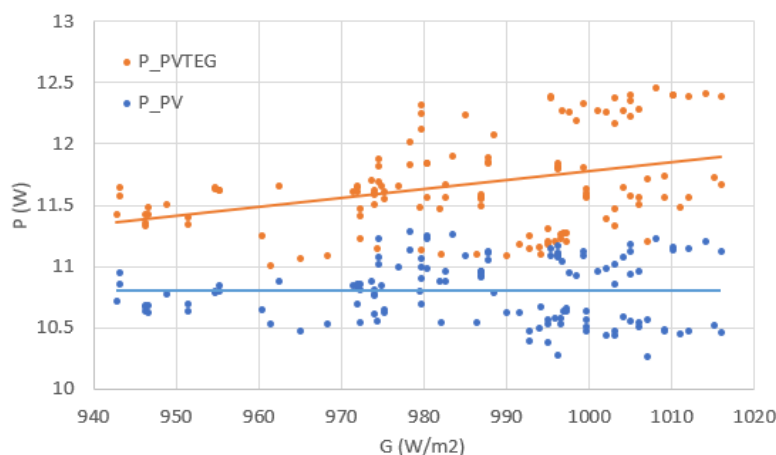
روز و ساعت	$P_{exp}(W)$	$\eta_{exp}(\%)$	$P_{theory}(W)$	$\eta_{theory}(\%)$	$error(\%)$
اول، ۱۲:۰۰	۱۱/۱۵	۱۳/۸۹	۱۱/۷۲	۱۴/۵۹	۵/۰۷
اول، ۱۲:۳۰	۱۱/۱۱	۱۳/۵۵	۱۱/۸۶	۱۴/۴۷	۶/۷۷
دوم، ۱۲:۱۰	۱۲/۳۲	۱۴/۷۷	۱۳/۵۳	۱۶/۲۲	۹/۸۴
دوم، ۱۳:۱۶	۱۲/۲۷	۱۴/۴۴	۱۳/۷۴	۱۶/۱۸	۱۲/۰۱
سوم، ۱۲:۰۰	۱۱/۶۲	۱۳/۹۹	۱۳/۴۰	۱۶/۱۳	۱۵/۳
سوم، ۱۳:۳۸	۱۱/۲۳	۱۳/۵۷	۱۳/۲۱	۱۵/۹۶	۱۷/۶۰
چهارم، ۱۲:۱۵	۱۱/۴۳	۱۴/۱۸	۱۲/۷۰	۱۵/۷۶	۱۱/۱۳
چهارم، ۱۲:۴۲	۱۱/۶۵	۱۴/۵۱	۱۲/۶۸	۱۵/۷۹	۸/۸۴
پنجم، ۱۲:۳۸	۱۱/۵۸	۱۳/۵۹	۱۳/۲۲	۱۵/۵۳	۱۴/۲۱
پنجم، ۱۳:۳۸	۱۱/۲۱	۱۳/۱۶	۱۳/۰۳	۱۵/۳۰	۱۶/۲۶

شکل (۴-۱۷) مقایسه توان تولید شده پنل PVT-TEG در حالت تئوری و عملی می باشد. همانگونه که مشاهده می شود نتایج تئوری بیشتر از عملی می باشد. بر اساس نتایج آن خطای بیشینه حالت تئوری و عملی در پنل PVT-TEG برابر ۱۷/۶۰ درصد و میانگین خطا برابر ۱۱/۷۰ درصد است.



شکل ۴-۱۷ مقایسه توان پنل PVT-TEG در حالت تئوری و عملی نسبت به تابش

همانگونه که در شکل (۴-۱۸) مشاهده می‌شود با توجه به خط روند^۱ دو پنل توان پنل PVT-TEG در مقایسه با پنل ساده با افزایش تابش خورشید، افزایش می‌یابد در حالیکه که توان پنل ساده تقریباً ثابت مانده است. پراکندگی نقاط به دلیل شرایط متغیر آب و هوایی در زمان آزمایش می‌باشد.

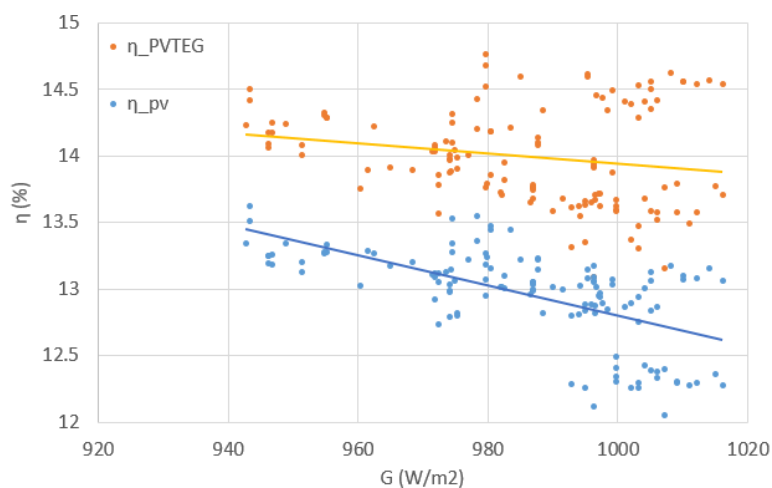


شکل ۴-۱۸ مقایسه توان پنل PVT-TEG با پنل ساده نسبت به تابش

در شکل (۴-۱۹) بازده دو پنل ساده و PVT-TEG در مقایسه با یکدیگر نسبت به تغییرات تابش ترسیم شده است. با توجه به مقایسه خط روند دو پنل، مشخص می‌شود با افزایش تابش و به تبع آن

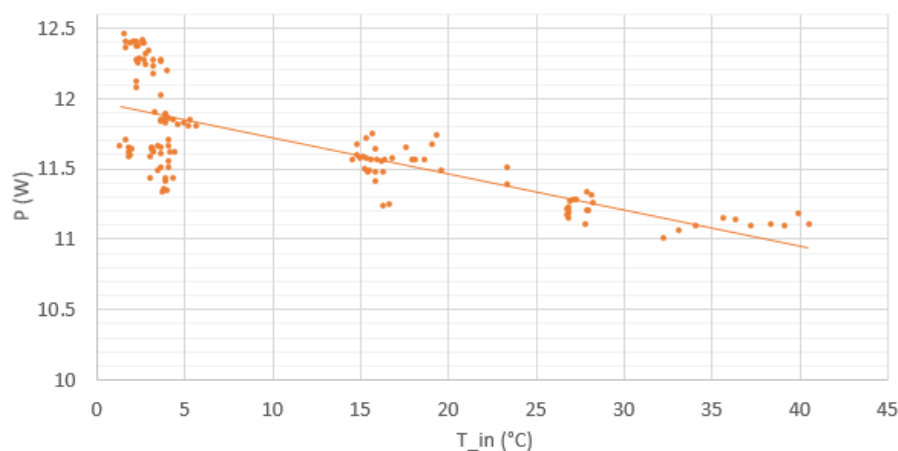
^۱ Trendline

افزایش دمای سطح پنل، پنل PVT-TEG نسبت به پنل ساده، به دلیل اثر خنک‌کنندگی آب و میزان گرمایی که از طریق TEG جذب و به الکتریسیته تبدیل شده است با افت بازده کمتری روبرو خواهد بود.



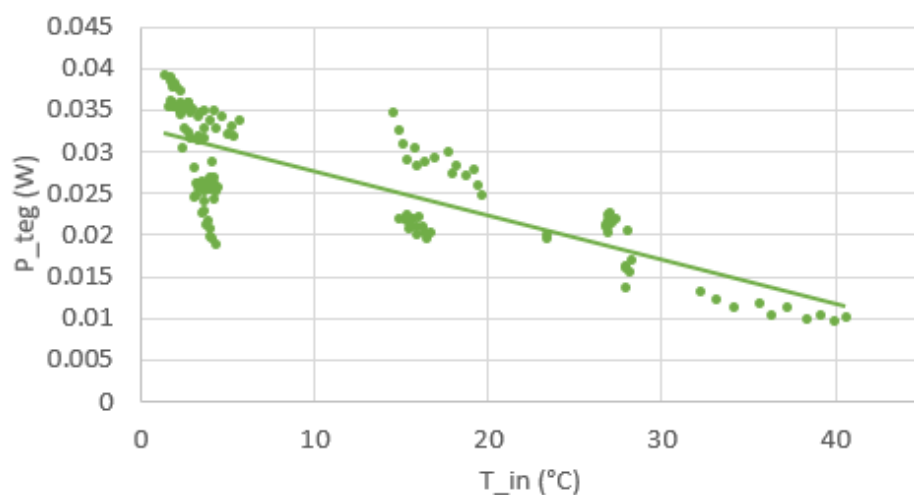
شکل ۴-۱۹ بازده پنل در مقایسه با تابش

در شکل (۴-۲۰) توان تولیدی پنل PVT-TEG نسبت به دمای آب ورودی به بلوک‌های خنک‌کننده که یک سوم از سلول‌ها را پوشش داده است ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای آب ورودی و نزدیک شدن آن به دمای سطح پنل، توان تولید شده نیز کاهش می‌یابد و تقریباً توان تولیدی آن با پنل ساده برابر می‌شود.



شکل ۴-۲۰ تغییرات توان تولیدی پنل PVT-TEG نسبت به دمای آب ورودی به بلوک خنک‌کننده

در شکل (۴-۲۱) توان تولید شده ترموالکتریک‌ها در مقایسه با دمای آب ورودی ترسیم شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای آب ورودی و کاهش اختلاف دمای دو سطح سرد و گرم ترموالکتریک میزان تولید آن نیز به شدت کاهش می‌یابد. توان بیشینه تولید شده چهارده عدد ترموالکتریک در اختلاف دمای حدود ۱۰ درجه سانتیگراد زمانیکه دمای سمت سرد ۱/۵ درجه سانتیگراد و دمای سمت گرم آن ۱۱/۵ درجه سانتیگراد می باشد حدود ۰/۰۴ وات است. و در صورتیکه بتوان این اختلاف دما را به طریقی افزایش داد، توان تولید شده به مراتب خیلی بیشتر خواهد شد.



شکل ۴-۲۱ توان تولیدی ترموالکتریک نسبت به دمای آب ورودی به بلوک خنک کننده

هرچند به نظر می آید با این میزان پوشش دهی توان تولید شده ترموالکتریک‌ها به نسبت توان تولید شده پنل پایین می‌باشد ولی توجه به این نکته که همین مقدار پوشش دهی با ترموالکتریک در حالت بیشینه باعث افزایش تولید توان ۱۲/۵۱ درصدی پنل PVT-TEG نسبت به پنل ساده گردید.

۵- فصل پنجم

تحلیل پارامتری سیستم PVT-TEG

۱-۵- مقدمه

در این پژوهش به مدل سازی در فصل سوم و بررسی تجربی خنک کاری پنل های فتوولتائیک با استفاده از ماژول های ترموالکتریک TEC/TEG در فصل چهارم پرداخته شد. پس از بررسی حالت های مختلف خنک کاری و روش های متفاوت بکارگیری ترموالکتریک ها در ترکیب با پنل های فتوولتائیک، در مورد مدل سازی و معادله های حاکم بر اجزای مختلف آن بحث گردید. در ادامه به اعتبار سنجی نتایج حاصل از مدل سازی تئوری که با استفاده از نرم افزار MATLAB بدست آمده است با نتایج عملی پرداخته می شود. با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته برای مدل ترکیبی PVT-TEG در بخش قبل، در این بخش با استفاده از تحلیل پارامتری اثر متغیرهای مختلف بر روی عملکرد این سیستم ترکیبی ارایه می گردد.

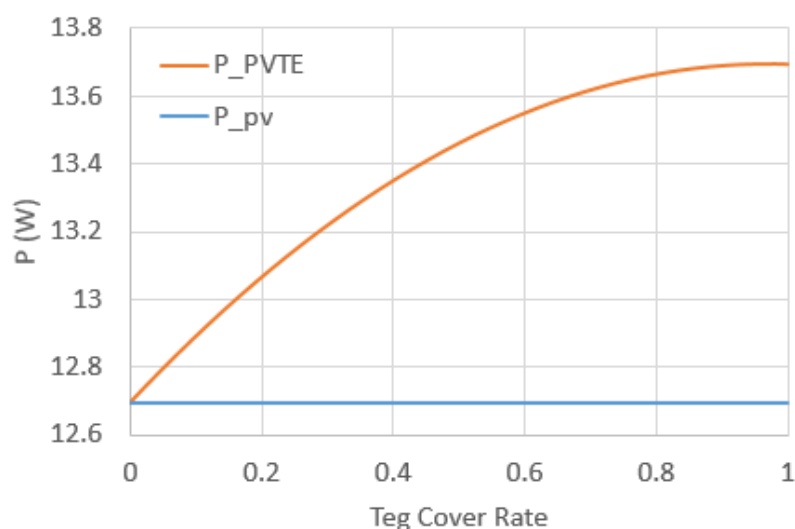
برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف (شدت تابش، دمای محیط، سرعت باد، دمای آب ورودی، سرعت آب در بلوک خنک کننده، میزان پوشش دهی با ترموالکتریک) بر میزان تولید توان پنل و ترموالکتریک، مقادیر اولیه برای تحلیل پارامتری مطابق جدول (۱-۵) می باشد.

جدول ۱-۵ مقادیر ثابت پارامترهای مختلف در تحلیل پارامتری

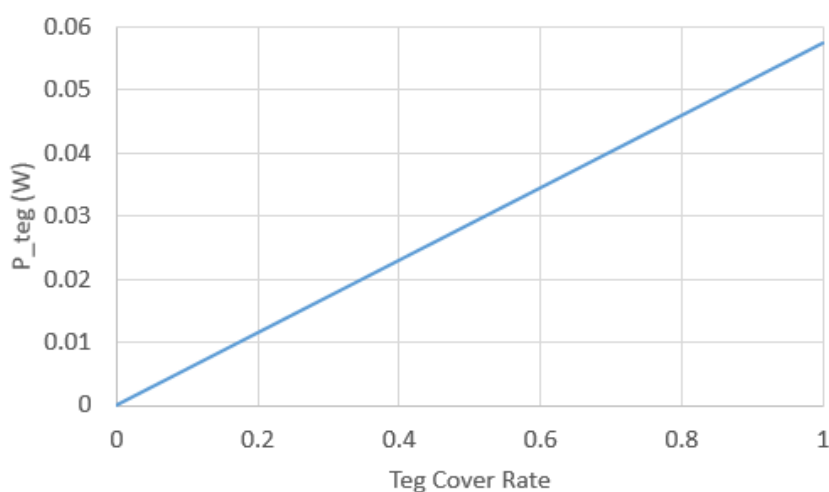
پارامتر	نماد	مقدار	واحد
میزان پوشش دهی با ترموالکتریک	C_{teg}	۱۰۰	%
شدت تابش	G	۱۰۰۰	W/m^2
دمای محیط	T_{amb}	۲۵	$^{\circ}C$
سرعت باد	u_{wind}	۲	m/s
دمای آب ورودی	T_{in}	۲۰	$^{\circ}C$
سرعت آب در بلوک خنک کننده	u_{water}	۰/۵	m/s

۲-۵- تاثیر میزان پوشش دهی سطح پنل با ترموالکتریک

یک سوم سلول های پنل ترکیبی PVT-TEG با ترموالکتریک پوشیده شده است و حداکثر تعداد ترموالکتریکی که می توان در پشت پنل استفاده نمود ۴۲ عدد می باشد. در شکل (۱-۵) و (۲-۵) تاثیر میزان این پوشش دهی بر توان تولیدی پنل ترکیبی و ترموالکتریک مشاهده می شود.



شکل ۱-۵ تاثیر تغییرات پوشش دهی با ترموالکتریک بر توان پنل ترکیبی PVT-TEG

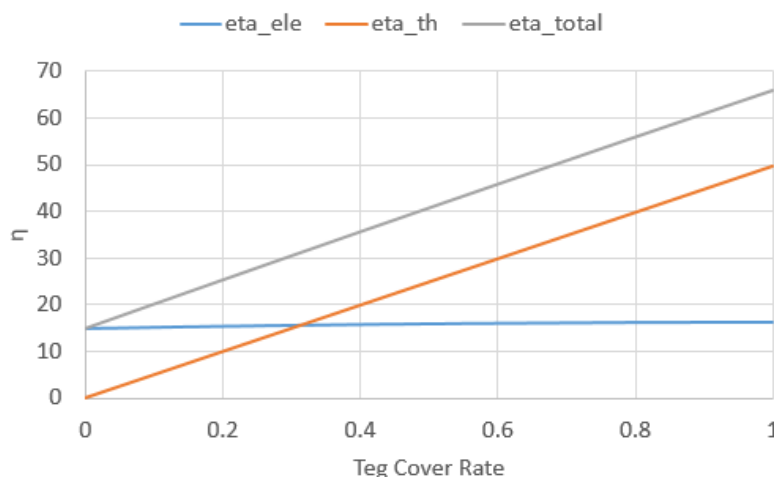


شکل ۲-۵ تاثیر تغییرات پوشش دهی با ترموالکتریک بر توان ترموالکتریک

همانطور که مشخص است هرچقدر تعداد ترموالکتریک افزایش می یابد توان تولید شده پنل ترکیبی و ترموالکتریک نیز افزایش می یابد. در شکل (۱-۵) صرفاً جهت راحت تر شدن مقایسه توان

تولید شده پنل ترکیبی، توان پنل ساده نیز که مقداری ثابت دارد نیز اضافه گردیده است. توان الکتریکی تولید شده در پنل ترکیبی نسبت به پنل ساده در پوشش کامل با ترموالکتریک، حدود ۷/۶۶ درصد افزایش یافته است. از طرفی این شکل نشان می‌دهد که تغییرات توان در ابتدا زیاد بوده که عامل آن پایین آمدن دمای متوسط کل پنل و سلول‌های خورشیدی است. در پوشش‌دهی بالاتر از ۸۰ درصد توان الکتریکی پنل افزایش کمی خواهد داشت.

در شکل (۳-۵) بازده الکتریکی، بازده حرارتی و بازده کل پنل PVT-TEG نسبت به میزان پوشش‌دهی ترموالکتریک مشاهده می‌شود.

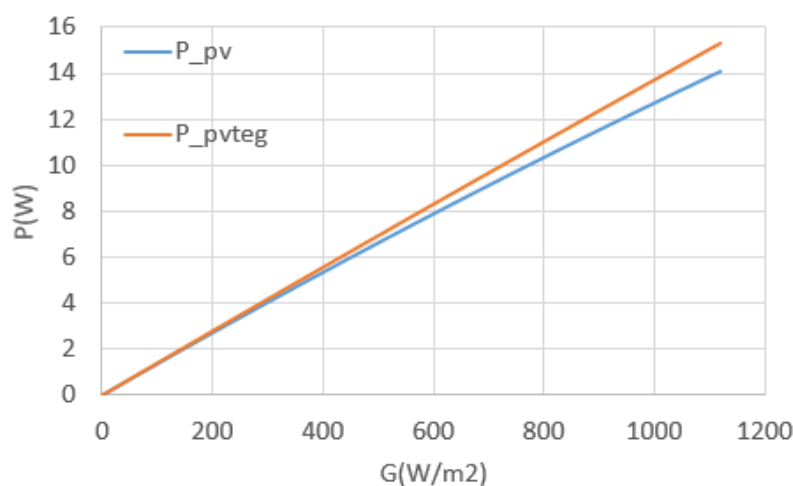


شکل ۳-۵ بازده پنل PVT-TEG نسبت به میزان پوشش‌دهی

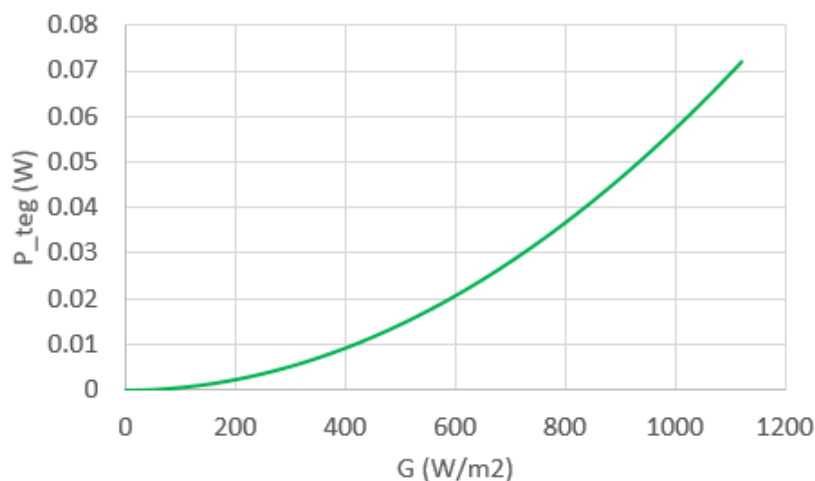
همانگونه که مشاهده می‌شود بازده کل سیستم PVT-TEG شامل دو بخش الکتریکی و حرارتی می‌باشد و در حالت پوشش کامل، بازده الکتریکی ۱۶/۱۴ درصد و بازده حرارتی ۴۹/۷۱ درصد می‌باشد. در مقایسه با پنل ساده که بازده کل آن تنها بازده الکتریکی و مقدار آن ۱۴/۹۰ درصد می‌باشد بازده کلی سیستم افزایش چشم‌گیری دارد علاوه بر آن با مقایسه بازده الکتریکی دو پنل نیز مشاهده می‌شود ۸/۳۲ درصد توان الکتریکی پنل PVT-TEG نسبت به پنل ساده افزایش یافته است.

۳-۵- تاثیر شدت تابش

در شکل (۴-۵) و (۵-۵) تغییرات تابش از ۰ تا ۱۱۰۰ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است و میزان تاثیر شدت تابش بر توان تولیدی پنل ساده، پنل ترکیبی و ترموالکتریک با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۴-۵ تاثیر شدت تابش بر توان پنل ساده و PVT-TEG



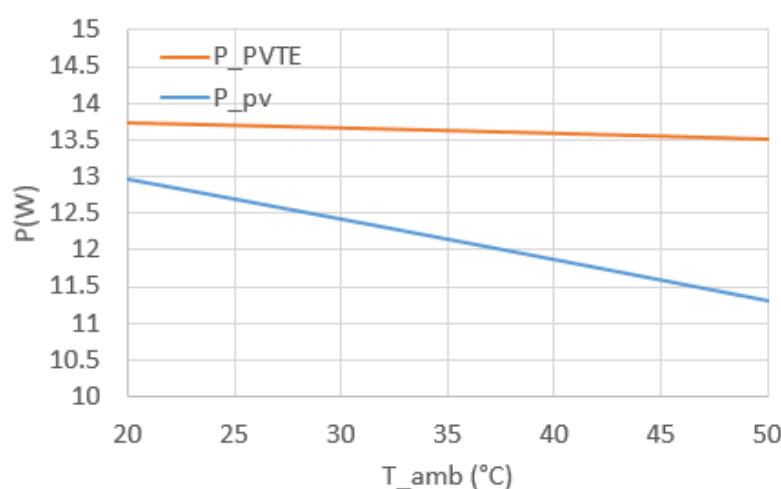
شکل ۵-۵ تاثیر شدت تابش بر توان تولیدی ترموالکتریک

همانگونه که در شکل (۴-۵) مشاهده می‌شود تا تابش ۴۰۰ وات بر مترمربع تولید توان دو پنل تقریباً یکسان می‌باشد و در تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع تولید توان پنل PVT-TEG به تنهایی ۷/۶۶

درصد در مقایسه با پنل ساده افزایش یافته است. و توان تولیدی ترموالکتریک در همان تابش ۰/۰۵۷ وات می باشد.

۴-۵- تاثیر دمای محیط

تاثیر تغییرات دمای محیط از ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتیگراد بر توان تولیدی پنل ساده، پنل ترکیبی در شکل (۵-۶) قابل مشاهده است.

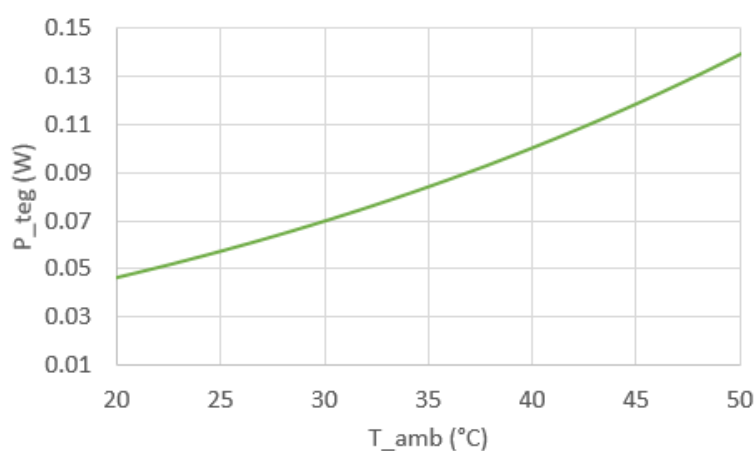


شکل ۵-۶ تاثیر دمای محیط بر توان پنل ساده و PVT-TEG

با توجه به اینکه در تحلیل پارامتری دمای آب ورودی در پنل ترکیبی ۲۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است به همین دلیل بازه دمای محیط نیز از همان دما در نظر گرفته می شود زیرا در دمای پایین تر از آن عملاً با ورود آب، دمای سطح پنل افزایش می یابد.

همانگونه که مشاهده می شود افت تولید توان در پنل ساده در مقایسه با پنل PVT-TEG با افزایش دمای محیط بسیار شدید است و در فصول گرم سال که دمای محیط به ۴۰ تا ۴۵ درجه سانتیگراد نیز می رسد تاثیر روش بکار گرفته شده در ساخت پنل PVT-TEG قابل توجه است، بطوری که مقایسه توان تولیدی دو پنل در دمای ۴۵ درجه سانتیگراد حدود ۱۷/۸۶ درصد اختلاف نسبت به

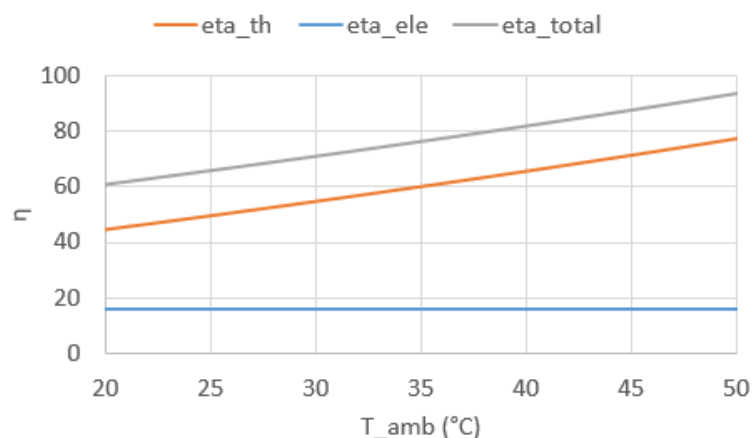
یکدیگر را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۷ تاثیر دمای محیط بر توان ترموالکتریک

همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای محیط و به طبع آن افزایش دمای سلول توان تولیدی پنل‌ها در حال کاهش ولیکن به دلیل افزایش اختلاف دما در دو سطح سرد و گرم ترموالکتریک، توان تولیدی آن در حال افزایش است. توان تولید شده ترموالکتریک در فصول گرم سال که دمای محیط تا ۴۵ درجه سانتیگراد نیز می‌رسد تا ۰/۱۲ وات افزایش می‌یابد.

در شکل (۵-۸) تاثیر دمای محیط بر بازده حرارتی، الکتریکی و کل سیستم PVT-TEG مشاهده می‌شود.

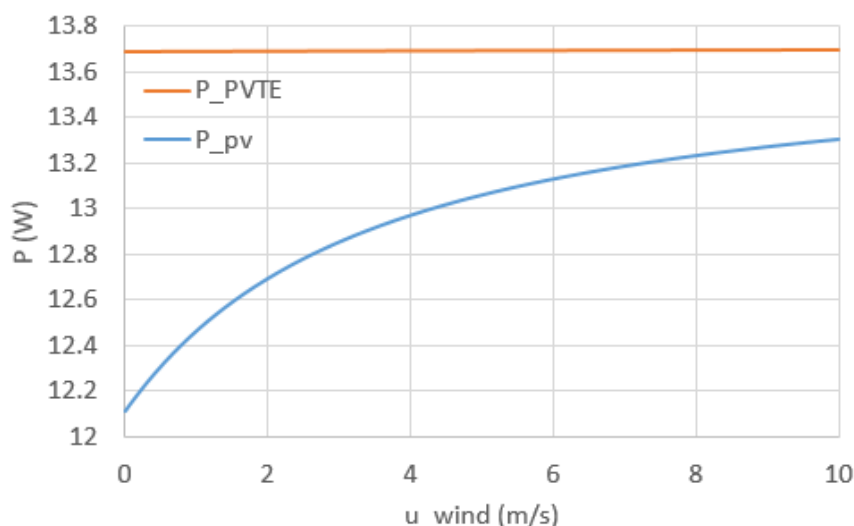


شکل ۵-۸ تاثیر دمای محیط بر بازده سیستم PVT-TEG

همانگونه که از شکل (۵-۸) نیز مشخص است بازده الکتریکی پنل PVT-TEG با افزایش دمای محیط و ثابت بودن باقی پارامترها تغییر زیادی ندارد ولیکن بازده حرارتی در محدوده دمای ۲۰ تا ۴۵ درجه سانتیگراد ۲۱/۷۶ درصد افزایش می‌یابد که تاثیر به سزایی در افزایش بازده کلی سیستم ایفا می‌کند.

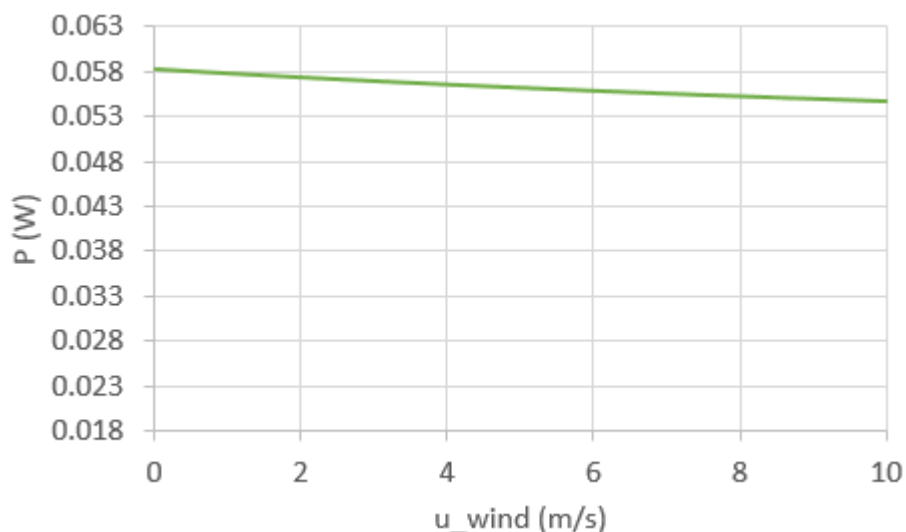
۵-۵- تاثیر سرعت باد

در شکل (۵-۹) و (۵-۱۰) تاثیر تغییرات سرعت باد از ۰ تا ۱۰ متر بر ثانیه بر توان تولیدی پنل ساده و ترکیبی و ترموالکتریک مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۵-۹ تاثیر سرعت باد بر توان تولیدی پنل ساده و PVT-TEG

همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت باد دمای سطح پنل ساده خنک‌تر شده بطوری که در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه نسبت به حالتی که سرعت باد صفر است ۹/۸۲ درصد افزایش می‌یابد در مقابل پنل PVT-TEG در همین بازه ۰/۰۷۹ درصد افزایش تولید توان خواهد داشت. لذا تاثیر باد بر تولید توان پنل ساده تاثیر به‌سزایی خواهد داشت. با این وجود در سرعت ۱۰ متر بر ثانیه نیز اختلاف تولید توان در دو پنل ۳/۳۷ درصد است.

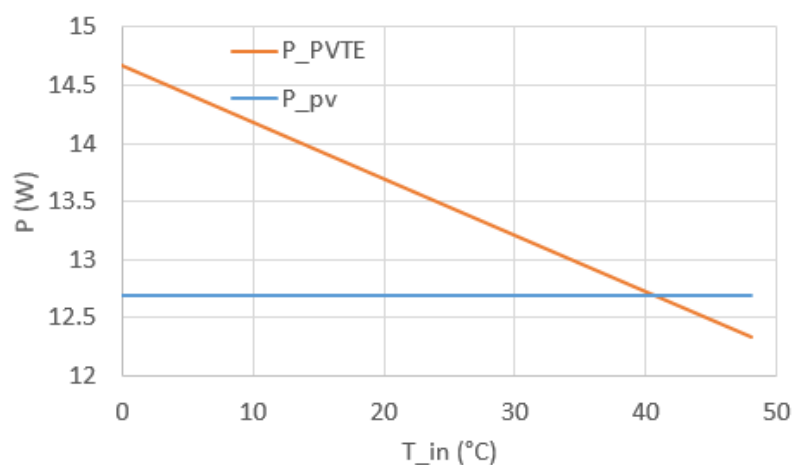


شکل ۵-۱۰ تاثیر تغییرات سرعت باد بر توان ترموالکتریک

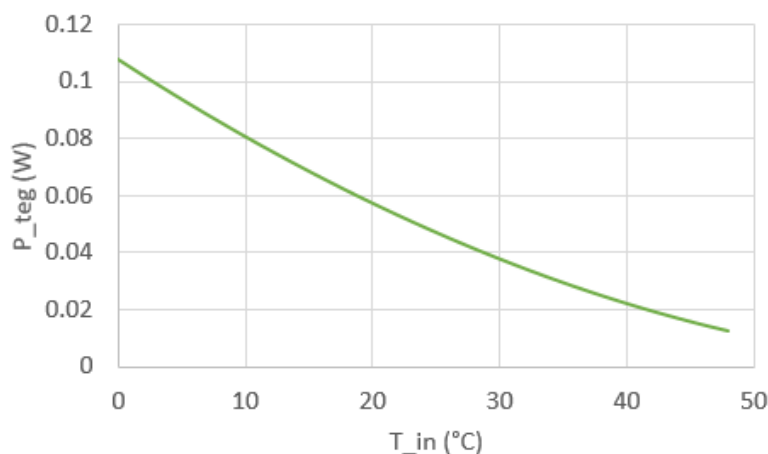
توان تولیدی ترموالکتریک همانگونه که در شکل (۵-۱۰) مشاهده می شود نیز با افزایش سرعت باد و به دلیل خنک شدن سطح پنل، ۶/۲۵ درصد کاهش می یابد.

۵-۶- تاثیر دمای آب ورودی

تاثیر تغییرات دمای آب ورودی از ۰ تا ۴۸ درجه سانتیگراد در شکل (۵-۱۱) و (۵-۱۲) بروی توان تولیدی پنل PVT-TEG و ترموالکتریک نشان داده شده است و صرفاً برای مقایسه راحت تر بین پنل ساده و پنل PVT-TEG، توان تولیدی پنل ساده نیز در شکل (۵-۱۱) ترسیم شده است.



شکل ۵-۱۱ تاثیر تغییرات دمای آب ورودی بر تولید توان پنل PVT-TEG

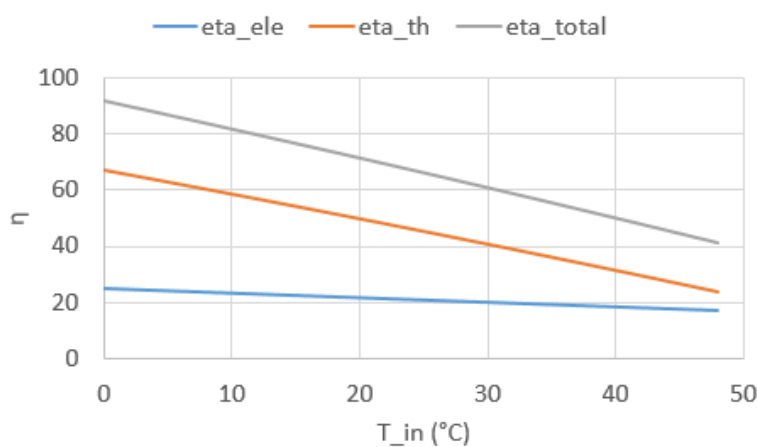


شکل ۵-۱۲ تاثیر تغییرات دمای آب ورودی بر توان ترموالکتریک

همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش دمای آب ورودی توان تولیدی پنل ترکیبی به دلیل افزایش دمای سلول کاهش می‌یابد تا جایی که در دمای آب ورودی ۴۰ درجه سانتیگراد به بالا توان تولیدی آن نسبت به پنل ساده کمتر خواهد شد و توان ترموالکتریک نیز به دلیل کاهش اختلاف دمای سطح سرد و گرم آن کاهش می‌یابد. زمانی که آب صفر درجه سانتیگراد داخل بلوک خنک‌کننده وارد می‌شود بیشینه‌ی تولید توان در پنل PVT-TEG به ۱۴/۷۸ وات می‌رسد.

شکل (۵-۱۳) تاثیر دمای آب ورودی به بلوک خنک‌کننده بر بازده پنل PVT-TEG مشاهده

می‌شود.

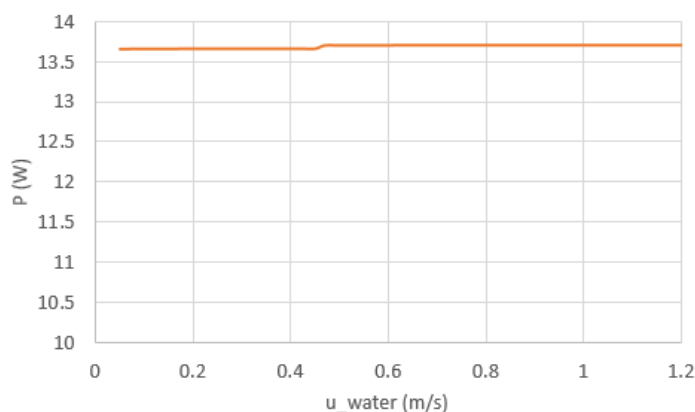


شکل ۵-۱۳ تاثیر دمای آب ورودی به بلوک خنک‌کننده بر بازده PVT-TEG

از شکل (۵-۱۳) واضح است که افزایش دمای آب ورودی به بلوک خنک‌کننده به دلیل بالا رفتن دمای سطح پنل تاثیر عکس بر بازده الکتریکی، حرارتی و کلی سیستم PVT-TEG خواهد داشت ولی بیشتر تاثیر را بر بازده حرارتی خواهد داشت بطوری که در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد نسبت به دمای صفر درجه سانتیگراد ۵۲/۷۱ درصد کاهش می‌یابد. ولی بازده الکتریکی در همین بازه ۱۳/۷۶ درصد کاهش می‌یابد.

۵-۷- تاثیر سرعت آب در بلوک خنک‌کننده

در این بخش تاثیر سرعت آب داخل بلوک خنک‌کننده بر توان تولیدی پنل ترکیبی و ترموالکتریک در شکل (۵-۱۴) و (۵-۱۵) بررسی می‌شود. بازه ی تغییرات سرعت از ۰/۰۵ تا ۱/۲ متر بر ثانیه داخل بلوک خنک‌کننده در نظر گرفته شده است. جریان داخل کانال ابتدا آرام^۱ بوده و سپس با افزایش سرعت آشفته^۲ می‌شود.

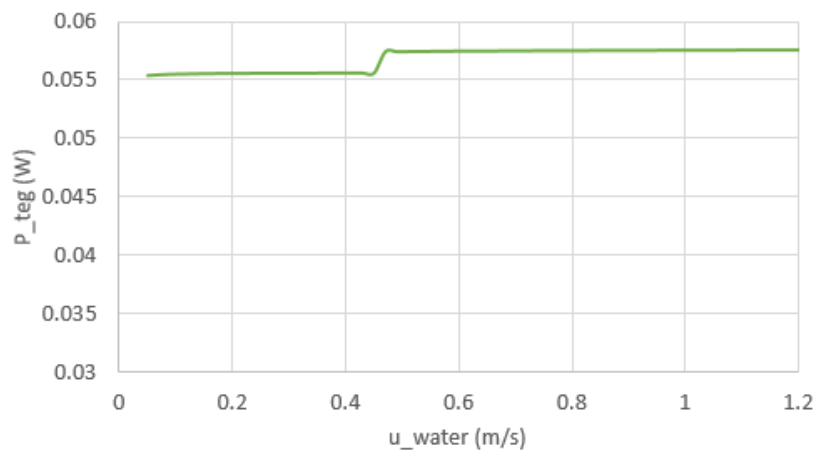


شکل ۵-۱۴ تاثیر تغییرات سرعت آب داخل بلوک خنک‌کننده بر توان پنل PVT-TEG

همانگونه که مشاهده می‌شود توان تولید شده در قبل و بعد از ۰/۴۶ متر بر ثانیه که جریان از آرام به آشفته تبدیل می‌شود تقریباً مقدار ثابتی دارد و تفاوت اختلاف تولید توان در قبل و بعد از آن ۰/۳ درصد می‌باشد.

^۱ Laminar Flow

^۲ Turbulent Flow



شکل ۵-۱۵ تاثیر تغییرات سرعت آب داخل بلوک خنک کننده بر توان ترموالکتریک

زمانیکه که سرعت آب داخل بلوک خنک کننده افزایش می یابد و جریان آشفته می شود تولید توان ترموالکتریک ۳/۲۷ درصد افزایش می یابد پس بهتر است جریان بصورت آشفته باشد که تولید توان کلی به میزان ۳/۵۷ درصد افزایش یابد.

۶- فصل ششم

نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات

۱-۶- نتیجه گیری

هدف از انجام این پژوهش امکان سنجی عملی و ارزیابی بکارگیری حالت‌های مختلف ترکیب TEC و TEG با پنل فتوولتایک به منظور خنک کاری و افزایش بازده کلی یک سیستم تولید برق خورشیدی می‌باشد. برای افزایش قابلیت اطمینان ابتدا اجزای مختلف شامل شدت تابش خورشید، پنل ساده، ضریب پُری و ترموالکتریک بصورت جداگانه در نرم افزار MATLAB مدل شد و نتایج حاصل از مدل ریاضی با مقادیر عملی اندازه گیری شده اعتبارسنجی گردید. خلاصه این نتایج در جدول ۱-۶ ارائه شده است که همانطور که مشاهده می شود نشان دهنده دقت بالای مدل انتخاب شده برای اجزا است.

جدول ۱-۶ خلاصه نتایج اعتبارسنجی اجزا

ردیف	پارامتر	بیشینه خطا (%)	متوسط خطا (%)
۱	شدت تابش خورشید	۵/۷۶	۳/۸
۲	پنل فتوولتایک ساده	۲۰/۴۸	۱۲/۷۶
۳	ولتاژ ترموالکتریک	۱۶/۶۹	۷/۰۹
۴	حرارت پمپ شده ترموالکتریک	۴/۱۵	۲/۱۱

سپس با در نظر گرفتن تئوری بیان شده توسط محققین مختلف در زمینه ترکیب پنل فتوولتایک و ترموالکتریک TEC و TEG آزمایش‌هایی برای امکان سنجی عملی این نظریه‌ها جهت دستیابی به مدل نهایی انجام گردید. این حالتها عبارت‌اند از:

- استفاده از TEC بصورت مستقیم در پشت پنل: محدوده‌ی خنک کاری کم و مصرف بالا.
 - استفاده از TEC و TEG بصورت چسبیده به یکدیگر: عدم دفع حرارت از TEC.
 - استفاده از TEG بدون خنک کاری: به صفر رسیدن تولید توان بعد از مدت کوتاه.
 - استفاده از TEG با خنک کاری بوسیله جریان هوای اجباری: تولید پایین TEG، مصرف فن.
 - استفاده از TEG با خنک کاری بوسیله آب: خنک شدن پنل و افزایش تولید پنل و TEG.
- در بین گزینه‌های بررسی شده تنها استفاده از روش آخر یعنی استفاده از TEG در ترکیب با PVT برای

بکارگیری ترموالکتریک پشت پنل فتوولتاییک توصیه می‌گردد. لذا بر این اساس مدل ریاضی برای این حالت استخراج گردید و در نرم افزار MATLAB مدل شد.

پس از اتمام طراحی و ساخت دستگاه، آزمایش‌های عملی روی سیستم ترکیبی PVT-TEG و بطور همزمان بر روی پنل ساده انجام شد. آزمایش‌ها از اردیبهشت تا شهریور سال ۱۳۹۹ با در نظر گرفتن شرایط مختلف از جمله دمای آب ورودی، دبی آب ورودی، دمای محیط، سرعت باد و شدت تابش متفاوت (آزمایش روزانه از ساعت ۹ الی ۱۷) صورت گرفت. در نهایت برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در فصل پنجم به تحلیل پارامتری با در نظر گرفتن شرایط جدول (۶-۲) پرداخته شد.

جدول ۶-۲ مقادیر ثابت پارامترهای مختلف در تحلیل پارامتری

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
میزان پوشش دهی با ترموالکتریک	C_{teg}	۱۰۰	%
شدت تابش	G	۱۰۰۰	W/m^2
دمای محیط	T_{amb}	۲۵	$^{\circ}C$
سرعت باد	u_{wind}	۲	m/s
دمای آب ورودی	T_{in}	۲۰	$^{\circ}C$
سرعت آب در بلوک خنک کننده	u_{water}	۰/۵	m/s

۶-۲-۲ ارائه پیشنهادات

۱. استفاده از یک واحد تولید توان مجزای TEG جهت تامین توان مورد نیاز TEC‌هایی که وظیفه‌ی خنک‌کاری پنل فتوولتاییک را بر عهده دارد.

۲. بررسی استفاده از سیال‌های دیگر در بلوک خنک‌کننده

۳. استفاده از ترموالکتریک در سیستم‌های متمرکزکننده فتوولتاییک

1. Hu, J., et al., *Energy performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermal system on hot and cold days*. Applied energy, 2016. **173**: p. 40-51.
2. Siecker, J., K. Kusakana, and B. Numbi, *A review of solar photovoltaic systems cooling technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **79**: p. 192-203.
3. Goetzberger, A., C. Hebling, and H.-W. Schock, *Photovoltaic materials, history, status and outlook*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2003. **40**(1): p. 1-46.
4. Plakhotnyuk, M., *Nanostructured Heterojunction Crystalline Silicon Solar Cells with Transition Metal Oxide Carrier Selective Contacts*. 2018.
5. NREL. *best research cell efficiencies*. 2020; Available from: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
6. Li, Y. and C. Liu, *Techno-economic analysis for constructing solar photovoltaic projects on building envelopes*. Building and Environment, 2018. **127**: p. 37-46.
7. Wu, Y.-Y., S.-Y. Wu, and L. Xiao, *Performance analysis of photovoltaic–thermoelectric hybrid system with and without glass cover*. Energy Conversion and Management, 2015. **93**: p. 151-159.
8. Virtuani, A., D. Pavanello, and G. Friesen. *Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies*. in *25th European photovoltaic solar energy conference and exhibition/5th World conference on photovoltaic energy conversion*. 2010.
9. Ullah, K., et al., *A review of solar thermal refrigeration and cooling methods*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **24**: p. 499-513.
10. Nižetić, S., et al., *Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response*. Energy conversion and management, 2016. **108**: p. 287-296.
11. Kianifard, S., M. Zamen, and A.A. Nejad, *Modeling, designing and fabrication of a novel PV/T cooling system using half pipe*. Journal of Cleaner Production, 2020. **253**: p. 119972.
12. Tonui, J. and Y. Tripanagnostopoulos, *Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation*. Renewable energy, 2007. **32**(4): p. 623-637.
13. Arifin, Z., et al., *Numerical and Experimental Investigation of Air Cooling for Photovoltaic Panels Using Aluminum Heat Sinks*. International Journal of Photoenergy, 2020. **2020**: p. 1574274.
14. Mazón-Hernández, R., et al., *Improving the electrical parameters of a photovoltaic panel by means of an induced or forced air stream*. International Journal of Photoenergy, 2013. **2013**.
15. Li, Z., et al., *Experimental study and performance analysis on solar photovoltaic panel integrated with phase change material*. Energy, 2019. **178**: p. 471-486.
16. Mehrotra, S., et al., *Performance of a solar panel with water immersion cooling technique*. International Journal of Science, Environment and Technology, 2014. **3**(3): p. 1161-1172.
17. Xi, H., L. Luo, and G. Fraisse, *Development and applications of solar-based thermoelectric technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(5): p. 923-936.
18. Riffat, S.B. and X. Ma, *Thermoelectrics: a review of present and potential applications*. Applied thermal engineering, 2003. **23**(8): p. 913-935.
19. Systems, L.T. *Thermoelectric Coolers*. 2020; Available from:

<https://www.lairdthermal.com/thermal-technical-library/application-notes/thermoelectric-modules-and-assemblies-medical-applications>.

20. Van Sark, W., *Feasibility of photovoltaic–thermoelectric hybrid modules*. Applied Energy, 2011. **88**(8): p. 2785-2790.
21. Uchida, K., et al., *Observation of the spin Seebeck effect*. Nature, 2008. **455**(7214): p. 778-781.
22. Flipse, J., et al., *Direct observation of the spin-dependent Peltier effect*. Nature nanotechnology, 2012. **7**(3): p. 166-168.
23. ABC, S. *What Are The Seebeck Effect And The Peltier Effect?* 2020; Available from: <https://www.scienceabc.com/pure-sciences/what-are-the-seebeck-effect-and-peltier-effect.html>.
24. Rowe, D.M., *CRC handbook of thermoelectrics*. 2018: CRC press.
25. worldwide, F., *Thermoelectric Modules*, F. worldwide, Editor. 2013.
26. Radziemska, E., *The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells*. Renewable energy, 2003. **28**(1): p. 1-12.
27. Meng, F., L. Chen, and F. Sun, *A numerical model and comparative investigation of a thermoelectric generator with multi-irreversibilities*. Energy, 2011. **36**(5): p. 3513-3522.
28. Wang, P., B. Wang, and J. Li, *Temperature and performance modeling of thermoelectric generators*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019. **143**: p. 118509.
29. Sun, D., et al., *Modeling and analysis of the influence of Thomson effect on micro-thermoelectric coolers considering interfacial and size effects*. Energy, 2020. **196**: p. 117116.
30. Meng, F., L. Chen, and F. Sun, *Performance analysis for two-stage TEC system driven by two-stage TEG obeying Newton's heat transfer law*. Mathematical and computer modelling, 2010. **52**(3-4): p. 586-595.
31. Lin, L., et al., *A new configuration design of thermoelectric cooler driven by thermoelectric generator*. Applied Thermal Engineering, 2019. **160**: p. 114087.
32. Manikandan, S. and S. Kaushik, *Thermodynamic studies and maximum power point tracking in thermoelectric generator–thermoelectric cooler combined system*. Cryogenics, 2015. **67**: p. 52-62.
33. Benganem, M., A. Al-Mashraqi, and K. Daffallah, *Performance of solar cells using thermoelectric module in hot sites*. Renewable Energy, 2016. **89**: p. 51-59.
34. Lamba, R. and S. Kaushik, *Modeling and performance analysis of a concentrated photovoltaic–thermoelectric hybrid power generation system*. Energy Conversion and Management, 2016. **115**: p. 288-298.
35. Makki, A., et al., *Numerical investigation of heat pipe-based photovoltaic–thermoelectric generator (HP-PV/TEG) hybrid system*. Energy conversion and management, 2016. **112**: p. 274-287.
36. Teffah, K. and Y. Zhang, *Modeling and experimental research of hybrid PV-thermoelectric system for high concentrated solar energy conversion*. Solar Energy, 2017. **157**: p. 10-19.
37. Kane, A., V. Verma, and B. Singh, *Optimization of thermoelectric cooling technology for an active cooling of photovoltaic panel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **75**: p. 1295-1305.

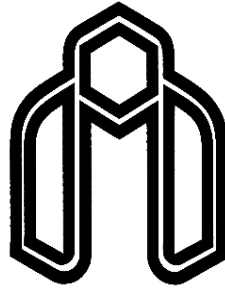
38. Dimri, N., A. Tiwari, and G. Tiwari, *Effect of thermoelectric cooler (TEC) integrated at the base of opaque photovoltaic (PV) module to enhance an overall electrical efficiency*. Solar Energy, 2018. **166**: p. 159-170.
39. Daghigh, R. and Y. Khaledian, *Effective design, theoretical and experimental assessment of a solar thermoelectric cooling-heating system*. Solar Energy, 2018. **162**: p. 561-572.
40. Li, G., et al., *Comparative analysis of thermoelectric elements optimum geometry between photovoltaic-thermoelectric and solar thermoelectric*. Energy, 2019. **171**: p. 599-610.
41. Kalogirou, S.A., *Solar energy engineering: processes and systems*. 2013: Academic Press.
42. Hottel, H.C., *Performance of flat-plate solar heat collectors*. Trans. ASME 64, 1942. **91**.
43. Gu, W., et al., *Mathematical modelling and performance evaluation of a hybrid photovoltaic-thermoelectric system*. Energy Conversion and Management, 2019. **198**: p. 111800.
44. Bergman, T.L., et al., *Fundamentals of heat and mass transfer*. 2011: John Wiley & Sons.
45. He, Z., et al., *Simultaneous enhancement of open-circuit voltage, short-circuit current density, and fill factor in polymer solar cells*. Advanced Materials, 2011. **23**(40): p. 4636-4643.
46. Khezzar, R., M. Zereg, and A. Khezzar, *Modeling improvement of the four parameter model for photovoltaic modules*. Solar Energy, 2014. **110**: p. 452-462.
47. Gould, C., et al. *A comprehensive review of thermoelectric technology, micro-electrical and power generation properties*. in 2008 26th International Conference on Microelectronics. 2008. IEEE.
48. He, W., et al., *Recent development and application of thermoelectric generator and cooler*. Applied Energy, 2015. **143**: p. 1-25.
49. Mahmoudi, H., et al., *Thermoelectric cooling micro-inverter for PV application*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018. **180**: p. 311-321.
50. Tonui, J. and Y. Tripanagnostopoulos, *Performance improvement of PV/T solar collectors with natural air flow operation*. Solar energy, 2008. **82**(1): p. 1-12.
51. Bell, L.E., *Cooling, heating, generating power, and recovering waste heat with thermoelectric systems*. Science, 2008. **321**(5895): p. 1457-1461.
52. Yin, E., Q. Li, and Y. Xuan, *Thermal resistance analysis and optimization of photovoltaic-thermoelectric hybrid system*. Energy Conversion and Management, 2017. **143**: p. 188-202.

Abstract:

The use of photovoltaic panels to generate electricity in the world is growing. Due to the fact that their efficiency decreases with increasing temperature, so as to improve the efficiency of these systems, the temperature of photovoltaic cells should be reduced as much as possible. For cooling photovoltaic panels, methods such as spraying water on the panel, using fluids such as circulating water behind the panel, using natural and forced air movement, phase change materials, Nanofluids, immersion in water, using thermoelectric and etc. has been suggested and sometimes implemented. In this research, a comprehensive practical and theoretical study on the application of thermoelectric technology in the cooling of photovoltaic panels has been done. In order to evaluate the use of thermoelectric and its combination with the photovoltaic panels, various methods such as using TEC directly behind the panel, using TEC and TEG attached to each other, using TEG without and with cooling by air, and cooling with water were evaluated. The general results showed that with a general view of the complex and considering the electrical consumption of TEC and thermoelectric cooling fans, the use of the mentioned methods is not justified from the energy point of view except for the last case (water cooling). Therefore, the design of thermoelectric combination with cold water thermal photovoltaic panel (PVT-TEG) was selected as the final option for theoretical and practical evaluation. Modeling of this system includes components such as solar radiation intensity, simple photovoltaic panel, and thermoelectric. In order to increase the reliability of the model, at first, according to the facilities available in the laboratory, the validation of these components was done with experimental data. The final mathematical model was prepared based on the design for the PVT-TEG system. Simultaneously, the construction and installation of the laboratory device and then tests were performed from February to September 2020 in the energy laboratory of Shahrood University of Technology. By placing a simple photovoltaic panel next to the main panel, the performance of the two was compared in the same environmental conditions. The model was validated with experimental data with an error of less than 18%. Electricity production in the PVT-TEG panel increased by about 8.5% compared to the simple panel. Power generation by thermoelectric has a small share of the total production power of the panel and therefore a more accurate economic assessment will be necessary for the application of this system in commercial mode. Finally, the parametric analysis of the final model was performed, the results of which predict an overall efficiency of about 70% for the hybrid PVT-TEG panel.

Keywords:

Photovoltaic, Thermoelectric, Teg, Tec, PVT-TEG



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems

**Modeling and experimental study of cooling of photovoltaic
panels by using TEC / TEG modules**

By:

Mehdi Nikzad

Supervisors:

Dr. Mohammad Zamen

Dr. Mohammad.H Ahmadi

September 2020