

لشهر
عالم
میرزا
محمد
باقر



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی و محیط زیست

طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد سیستم فتوولتاییک مجهز به انعکاس دهنده سهموی مرکب
(CPC-PV)

نگارنده: علیرضا خرقانی

اساتید راهنما

دکتر علی عباس نژاد

دکتر محمد ضامن

فروردین ۱۴۰۰

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علیرضا خرقانی رشته مهندسی سیستم های انرژی و محیط زیست تحت عنوان طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد سیستم فتوولتاییک مجهز به انعکاس دهنده سهموی مرکب (CPC-PV) در تاریخ ۱۴۰۰/۱/۳۱ با حضور که هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : _____ امتیاز _____)	☐ دفاع مجدد	☐ مردود
---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۸ - ۱۸/۹۹)

۱- عالی (۱۹ - ۲۰)

۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علی عباس نژاد		
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد ضامن		
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر اکبر ملکی		
۴- استاد ممتحن اول	دکتر احمد نظری		
۵- استاد ممتحن دوم	محمد حسین احمدی		

تأیید رییس دانشکده .:

تقدیم اثر

به پدر و مادر عزیزم

به خاطر همه چیز

شکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که، هستی‌مان بخشد و به طریق علم و دانش را، بنمونان شد و به هم نشینی رحروان علم و دانش مستقرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزی‌ان ساخت. اکنون که با لطف و عنایت پروردگار توفیق یافته‌ام تا این تحقیق را به پایان برسانم، بر خود لازم میدانم که از کلیه بزرگوارانی که به نحوی مراد انجام این پایان نامه یاری رسانند شکر و قدردانی کنم.

جناب دکتر علی عباس نژاد و دکتر محمد ضامن که با همراهی و راهنمایی خویش مراد انجام این پایان نامه یاری رسانند و در مدت تحصیل نیز مطالب بسیار زیادی از ایشان آموختم. همچنین از تمامی دوستان و اعضای خانواده‌ام که این حقیر را در تهیه این پایان نامه یاری نمودند کمال شکر و قدردانی را دارم.

تهدنامه

اینجانب **علیرضا خرقانی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی و محیط زیست** دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد سیستم فتوولتاییک‌مجهز به متمرکزکننده سهموی مرکب (CPC-PV) تحت راهنمایی **آقایان دکتر علی عباس نژاد و دکتر محمد ضامن** 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «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 بوده اند 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.

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 می‌باشد. 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

با توجه به توسعه روزافزون سیستم‌های فتوولتاییک در تامین انرژی الکتریکی کشورهای مختلف، پژوهش‌های کاربردی زیادی با هدف افزایش میزان تولید و بازده این سامانه‌ها صورت گرفته است. در این پژوهش یک سامانه فتوولتاییک مجهز به انعکاس دهنده سهموی مرکب طراحی، ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفته است. در طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب پارامترهای متعددی از جمله زاویه پذیرش، شیب قرار گیری کلکتور و درصد برش ارتفاع تاثیر متفاوتی بر میزان تولید و سطح مورد نیاز انعکاس دهنده (که ارتباط مستقیم با هزینه طرح دارد) دارند. لذا ابتدا به کمک روابط حاکم بر تابش خورشید و معادلات حاکم بر هندسه متمرکز سهموی مرکب مدل ریاضی مربوطه در نرم‌افزار متلب ایجاد شد تا با کمک این مدل پارامترهای مهم هندسی مرتبط برای ساخت دستگاه ارزیابی و بهینه‌سازی گردد. بهینه‌سازی با تابع هدف بیشینه‌سازی میزان تولید الکتریسیته به ازای واحد سطح انعکاس دهنده صورت گرفت و بر این اساس نصف زاویه پذیرش بهینه ۲۵ درجه، شیب بهینه نسبت به افق برای کل سامانه ۳۵ درجه و درصد برش ۷۵ بدست آمد. سیستم ساخته شده در فصل تابستان و در شهرستان شاهرود مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت مقایسه حالت‌های مختلف این ارزیابی برای سه حالت پنل فتوولتاییک ساده (بدون متمرکزکننده)، پنل با متمرکزکننده بدون خنک‌کاری و پنل با متمرکزکننده و به همراه خنک‌کاری با آب به صورت همزمان انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از انعکاس دهنده سهموی مرکب با نسبت تمرکز ۱/۷ در دو حالت با و بدون خنک‌کاری، باعث افزایش توان خروجی به ترتیب به میزان ۱۱ و ۲۱ درصد نسبت به پنل فتوولتاییک ساده گردید. کیفیت ساخت و نصب انعکاس دهنده از دیدگاه بازده نوری و افزایش دمای پنل دو عامل مهم در دستیابی به این نتایج بوده است.

کلمات کلیدی : متمرکزکننده سهموی مرکب ، سیستم‌های فتوولتاییک، توسعه پایدار، انرژی، توان خروجی

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه و معرفی موضوع.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ پتانسیل تابش خورشید در ایران و جهان	۳
۳-۱ فناوری سلول‌های خورشیدی	۵
۴-۱ دسته‌بندی سلول‌های خورشیدی.....	۶
۱-۴-۱ سلول‌های خورشیدی تک کریستالی (نسل اول).....	۶
۲-۴-۱ سلول‌های خورشیدی فیلم نازک سیلیکونی و غیر سیلیکونی (نسل دوم).....	۶
۳-۴-۱ فناوری‌های نو ظهور سلول‌های خورشیدی (نسل سوم).....	۷
۱-۳-۴-۱ سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ	۷
۲-۳-۴-۱ سلول‌های خورشیدی آلی.....	۸
۳-۳-۴-۱ سلول‌های خورشیدی چند پیوندی.....	۸
۵-۱ سیستم‌های فتوولتایک متمرکزکننده	۹
۶-۱ متمرکزکننده سهموی مرکب	۱۰
۱-۶-۱ تعاریف اولیه مرتبط با متمرکزکننده سهموی مرکب.....	۱۲
صل دوم: پیشینه تحقیق.....	۱۵
۱-۲ مقدمه.....	۱۶
۲-۲ مروری بر تحقیقات گذشته.....	۱۷
۳-۲ پیشینه تحقیق در زمینه طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب.....	۱۷
۳-۲ پیشینه تحقیق در زمینه سیستم‌های فتوولتایک-متمرکزکننده سهموی مرکب.....	۲۱

۲-۳ معرفی پژوهش حاضر	۲۷
فصل سوم : مدل سازی و معادلات حاکم	
۳-۱ مقدمه	۲۹
۳-۲ معادلات حاکم بر شدت تابش خورشید	۳۰
۳-۳ تخمین تشعشع آسمان صاف	۳۱
۳-۴ معادلات و روابط حاکم هندسه متمرکزکننده های سهموی مرکب	۳۴
۳-۴-۱ مدل سازی هندسی متمرکزکننده های سهموی مرکب کامل	۳۶
۳-۴-۲ مدل سازی هندسی متمرکزکننده های سهموی مرکب برش داده شده	۳۷
۳-۵ محاسبه شدت تابش دریافتی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب	۳۹
۳-۶ محاسبه توان الکتریکی تولیدی توسط سیستم فتوولتاییک- متمرکزکننده سهموی مرکب	۴۱
فصل چهارم : طراحی و ساخت متمرکزکننده سهموی مرکب	
۴-۱ مقدمه	۴۲
۴-۲ مشخصات پنل خورشیدی	۴۶
۴-۳ بهینه سازی طرح متمرکزکننده سهموی مرکب	۴۸
۴-۳-۱ زاویه پذیرش	۴۸
۴-۳-۲ تعیین درصد برش ارتفاع متمرکزکننده سهموی مرکب	۴۹
۴-۳-۳ شیب قرار گیری کلکتورها	۵۰
۴-۳-۴ بهینه سازی	۵۱
۴-۳-۵ روش بهینه سازی	۵۲
۴-۳-۵-۱ الگوریتم ژنتیک	۵۲
۴-۴ فرآیند ساخت	۵۳
۴-۴-۱ ساخت تکیه گاه	۵۳

۴-۴ - انتخاب ماده مناسب برای سطح متمرکز کننده	۵۵
۴-۴ - ۳- مونتاژ دستگاه	۵۶
۴-۴ - ۱-۳- خنک کاری پنل خورشیدی	۵۶
۴-۵- تجهیزات اندازه گیری	۵۷
فصل پنجم: نتایج	۶۱
۵-۱- مقدمه	۶۲
۵-۲- نحوه انجام آزمایش	۶۲
۵-۳- تحلیل نتایج در شیب ثابت	۶۳
۵-۳-۱- بررسی تغییرات دمای سطح پنل های خورشیدی و ثبت دما بوسیله دوربین ترموگرافی	۶۴
۵-۳-۲- محاسبه توان تولیدی برای هر حالت	۶۸
۵-۳-۳- مقایسه توان تولیدی عملی و تئوری در سه حالت	۷۱
۵-۴- نتیجه آزمایش ها در شیب های متفاوت	۷۳
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات	۷۵
۶-۱- جمع بندی و نتیجه گیری	۷۶
۶-۲- پیشنهادات	۷۸
مراجع	۷۹

فهرست جدول‌ها

- جدول ۴-۱ مشخصات هندسی و الکتریکی پنل خورشیدی تک کریستالی ۴۷
- جدول ۴-۲ ابعاد هندسی متمرکزکننده سهموی مرکب ساخته شده ۵۳

فهرست شکل؛

- شکل ۱-۱ سهم حامل‌های انرژی در تولید توان سال ۲۰۱۸ [۲]..... ۳
- شکل ۲-۱ نقشه توزیع شدت تابش خورشیدی بر روی سطح زمین [۵]..... ۵
- شکل ۳-۱ طرح حواره متمرکزکننده سهموی مرکب [۳]..... ۱۲
- شکل ۱-۲ طرح اولیه متمرکزکننده سهموی مرکب ارائه شده توسط وینستون [۳۷]..... ۱۸
- شکل ۲-۲ طرح حواره متمرکزکننده سهموی مرکب و سه جاذب استوانه‌ای، گوه‌ای و تخت [۳۹]..... ۱۹
- شکل ۳-۲ هندسه بهینه طراحی شده در نرم افزار سالید ورکز [۴۶]..... ۲۱
- شکل ۴-۲ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب - فتوولتاییک [۴۷]..... ۲۳
- شکل ۵-۲ شماتیک سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب و فتوولتاییک [۵۱]..... ۲۴
- شکل ۶-۲ سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب و فتوولتاییک دو گذره همراه با خنک‌کاری هوا [۵۳]..... ۲۵
- شکل ۱-۳ وضعیت نسبی زمین و خورشید نسبت به یکدیگر [۳]..... ۳۱
- شکل ۲-۳ شماتیک برخورد پرتو تابش خورشید بر روی صفحه شیبدار [۳]..... ۳۳
- شکل ۳-۳ متمرکزکننده سهموی مرکب [۳۷]..... ۳۷
- شکل ۴-۳ درصد تابش متمرکز شده بر روی جاذب توسط متمرکزکننده سهموی مرکب [۳۹]..... ۳۸
- شکل ۵-۳ متمرکزکننده سهموی مرکب برش داده شده [۳۷]..... ۴۰
- شکل ۱-۴ پنل خورشیدی تک کریستالی استفاده شده در سیستم طراحی شده..... ۴۷
- شکل ۲-۴ نمودار افت میزان انرژی تابشی دریافتی توسط جاذب بر حسب درصد برش ارتفاع CPC..... ۵۰
- شکل ۳-۴ چوب‌های درخت گردوی استفاده شده در ساخت تکیه‌گاه متمرکزکننده سهموی مرکب..... ۵۴
- شکل ۴-۴ حکاکی پروفیل متمرکزکننده سهموی مرکب طراحی شده بر روی چوب توسط دستگاه CNC..... ۵۴
- شکل ۵-۴ شیارهای آلومینیومی استفاده شده جهت اتصال سیستم‌ها به تکیه‌گاه دو درجه آزادی..... ۵۶
- شکل ۶-۴ مجرای طراحی شده برای گذر سیال..... ۵۷
- شکل ۷-۴ اتصال مجرا به پنل خورشیدی و آب‌بندی آن..... ۵۷
- شکل ۸-۴ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب - فتوولتاییک..... ۵۹
- شکل ۹-۴ نمای روبه روی دستگاه ساخته شده و نصب شده در فضای بیرون..... ۵۹
- شکل ۱-۵ توزیع شدت تابش خورشیدی در طول روز برای شهرستان شاهرود روز ۹ مرداد ۱۳۹۹..... ۶۳
- شکل ۲-۵ تغییرات دمای محیط در محل انجام آزمایش برای شهرستان شاهرود ۹ مرداد ۱۳۹۹..... ۶۴
- شکل ۳-۵ تصویر ترموگرافی پنل خورشیدی ساده..... ۶۵
- شکل ۴-۵ توزیع دمای تئوری و عملی پنل خورشیدی بدون متمرکزکننده..... ۶۵
- شکل ۵-۵ تصویر ترموگرافی پنل خورشیدی با متمرکزکننده و بدون خنک‌کاری..... ۶۶
- شکل ۶-۵ توزیع دمای تئوری و عملی سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک بدون خنک‌کاری..... ۶۷
- شکل ۷-۵ تصویر ترموگرافی پنل خورشیدی با متمرکزکننده و خنک‌کاری..... ۶۷
- شکل ۸-۵ توزیع دمای تئوری و عملی برای پنل خورشیدی با متمرکزکننده و خنک‌کاری..... ۶۸
- شکل ۹-۵ مقایسه توان تولیدی تئوری و عملی برای سیستم فتوولتاییک بدون متمرکزکننده..... ۶۹

- شکل ۵-۱۰ مقایسه توان تولیدی تئوری و عملی برای سیستم فتوولتاییک بامتمرکزکننده ۷۰
- شکل ۵-۱۱ مقایسه توان تولیدی تئوری و عملی برای سیستم فتوولتاییک بامتمرکزکننده و خنک کاری ۷۱
- شکل ۵-۱۲ مقایسه توان تولیدی عملی در سه حالت ۷۲
- شکل ۵-۱۳ مقایسه توان تولیدی تئوری در سه حالت ۷۳
- شکل ۵-۱۴ تغییرات توان تولیدی خروجی از سیستم‌ها در شیب‌های متفاوت ۷۴

جدول ۱ علایم به کار برده شده

واحد	نماد	کمیت
m^2	A	مساحت
	C	نسبت تمرکز
	F	تابع کنترل
m	f	فاصله کانونی سهمی
w/m^2	G	تابش خورشیدی
m	h	ارتفاع
	n	تعداد تابش‌های دریافتی، روز سال
w/m^2	S	تابش دریافتی
m	a'	نصف عرض جاذب
$^{\circ}C$	T	دما
$watt$	p	توان پنل خورشیدی
درجه	θ	زاویه برخورد
درجه	θ_c	نصف زاویه پذیرش
درجه	β	عرض جغرافیایی
	α	ضریب جذب
	ρ	ضریب انعکاس
	τ	ضریب عبور
	η	راندمان پنل خورشیدی

جدول ۲ زیرنویس های به کار برده شده

a	دهانه ورودی
b	پرتو تابشی مستقیم خورشید
cell	سلول
d	پرتو تابشی پخشیده
cpc	متمرکز کننده سهموی مرکب
n	عمود
t	شیب
g	زمین
r	جاذب
T	برش

فصل اول

مقدمه و معرفی موضوع

۱-۱ مقدمه

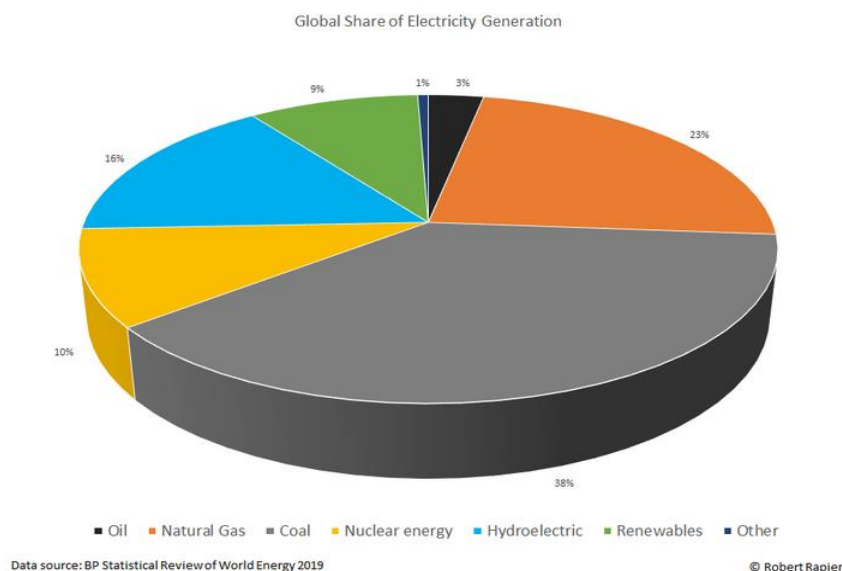
امروزه منابع انرژی سنتی، سوخت‌های فسیلی و برق هسته‌ای عملاً بر سیستم عرضه‌ی انرژی در جهان تسلط دارند ولی وابستگی شدید جوامع صنعتی به منابع انرژی فسیلی و به‌کارگیری و مصرف بی‌رویه آن‌ها، دیر یا زود منابع عظیمی که طی قرون متمادی در لایه‌های زیرین زمین تشکیل شده است را به پایان می‌رساند. عوامل بسیار دیگری از جمله تنوع‌بخشی به منابع انرژی، توسعه‌ی پایدار و ایجاد امنیت انرژی، مشکلات زیست محیطی ناشی از مصرف انرژی‌های فسیلی و ریزش باران‌های اسیدی از یک طرف، پاک و در دسترس بودن منابع انرژی‌های نو نظیر زیست‌توده (بیوماس)^۱، خورشید، باد و سایر انرژی‌های پاک از طرف دیگر، باعث توجه جدی جهانیان به توسعه و گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و افزایش سهم این منابع در سبد انرژی جهانی شده است [۱]. با توجه به مسایل مطرح‌شده نسل فعلی وظیفه دارد به آن دسته از منابع انرژی که دارای عمر و پتانسیل زیادی بوده و اساساً تجدیدپذیر هستند روی آورده و دانش خود را برای بهره‌برداری از آن گسترش دهد؛ از این رو امروزه شاهد افزایش چشمگیر فعالیت‌ها و بودجه‌ی دولت‌ها و شرکت‌ها در امر تحقیق، توسعه و عرضه‌ی سیستم‌های انرژی‌های تجدیدپذیر هستیم و این فعالیت‌ها و صرف بودجه‌های مذکور در نهایت باعث کاهش قیمت تمام شده‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر و رقابت‌پذیری با سیستم‌های سنتی موجود می‌گردد. شکل ۱-۱ سهم هر کدام از حامل‌های انرژی در تولید توان در سال ۲۰۱۸ را نشان می‌دهد. سوخت‌های فسیلی همچنان به دلایل متعددی شامل ارزانی، فراوانی و همچنین فرآوری و حمل و نقل آسان سهم زیادی از حامل‌های انرژی در تولید توان را به خود اختصاص داده است.

در میان حامل‌های انرژی، ذغال‌سنگ همچنان به عنوان سوخت اولیه در بسیاری از نیروگاه‌ها برای تولید توان استفاده می‌شود هرچند در سال‌های اخیر در برخی از کشورها مانند ایالات متحده آمریکا گاز طبیعی توانسته است تا حدی جایگزین ذغال سنگ گردد. در این سال سهم انرژی هسته‌ای از توان کل 2701 TWh ^۲، انرژی

^۱ Biomass

^۲ Tera watt hour

برقایی ۴۱۹۳ TWh و سهم انرژی‌های تجدید پذیر ۲۴۸۰ TWh بوده است. در طی دهه‌ی اخیر انرژی‌های تجدیدپذیر نیز به طور سالیانه ۱۶/۴ درصد رشد داشته‌اند که در این میان مجموع انرژی زمین گرمایی^۱ و بیومس ۱/۷ درصد و انرژی بادی و خورشیدی نیز به ترتیب ۲۰/۸ و ۵۰/۲ درصد رشد داشته‌اند [۲].



شکل ۱-۱ سهم حامل‌های انرژی در تولید توان سال ۲۰۱۸ [۲]

۲-۱ پتانسیل تابش خورشیدی در جهان و ایران

از میان منابع انرژی تجدید پذیر، جایگاه انرژی خورشیدی به دلایل مختلفی نظیر فراوانی و بهره برداری آسان از اهمیت بسیار بیشتری برخوردار است. طبق گزارشات مقدار کل مصرف انرژی در سال ۲۰۱۳ در کل دنیا 5.27×10^{20} بوده است [۴]. جالب است بدانیم که این مقدار تنها اندکی از $10^{20} \times 4/1$ که در واقع مقدار انرژی خورشیدی است که در طی یک ساعت به سطح زمین می رسد بیشتر است.

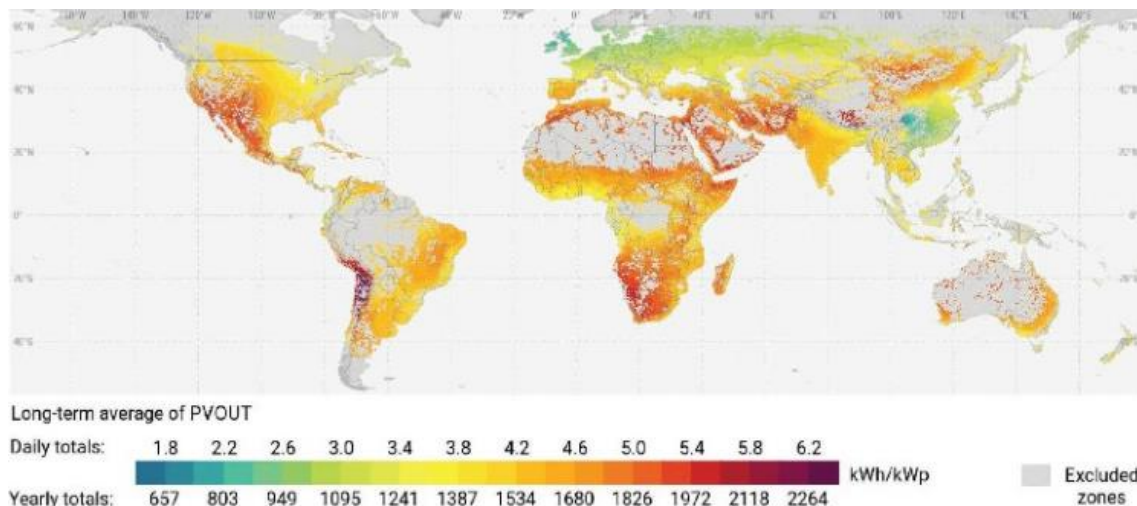
متأسفانه تاکنون ارزیابی دقیق و جامعی از ظرفیت واقعی کشورهای مختلف در استفاده از انرژی خورشیدی صورت نگرفته است. به همین دلیل بانک جهانی در جدیدترین گزارش خود تلاش کرده است تا ظرفیت و پتانسیل تولید توان از انرژی خورشیدی را برای هر کشور و منطقه به صورت مجزا ارائه دهد [۵]. با مراجعه

^۱ geothermal

به اطلس خورشیدی^۱ می‌توان اطلاعات بسیار زیادی در مورد ظرفیت تابش خورشیدی در مناطق مختلف به دست آورد. به طور کلی می‌توان گفت ۹۳ درصد از جمعیت جهان در مناطق غنی از تابش خورشیدی هستند. همچنین حدود ۷۰ کشور در شرایط جغرافیایی بسیار عالی برای تولید توان توسط سیستم‌های فتوولتاییک^۲ قرار گرفته‌اند. با توجه به نقشه توزیع شدت تابش خورشیدی، می‌توان دید نواحی نظیر قاره آفریقا و بخش‌هایی از خاورمیانه جزء نقاطی هستند که بیش‌ترین مقدار تابش خورشیدی را دریافت می‌کنند [۶]. کشور ایران نیز مانند سایر کشورهای قرار گرفته در خاورمیانه از موقعیت بسیار مناسبی از نظر دسترسی و بهره‌برداری از انرژی خورشیدی قرار گرفته است. بنابراین با استقرار سامانه‌های خورشیدی می‌توان بخش قابل توجهی از انرژی مورد نیاز کشور را تامین کرد. ایران کشوری است که به گفته متخصصان این فن با وجود ۳۰۰ روز آفتابی در بیش از دو سوم آن و متوسط تابش ۵/۵ - ۴/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز یکی از کشورهای با پتانسیل بالا در زمینه انرژی خورشیدی معرفی شده است. برخی از کارشناسان انرژی خورشیدی گام را فراتر نهاده و در حالتی آرمانی ادعا می‌کنند که ایران در صورت تجهیز مساحت بیابانی خود به سامانه‌های دریافت انرژی تابشی می‌تواند انرژی مورد نیاز بخش‌های گسترده‌ای از منطقه را نیز تأمین و در زمینه صدور انرژی برق فعال شود [۷].

^۱ Global solar Atlas

^۲ Photovoltaics systems



شکل ۱-۲ نقشه توزیع شدت تابش خورشیدی بر روی سطح زمین [۵]

۳-۱ فناوری سلول‌های خورشیدی

برای اولین بار محققان در سال ۱۹۵۴ در آزمایشگاه تلفن بل توانستند به صورت عملی سلول‌های خورشیدی از نوع اتصال p-n را مورد آزمایش قرار دهند و نور خورشید را به صورت مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. پس از اندزه‌گیری‌ها آن‌ها توانستند راندمان سلول را ۶ درصد محاسبه کنند [۳]. با ظهور برنامه فضایی سلول‌های خورشیدی که از نیمه رسانه‌های سیلیکونی ساخته شده بودند به سرعت انتخاب اول برای تامین انرژی الکتریکی در فضاپیماها و ماهواره‌ها شدند. راندمان تبدیل توان این نوع از سلول‌های خورشیدی را بین ۱۵-۲۰ درصد محاسبه کرده‌اند [۸]. ماده‌ای که در ساخت سلول‌های خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد باید دارای ویژگی‌های خاصی نظیر داشتن شکاف باند^۱ منطبق بر طیف خورشیدی (۱/۷-۱/۱ الکترون ولت)، داشتن عمر بالا و توانایی مناسب در انتقال بار، فراوانی و داشتن استحکام الکتریکی و در نهایت داشتن راندمان تبدیل فتوولتاییک بالا باشد.

^۱ Band gap

۴-۱ دسته‌بندی سلول‌های خورشیدی

با توجه به زمان‌بندی پیدایش و توسعه سلول‌های خورشیدی، آن‌ها را در سه گروه قرار می‌دهند. در منابع معتبر علمی از عبارت "نسل سلول‌های خورشیدی" استفاده می‌شود. به این ترتیب سلول‌های خورشیدی در سه دسته نسل اول، نسل دوم و نسل سوم قرار می‌گیرند [۹].

۱-۴-۱ سلول‌های خورشیدی تک کریستالی^۱ (نسل اول)

در برگیرنده توسعه اولیه سلول‌های خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی C-Si می‌باشد. این سلول‌ها به شکل صفحات نازک با زمینه سیلیکون هستند [۱۰، ۱۱]. راندمان این سلول‌ها حدود ۱۰/۵ تا ۲۵/۶ درصد تعیین شده است [۱۲]. هزینه بالای تولید مرتبط با تجهیزات و مواد مورد استفاده در فرآیند تولید و همچنین استفاده از مواد شیمیایی سمی در فرآیند تولید باعث محدود شدن استفاده از این نوع سلول‌ها طی سالیان اخیر شده است [۱۳]. سلول‌های خورشیدی سیلیکونی دارای عمر متوسط ۲۵ سال هستند. امروزه این نوع سلول‌ها در اکثر مناطق دنیا در دسترس هستند و به طور میانگین دارای راندمان ۱۸ درصد هستند [۱۴].

۱-۴-۲ سلول‌های خورشیدی فیلم نازک سیلیکونی و غیر سیلیکونی (نسل

دوم)

نسل دوم، سلول‌های خورشیدی فیلم نازک می‌باشند.^۲ این سلول‌ها از کنارهم قرار گرفتن سیلیکون‌های تک کریستالی بوجود می‌آیند به همین دلیل به آن‌ها سلول‌های خورشیدی چندکریستالی^۳ نیز گفته می‌شود. این سلول‌ها ضخامت بسیار کمی در مقایسه با سلول‌های نسل اول را دارند با این وجود قابلیت جذب ۹۸

^۱ Single crystalline

^۲ Thin film

^۳ Poly-crystallin

درصد از فوتون‌های دریافتی را دارند. این نوع سلول‌ها نسبت به سلول‌های تک کریستالی دارای راندمان کم‌تری می‌باشند. ماژول‌های تجاری سلول‌های خورشیدی پلی کریستالین راندمانی بین ۱۵ تا ۱۸ درصد دارند [۱۵].

سلول‌های خورشیدی از جنس سیلیکون آمورف (a-si) [۱۶]، سلول‌های خورشیدی نیمه مرکب [۱۷] و همچنین سلول‌های خورشیدی فیلم نازک مرکب با زمینه غیرسیلیکونی در این نسل از سلول‌های خورشید قرار می‌گیرند. مهم‌ترین ویژگی این نسل از سلول‌های خورشیدی ضخامت بسیار کم آن‌ها و همچنین قابلیت جذب بسیار بالای تابش خورشیدی نسبت به سلول‌های خورشیدی نسل اول می‌باشد [۱۸، ۱۹].

۱-۴-۳ فناوریهای نوظهور سلولهای خورشیدی (نسل سوم)

علاوه بر نسل‌های اول و دوم فناوری سلول‌های خورشیدی، روش‌های نوظهور دیگری هم در ساخت سلول‌های خورشیدی معرفی شده‌اند. استفاده از مواد حساس‌شده با رنگ، مواد پایه پلیمری و سلول‌های چندپیوندی فناوری‌های نوینی می‌باشند که در این قسمت به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

۱-۴-۳-۱ سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ^۱

سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ (DSSC) مطابق شکل از سه لایه تشکیل شده است [۲۰، ۲۱، ۲۲].

۱- آند از جنس دی اکسید قلع تغلیظ شده با فلوپور ($\text{SnO}_2:\text{F}$)

۲- لایه‌ای نازک از دیاکسید تیتانیوم (TiO_2) با ساختاری بسیار متخلخل و غوطه‌ور در یک حلال و

مخلوطی از رنگ حساس‌شده به فوتون از جنس روتنیوم - پلیپیریدین

۳- کاتد از جنس پلاتین با پوشش نازکی از الکترولیت یدید

بازده سلول‌های حساس شده با رنگ بین ۸ تا ۱۵ درصد است. این سلول‌ها برای کاربردهای غیرنیروگاهی مانند سقف منازل که ارزانی و سبک بودن اهمیت زیادی دارد، امیدبخش‌ترین سلول‌های خورشیدی نسل سوم محسوب می‌شوند [۲۳].

۱-۴-۳-۲ سلول‌های خورشیدی آلی^۱

در کنار سلول‌های حساس شده با رنگ، که ترکیبی از مواد آلی و غیرآلی هستند، نوع دیگری از سلول‌های خورشیدی در حال ظهور است که به‌طور کامل از مواد آلی ساخته می‌شوند [۲۴]. سلول‌های خورشیدی آلی به سه دسته تک لایه، دولایه و توده ناهمگون تقسیم می‌شوند [۲۵]. در سلول‌های تک‌لایه که ساده‌ترین نوع سلول‌های خورشیدی آلی هستند، از یک لایه پلیمر و در سلول‌های دولایه از دو ماده پلیمری با خواص مختلف بین دو رسانای فلزی (از جنس اکسید قلع ایندیوم و آلومینیم) استفاده می‌شود [۲۶]. امروزه بازده این سلول‌ها به مرز ۱۱ درصد رسیده است [۲۳].

۱-۴-۳-۳ سلول‌های خورشیدی چندپیوندی^۲

تفاوت انرژی فوتون‌های خورشید سبب شده است تا نوعی از سلول‌های خورشیدی، موسوم به چندپیوندی ساخته شود که از دو یا چند سلول با شکاف انرژی متفاوت تشکیل می‌شوند [۲۷]. لایه بالایی این سلول‌ها موادی با شکاف انرژی زیاد است که نور خورشید با انرژی بالا را به خود جذب می‌کند. فوتون‌های کم انرژی‌تر نیز با عبور از این لایه به لایه بعدی که شکاف انرژی کم‌تری دارد می‌رسد و جذب می‌شود. این فرآیند ممکن است تا لایه سوم نیز ادامه یابد [۲۸]. درحالی که بهترین بازده نظری سلول‌های خورشیدی بلور سیلیکون

^۱ Organic

^۲ Multi-layer Tandem cells

۲۸ درصد است، ترکیب این ماده با آلومینیوم گالیوم آرسنید که شکاف انرژی ۱/۷ الکترون ولت دارد، می‌تواند سلولی با بازده نظری ۵۰ درصد بسازد. متأسفانه تا دستیابی به امکان اتصال مؤثر این مواد به یکدیگر راه درازی در پیش است [۲۹].

۵-۱ سیستم‌های متمرکزکننده فتوولتایک^۱

در اغلب فناوری‌های سلول‌های فتوولتایک، نور خورشید به‌طور مستقیم به سلول خورشیدی می‌رسد و تبدیل به الکتریسیته می‌شود. با این حال، در نوع دیگری از فناوری‌های فتوولتایک موسوم به متمرکزکننده-های فتوولتایک، نور خورشید از طریق لنز یا آینه‌های مقعر روی یک دریافت‌کننده اپتیکی^۲ برخورد و سپس با شدت بیشتری، به سطح سلول خورشیدی بازتابیده می‌شود. در واقع یک منعکس‌کننده خورشیدی دستگاهی است که تابش خورشیدی که وارد آن می‌شود را دریافت و آن را بر روی یک سطح کوچک‌تر (سطح جاذب) متمرکز می‌کند.

به دلیل سطح کوچک سلول مورد نیاز در این فناوری، هزینه تأمین سلول خورشیدی نسبت به فناوری‌های غیرمتمرکزکننده بسیار کم‌تر است. از این رو استفاده از سلول‌های خورشیدی گران‌تر با بازدهی بسیار بالا (مانند سلول‌های چند پیوندی) در این فناوری توجیه‌پذیر است. بازده این فناوری با استفاده از سلول‌های چندپیوندی در شرایط مطلوب آزمایشگاهی به حدود ۴۴٪ هم رسیده است [۳۰]. با این حال، الزامات این فناوری، شامل طراحی پیچیده اپتیکی، نیاز مبرم به سامانه‌های ردیاب خورشیدی و خنک‌کاری، افت شدید تمرکز نور در روزهای ابری و غبارآلود و لزوم استقرار در مکان‌هایی با نور مستقیم و زیاد، موانع جدی را در مسیر توسعه این سیستم‌ها ایجاد کرده است [۳۱]. متمرکزکننده‌های سهموی خطی^۳، متمرکزکننده برج

^۱ Concentrating photovoltaics

^۲ Optical reciever

^۳ Parabolic trough concentrator

خورشیدی^۱، بشقاب سهموی^۲ و متمرکزکننده‌های سهموی مرکب از جمله مهم‌ترین متمرکزکننده‌ها هستند که با سلول‌های خورشیدی ترکیب می‌شوند. در سال ۲۰۱۹ ظرفیت نصب شده توان خورشیدی متمرکزکننده ۶/۴۵۱ گیگاوات بوده است که نسبت به سال ۲۰۱۸ تقریباً دو برابر شده است. تقریباً نیمی از توان متمرکزکننده خورشیدی جهان در کشور اسپانیا تولید می‌شود. ایالات متحده آمریکا نیز با مقدار ۱/۷ گیگاوات بعد از اسپانیا دومین کشور تولید کننده توان متمرکزکننده خورشیدی می‌باشد. در سال‌های اخیر در مناطقی نظیر شمال آفریقا، خاورمیانه و همچنین کشورهایی نظیر هند و چین تمایل فراوانی به گسترش این فناوری دیده شده است. در میان فناوری‌های متمرکزکننده تولید توان، نیروگاه‌های سهموی خطی بیش‌ترین سهم را (حدود ۹۰ درصد) در بازار به خود اختصاص داده‌اند. از سال ۲۰۱۰ به بعد نیروگاه‌های برج خورشیدی به دلیل توانایی مناسب در تولید دماهای بالا نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. در بازار امروز تولید توان توسط متمرکزکننده‌های خورشیدی تنها دو درصد از سهم کل را به خود اختصاص داده اند [۳۲].

۱-۶ متمرکزکننده سهموی مرکب

متمرکزکننده‌های سهموی مرکب در دسته متمرکزکننده‌هایی که تصویر واضحی از خورشید ایجاد نمی‌کنند^۳ و فقط نور خورشید را بر روی جاذب^۴ متمرکز می‌کنند، قرار می‌گیرد. متمرکزکننده‌های سهموی مرکب توانایی انعکاس تابش خورشیدی دریافتی را در محدوده خاصی از زاویه‌های تابشی خورشید را بروی جاذب دارا می‌باشد. تابش‌های ورودی به دهانه متمرکزکننده پس از چندین برخورد بر روی سطوح متمرکزکننده، در نهایت بر روی جاذب منعکس می‌شوند. جاذب می‌تواند انواع مختلفی نظیر استوانه‌ای، تخت و گوه‌ای داشته باشد. نسبت تمرکز این نوع از متمرکزکننده‌ها بین ۲-۷ تخمین زده شده است [۳۳]. نحوه عملکرد

^۱ Concentrator dish

^۲ Compound parabolic concentrator

^۳ None-imaging concentrator

^۴ reciever

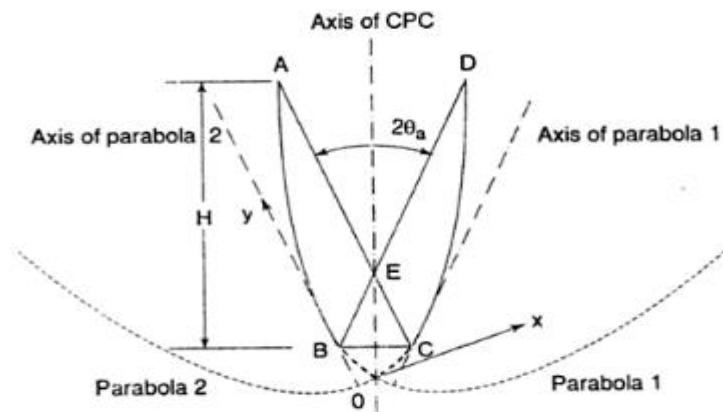
متمرکزکننده سهموی مرکب مانند سایر متمرکزکننده نظیر متمرکزکننده سهموی خطی و بشقاب سهموی می‌باشد با این تفاوت که متمرکزکننده‌های سهموی مرکب علاوه بر تابش مستقیم خورشیدی^۱، قسمتی از تابش پخشیده^۲ خورشیدی را دریافت و متمرکز می‌کند. متمرکزکننده‌های سهموی مرکب با داشتن نسبت تمرکز پایین می‌توانند در طول روز و ماه بدون نیاز به سیستم‌های ردیاب خورشیدی کار کنند که در نهایت منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌های بهره‌برداری سیستم می‌گردد. در صورت استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی با متمرکزکننده سهموی مرکب که محور آن شرقی-غربی می‌باشد تنها نیاز به تنظیم فصلی می‌باشد در نتیجه نیروی انسانی کم‌تری برای آن‌ها نیاز است.

شکل ۱-۳ طرحواره اولیه یک متمرکزکننده سهموی مرکب را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در دو طرف این متمرکزکننده دو سهمی مشابه قرار گرفته است. در شکل کانون و محور اصلی سهمی سمت راست نشان داده شده است. زاویه بین محور تقارن متمرکزکننده مرکب و خط واصل بین کانون یکی از سهمی‌ها و لبه سهمی مقابل به عنوان نصف زاویه پذیرش^۳ در نظر گرفته می‌شود. در شرایط ایده آل هرگونه تابشی که وارد دهانه متمرکز شود و زاویه برخورد آن با سطح متمرکزکننده در محدوده زاویه پذیرش قرار گیرد بر روی جاذب که در کف متمرکزکننده تعبیه شده است منعکس می‌شود. طراحی هندسه متمرکزکننده‌های سهموی مرکب امری بسیار مهم و قابل توجه است. معمولاً با توجه به نوع کاربرد و موارد استفاده طراحان هندسه‌های متفاوتی برای آن پیشنهاد می‌کنند. متمرکزکننده‌های سهموی مرکب هم به طور مستقیم و هم غیرمستقیم در تولید توان خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

^۱ Beam radiation

^۲ Diffuse radiation

^۳ Acceptance angle



شکل ۱-۳ طرحواره متمرکزکننده سهموی مرکب [۳]

۱-۶-۱ تعاریف اولیه مرتبط با متمرکزکننده سهموی مرکب

زاویه پذیرش: مقدار دوران سهمی اولیه حول محور اصلی آن، زاویه پذیرش گفته می‌شود. طبق مشاهدات صورت گرفته تمامی پرتوهای ورودی به دهانه متمرکزکننده سهموی مرکب پس از برخورد با سطح منعکس کننده در صورتی که زاویه برخورد آن با سطح متمرکزکننده کم‌تر از زاویه پذیرش باشد، بر روی جاذب قرار می‌گیرد.

بازده نوری^۱: به نسبت تابش‌های جذب شده بر روی سطح جاذب به کل تابش‌های ورودی به دهانه متمرکزکننده سهموی مرکب گفته می‌شود.

دهانه وردی^۲: قسمتی از متمرکزکننده سهموی مرکب است که از طریق آن تابش‌های خورشیدی وارد سیستم متمرکزکننده می‌شود.

^۱ Optical efficiency

^۲ Entrance aperture

دریافت کننده^۱ : قسمتی از متمرکز کننده سهموی مرکب است که نور خورشید را جذب می کند.

نسبت تمرکز هندسی^۲ : به نسبت مساحت دهانه ورودی به مساحت جاذب نسبت تمرکز هندسی گفته می شود.

^۱ Reciever

^۲ Geometrical concentration ratio

فصل دوم

پیشینه تحقیق

۲-۱ مقدمه

مقوله کاهش هزینه‌ها در تولید برق خورشیدی را از دو دیدگاه افزایش راندمان سلول‌های خورشیدی و یا کاهش تعداد سلول‌های خورشیدی گران قیمت می‌توان بررسی نمود. در میان پارامترهای مختلف مرتبط با هزینه‌های سلول‌های خورشیدی، جنس سلول‌ها بیش‌ترین سهم را از مجموع هزینه کل را شامل می‌شود. به عنوان مثال سلول‌های از جنس آمورف اگرچه راندمان کمتری نسبت به سلول‌های تک کریستالی دارند اما از لحاظ اقتصادی بسیار مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. در دیدگاه دوم کاهش تعداد سلول‌های خورشیدی مدنظر است که بتوان به گونه‌ای تعداد سلول‌های خورشیدی را کاهش داد و در نتیجه هزینه‌های مرتبط با برق خورشیدی را کاهش داد. استفاده از متمرکزکننده‌های خورشیدی در سال‌های اخیر به خاطر هزینه کم تولید آن‌ها و توانایی بالا در تولید توان مورد توجه محققان قرار گرفته است [۳۴]. متمرکزکننده‌های خورشیدی با افزایش شدت نور خورشید بر روی سلول‌ها باعث می‌شوند تا بتوان از سلول‌های خورشیدی توان بیش‌تری را استخراج کرد و به این ترتیب می‌توان مقدار معینی توان را با تعداد کم‌تری از سلول‌های گران قیمت خورشیدی استخراج کرد. طبق تحقیقات انجام شده با ترکیب متمرکزکننده و سلول‌های خورشیدی تا ۴۰ درصد می‌توان هزینه‌های تولید برق خورشیدی را نسبت به سیستم ساده فتوولتایک بدون متمرکزکننده کاهش داد [۳۵]. متمرکزکننده سهموی مرکب با داشتن نسبت تمرکز مناسب می‌تواند در ترکیب با سیستم-های فتوولتایک در جهت تولید توان بیش‌تر قرار گیرد. متمرکزکننده‌های سهموی مرکب می‌توانند در بازه زمانی خاصی از روز نور خورشید را بر روی جاذب متمرکز کنند و از این جهت نیاز به ردیاب خورشیدی ندارند همین مزیت مهم باعث کاهش هزینه‌های مرتبط با تولید توان خورشیدی تا حد قابل توجهی می‌گردد [۳۶].

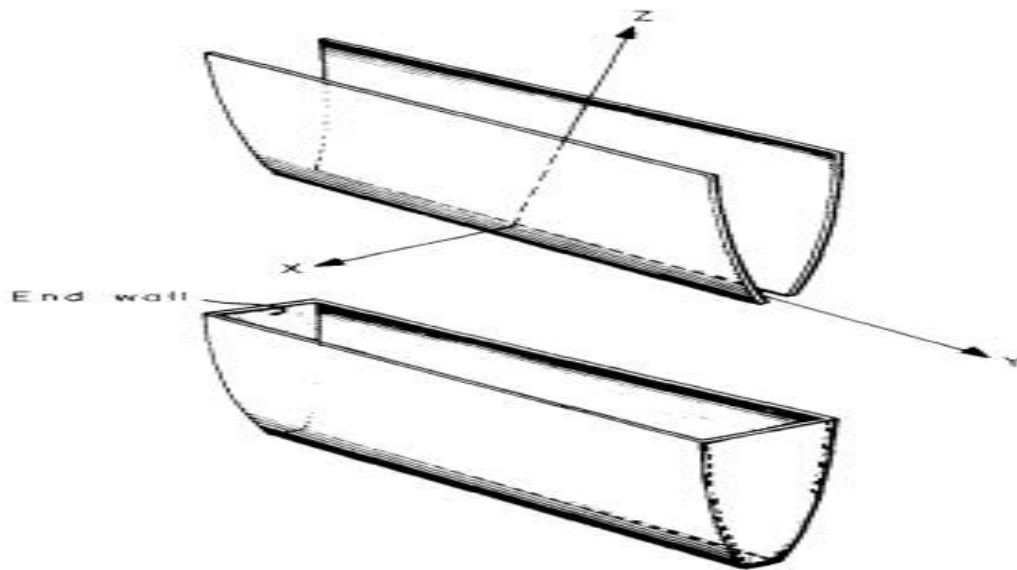
در این قسمت سعی بر آن است تا ابتدا به مرور کارهای پیشین انجام شده در زمینه طراحی متمرکزکننده-های سهموی مرکب و سپس به مرور کارهای صورت گرفته در زمینه سیستم‌های فتوولتایک-متمرکزکننده سهموی مرکب پرداخته شود و در نهایت کار حاضر معرفی و اهداف مورد نظر بیان گردد.

۲-۲ مروری بر تحقیقات گذشته

برای بهره برداری از انرژی خورشیدی بهترین راه استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک که انرژی تابشی خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند، می‌باشد. از جمله مزایای سیستم‌های خورشیدی می‌توان به کار کردن بدون نیاز به اجزاء متحرک، عدم تولید سر و صدا و همچنین هزینه نگه داشت پایین اشاره کرد. در کنار مزایای گفته شده برای سیستم‌های خورشیدی، هزینه اولیه بالا برای بهره برداری این سیستم‌ها یکی از عواملی است که در سال‌های اخیر استفاده از این سیستم‌ها را محدود کرده است. به همین دلیل پیدا کردن راهی برای کاهش هزینه‌های مرتبط با برق خورشیدی مورد توجه محققان بوده است. در مطالعات پیشین ترکیب سیستم‌های متمرکزکننده و سلول‌های فتوولتاییک در جهت افزایش راندمان کل سیستم و کاهش هزینه‌های مرتبط با برق خورشیدی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند. این بررسی تنها مخصوص توان تولیدی نمی‌باشد و از جنبه‌های گوناگون نظیر روش‌های طراحی، تحلیل‌های مقایسه‌ای، بررسی راندمان سیستم با خنک کاری و بدون خنک کاری، هزینه ساخت سیستم، ظرفیت نصب و شرکت‌های درگیر در توسعه و پیشرفت فناوری را شامل می‌شود.

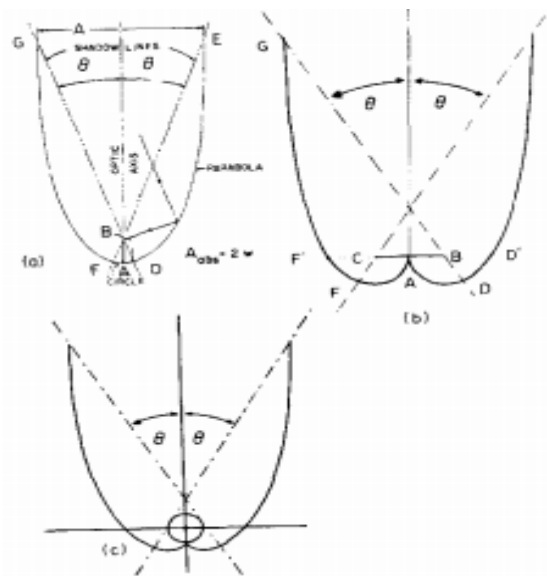
۲-۳ پیشینه تحقیق در زمینه طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب

در سال‌های گذشته تلاش‌ها و تحقیقات فراوانی در جهت طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب و ترکیب آن با سیستم‌های فتوولتاییک مرسوم صورت گرفته است. پتانسیل استفاده از متمرکزکننده‌های سهموی مرکب در کلکتورهای خورشیدی برای اولین بار توسط آقای وینستون [۳۷] در سال ۱۹۷۴ مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه برای اولین بار اصول اولیه طراحی نوین متمرکزکننده‌های سهموی مرکب بیان گردید. در این مطالعه آن‌ها به ارائه روابط و معادلات حاکم بر متمرکزکننده‌های سهموی مرکب پرداختند و طرح اولیه آن را ارائه کردند. آن‌ها توانستند متمرکزکننده‌ای با توانایی تمرکز تابش خورشیدی در طول هشت ساعت از روز (بدون نیاز به دستگاه ردیاب خورشیدی) را بسازند.



شکل ۱-۲ طرح اولیه متمرکزکننده سهموی مرکب ارائه شده توسط وینستون [۳۷]

در مطالعه بعدی وینستون و ولفورد [۳۸] به بررسی شار برداری هندسی و سایر خواص متمرکزکننده‌های سهموی مرکب پرداختند. در مطالعه دیگر رابل و همکاران [۳۹] عملکرد یک سیستم خورشیدی همراه با متمرکزکننده سهموی مرکب را به منزله تعیین اتلافات نوری با توسعه یک مدل تحلیلی مورد ارزیابی قرار دادند. عمده هدف آن‌ها از توسعه این مدل تحلیلی تعیین میانگین تعداد بازتاب‌های پرتوهای خورشیدی از لبه متمرکزکننده بود. آن‌ها همچنین انتقال حرارت تابشی و همرفتی را در این سیستم مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آن‌ها همچنین در این مطالعه راندمان متمرکزکننده سهموی مرکب را برای سه جاذب استوانه‌ای، تخت و گوه‌ای مورد بررسی قرار دادند.

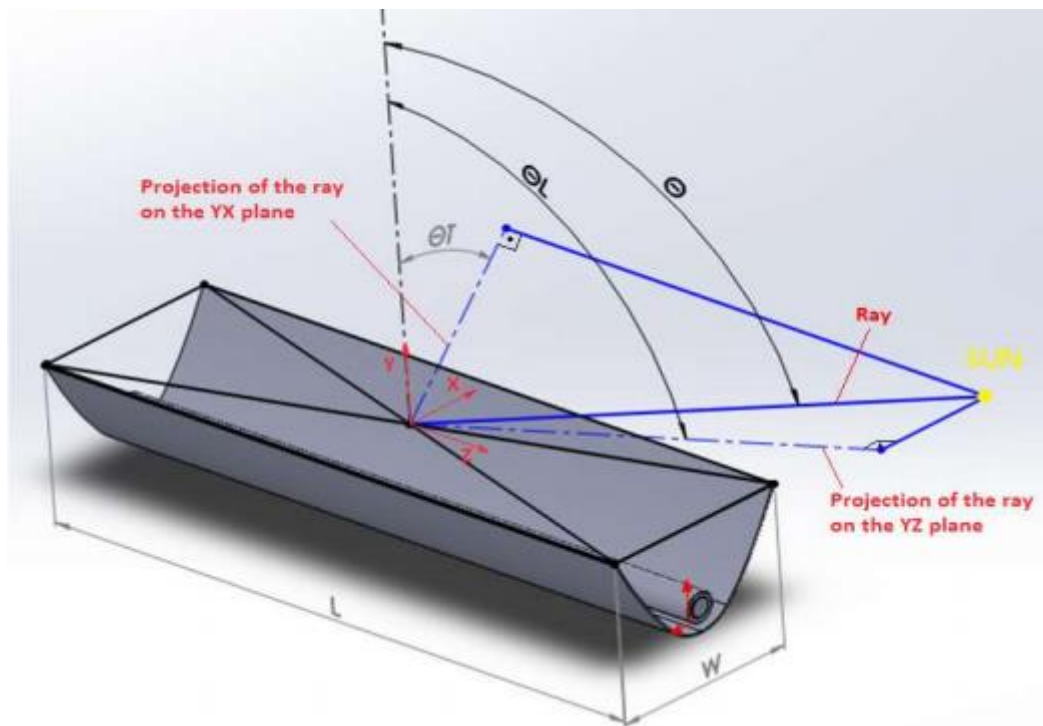


شکل ۲-۲ طرحواره متمرکزکننده سهموی مرکب و سه جاذب، استوانه‌ای، گوه‌ای و تخت [۳۹]

یکی از پارامترهای مهم در طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب مقدار بهینه زاویه پذیرش می‌باشد. به همین دلیل تانگ و همکاران [۴۰] به ارائه یک مدل ریاضی پرداختند تا اثرات مقدار زاویه پذیرش را در دریافت تابش خورشیدی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب در شیب‌های متفاوت بررسی کنند. به این ترتیب می‌توان در طول سال حداکثر تابش خورشید را دریافت کرد. گراگ و ادھیکاری [۴۱] محاسبات طراحی نوری را برای ساخت یک متمرکزکننده سهموی مرکب با نسبت تمرکز ۳ ارائه دادند. آن‌ها به بررسی پارامترهای مهم هندسی در طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب نظیر نسبت‌های ارتفاع به دهانه، مساحت منعکس کننده به مساحت دهانه و همچنین میانگین تعداد تابش‌ها که در محدوده و غیر محدوده زاویه پذیرش قرار دارند پرداختند. محاسبات آن‌ها هم برای یک متمرکزکننده سهموی کامل و هم متمرکزکننده سهموی برش خورده^۱ انجام گردید. راندمان نوری متمرکزکننده سهموی مرکب توسط هاتوامبو و همکاران [۴۲] نیز مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. آن‌ها در این مطالعه توانستند راندمان نوری سیستم را ۷۱ درصد محاسبه کنند. این مقدار مطابقت مناسبی با مجموع راندمان الکتریکی و حرارتی داشت. در مطالعه بعدی [۴۳] این محققان اقدام به ساخت منعکس کننده‌هایی از سه جنس مختلف در جهت ارتقاء

^۱ Truncated Compound parabolic concentrator

راندمان نوری سیستم متمرکزکننده سهموی پرداختند و تاثیر آن را بر روی راندمان الکتریکی و حرارتی سیستم مورد بحث قرار دادند. آن‌ها در یافتند که هرچه سطح منعکس کننده صاف و صیقلی تر باشد راندمان نوری سیستم نیز به مراتب افزایش می‌یابد. نیلسون و همکاران [۴۴] آزمایشی را بر روی یک متمرکزکننده سهموی مرکب نامتقارن که دارای دو بازتاب دهنده مختلف از دو جنس مختلف آلومینیم آندایز شده و دیگری از جنس لمینت آلومینیم بود انجام دادند. آن‌ها دریافتند که تغییر جنس بازتاب دهنده از آلومینیم آندایز شده به لمینت آلومینیم تغییر چندانی در دریافت انرژی ورودی ایجاد نمی‌کند. همچنین آن‌ها دریافتند که در صورت دسترسی داشتن به فضای کافی برای نصب با استفاده از این نوع متمرکزکننده‌ها هزینه تولید توان تاحد قابل قبولی کاهش می‌یابد مناسب است و همچنین آن‌ها نشان دادند که به منظور هرچه بهینه‌تر کردن سیستم بهتر است ارتفاع متمرکزکننده‌ها کوچک در نظر گرفته شود. ژو و همکاران [۴۵] برای بررسی اتلافات نوری سیستم متمرکزکننده سهموی اقدام به انجام تحلیل نوری و ساخت دستگاه کردند. برای این منظور سیستم متمرکزکننده سهموی را در جهت شمال به جنوب روی محور افقی قرار دادند. نتایج نشان داد که این سیستم برای مناطقی که عرض جغرافیایی آن‌ها بیش از ۲۵ درجه می‌باشد مناسب است. بلوس و همکاران [۴۶] به بررسی دقیق طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب پرداختند. آن‌ها تلاش کردند تا هندسه بهینه متمرکزکننده سهموی مرکب را برای دریافت حداکثر تابش‌های عمود خورشیدی طراحی کنند. آن‌ها دریافتند که عرض بهینه برای دهانه ورودی متمرکزکننده ۳۰ سانتی‌متر و طول فاصله کانونی ۵ سانتی‌متر برای دستیابی به هندسه بهینه می‌بایست در نظر گرفته شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که هندسه کف متمرکزکننده سهموی مرکب تاثیر چندانی در راندمان سیستم ندارد به همین دلیل برای راحتی در طراحی می‌توان آن را دایروی در نظر گرفت. این هندسه برای جاذب استوانه‌ای پیشنهاد شده است که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

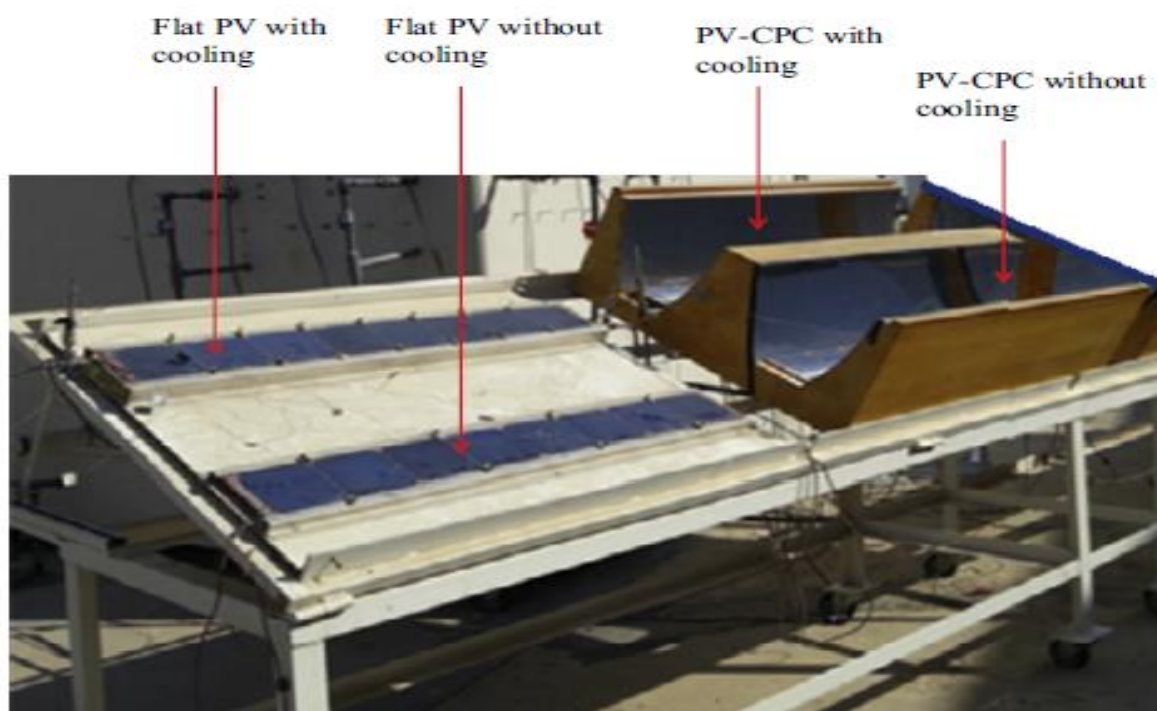


شکل ۳-۲ هندسه بهینه طراحی شده در نرم افزار سالید ورکز [۴۶]

۴-۲ پیشینه تحقیق در زمینه سیستم‌های متمرکزکننده سهموی مرکب و فتوولتاییک (CPC-PV)

در قسمت قبل مشاهده شد تحقیقات فراوانی در زمینه طراحی هرچه دقیق‌تر متمرکزکننده‌های سهموی مرکب صورت گرفته است. اگرچه دقت در طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب بسیار ضروری و قابل توجه به نظر می‌رسد اما مطالعه و بررسی این سیستم‌ها تنها محدود به طراحی آن‌ها نمی‌شود. استفاده درست و مناسب از این متمرکزکننده‌ها در کلکتورهای خورشیدی به نحوی که حداکثر کارایی در آن سیستم حاصل گردد امری ضروری و مهم است. در طی دو دهه گذشته ترکیب متمرکزکننده سهموی مرکب با سایر سیستم‌ها از جمله سلول‌های فتوولتاییکی مورد بررسی و بحث قرار گرفته است که در این قسمت به ارائه آن‌ها پرداخته شده است.

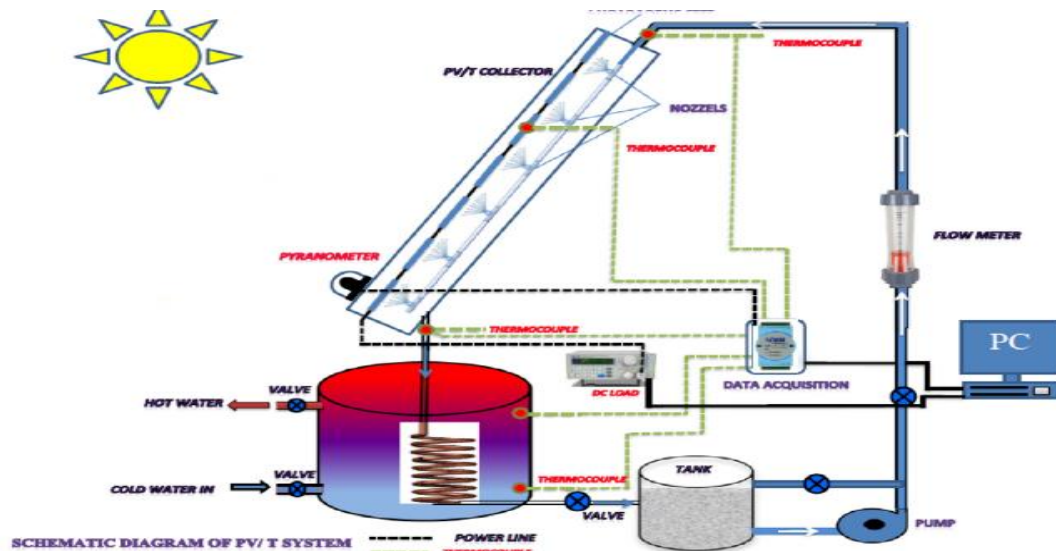
در مطالعه‌ای جامع توسط بهای‌درا و همکاران [۴۷] یک مدل عددی و تجربی برای یک سیستم فتوولتاییک ساده (بدون پوشش و متمرکزکننده) و همچنین سیستم خورشیدی فتوولتاییک به همراه متمرکزکننده سهموی مرکب متقارن و بدون پوشش ارائه گردید. آن‌ها ابتدا عملکرد سلول‌های خورشیدی تحت خنک کاری و بدون خنک کاری را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که خنک کاری سلول‌های خورشیدی به طور قابل ملاحظه‌ای باعث افزایش توان خروجی سیستم می‌گردد. مطابق با نتایج بدست آمده حداکثر توان تولیدی سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک که تحت خنک کاری می‌باشد حدود ۳۴ وات است که تقریباً دو برابر مقدار توان خروجی در غیاب خنک کاری است. همچنین آن‌ها دریافتند که توان خروجی سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک به مراتب بیشتر از توان خروجی از سلول‌های فتوولتاییکی بدون متمرکزکننده است. مقدار افزایش راندمان توسط متمرکزکننده سهموی مرکب در غیاب خنک کاری ۲۳ درصد و با خنک کاری ۳۹ درصد نسبت به سلول‌های فتوولتاییک ساده محاسبه گردید. در نهایت آن‌ها به مقایسه بین نتایج عددی و تجربی پرداختند و دریافتند که حداکثر اختلاف بین توان خروجی عددی و تجربی برای سیستم فتوولتاییک با و بدون خنک کاری به ترتیب ۵ و ۷ درصد می‌باشد. این نویسندگان در مطالعه‌ای دیگر [۴۸] به بررسی مقایسه‌ای عددی و تجربی تاثیر پوشش و خنک کاری برای سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک پرداختند. آن‌ها با در نظر گرفتن خواص نوری، حرارتی و الکتریکی سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک مدل تئوری را توسعه دادند تا بتوانند عملکرد سیستم را مورد ارزیابی قرار دهند. آن‌ها سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک را در فضای باز مورد ارزیابی قرار دادند و تطابق مناسبی بین داده‌های عددی و تجربی سیستم مشاهده کردند. آن‌ها همچنین تاثیر پوشش را از نظر گاه حرارتی و الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزودن پوشش به سیستم باعث کاهش راندمان الکتریکی می‌گردد اما راندمان حرارتی را افزایش می‌دهد. آن‌ها همچنین برای ارزیابی بهره‌وری سیستم به توسعه یک مدل اقتصادی (LCE) پرداختند. آن‌ها دریافتند که مقدار توان خروجی سالیانه برای سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک بدون پوشش تا ۵۳/۴۵ درصد و برای سیستم با پوشش ۳۷/۱ درصد افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۴ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک [۴۷]

در تحقیق دیگر پرویل و همکاران [۴۹] اقدام به طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب و فتوولتاییک کردند و به بررسی تاثیر بازتاب دهنده سهموی مرکب بر روی بازدهی الکتریکی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی پرداختند. در اقدامی دیگر برای مشاهده اثر نسبت تمرکز بر روی راندمان سیستم، متمرکزکننده‌های سهموی مرکب با هندسه‌های مختلف و نسبت تمرکزهای متفاوت طراحی کردند و بر روی آن آزمایش‌هایی را انجام دادند. برای مشاهده راندمان حرارتی سیستم نیز این محققان در مطالعه بعدی یک سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب فتوولتاییک- حرارتی طراحی و نمونه آزمایشگاهی را ساختند [۵۰]. هدف عمده آن‌ها مطالعه تغییرات بازدهی الکتریکی و حرارتی سیستم با توجه به تغییر زاویه تابش خورشید در طول روز بود. آن‌ها دریافتند متمرکزکننده سهموی مرکب با نسبت تمرکز بالاتر توانایی جذب تابش‌های مستقیم خورشید را در بازه طولانی‌تر از روز را دارد. جاز و همکاران [۵۱] نیز اقدام به طراحی و ساخت یک متمرکزکننده سهموی مرکب در مقیاس آزمایشگاهی کردند و سپس آن را با یک سیستم فتوولتاییک - حرارتی ترکیب کرده و در فضای باز مورد آزمایش قرار دادند. برای خنک کاری سلول‌های

خورشیدی از جت‌های آب استفاده کردند که تاکنون در مطالعات گذشته مورد ارزیابی قرار نگرفته است. هدف آن‌ها مشاهده تاثیر این نوع روش خنک کاری بر روی راندمان الکتریکی، حرارتی و راندمان کل سیستم بوده است. بر اساس اندازه گیری‌های انجام شده راندمان الکتریکی تا ۷ درصد، راندمان حرارتی تا ۸۱ درصد و راندمان کل سیستم تا ۳۱ درصد افزایش پیدا می‌کند.

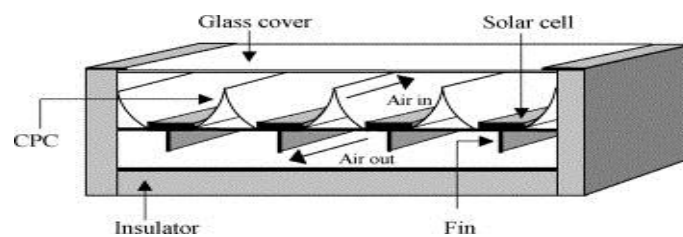


شکل ۲-۵ سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب و فتوولتاییک [۵۱]

بروگن و همکاران [۵۲] به مطالعه یک سیستم فتوولتاییک-حرارتی به همراه متمرکزکننده سهموی مرکب با نسبت تمرکز پایین پرداختند. آن‌ها برای خنک کاری سلول‌های خورشیدی از آب به عنوان سیال عامل استفاده کردند. همچنین از آلومینیم که دارای خواص مناسبی از جمله سبکی و شفافیت است برای ساخت متمرکزکننده سهموی استفاده کردند. آن‌ها گزارش کردند که در ارتفاعات زیاد راندمان کلی سیستم افزایش می‌یابد همچنین هزینه‌های مرتبط با توان تولیدی نیز به مراتب کاهش پیدا می‌کند. همچنین آن‌ها گزارش کردند که به دلایلی مختلفی نظیر افزایش شدت تابش بر روی سطح سلول‌های خورشیدی و در نتیجه افزایش دمای بیشتر سلول‌ها و همچنین توزیع غیر یکنواخت شدت تابش، اتلافات مقاومتی افزایش پیدا کرده در نتیجه مقدار فیل فاکتور^۱ تا ده درصد تحت تمرکز کاهش پیدا می‌کند. جتمن [۵۳] اقدام به طراحی و

^۱ Fill factor

ساخت یک کلکتور خورشیدی فتوولتاییک-حرارتی دو گذره که توسط هوا خنک می شد نمود. در این تحقیق از یک متمرکزکننده سهموی مرکب استفاده گردید. هدف او از این کار مطالعه راندمان سیستم در محدوده کاری مورد نظر بود. این سیستم شامل رشته سلول های خورشیدی برای تولید توان و همچنین یک متمرکزکننده سهموی مرکب برای افزایش شدت تابش خورشید بر روی رشته سلول های خورشیدی بود. در این آزمایش از هوا به عنوان سیال عامل خنک کاری استفاده گردید. به منزله افزایش راندمان خنک کاری از پره هایی متصل به پشت سلول های خورشیدی استفاده شد. آن ها در این آزمایش پارامترهای مختلفی نظیر دمای سیستم، سرعت باد، دبی جریان هوا، جریان و ولتاژ تولیدی، شدت تابش خورشیدی را با استفاده از یک سیستم ثبت داده^۱ اندازه گیری کردند و نتایج را مورد بحث و بررسی قرار دادند. آن ها مشاهده کردند که با افزایش دمای سیال عامل خنک کننده توان تولید شده توسط سیستم کاهش پیدا می کند. آن ها گزارش کردند که برای دریافت حداکثر راندمان سیستم، مقدار دمای سیال خنک کننده تا حد امکان می بایست پایین نگه داشته شود. آنچه این مطالعه نشان می دهد بیان گر این واقعیت است که استفاده از از پره ها باعث تسریع روند انتقال حرارت و خنک کاری سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب- فتوولتاییک شده که در نهایت منجر به افزایش راندمان سیستم می گردد.



شکل ۲-۶ سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب و فتوولتاییک دو گذره همراه با خنک کاری با هوا [۵۳]

کونگ و همکاران [۵۴] یک سیستم هیبریدی فتوولتاییک-حرارتی و یک متمرکزکننده سهموی مرکب با نسبت تمرکزپایین را مورد مطالعه قرار دادند. آن ها در این مطالعه قصد داشتند راندمان حرارتی و الکتریکی تحت شرایط مختلف آب و هوایی را مورد بررسی قرار دهند. مطالعات آن ها نشان داد در یک روز کامل آفتابی

^۱ Data logger

و هوای صاف راندمان الکتریکی و حرارتی به ترتیب ۱۰ و ۵۶ درصد می‌باشد. لی و همکاران [۵۵] گزارش کردند که ترکیب سیستم‌های فتوولتاییک و متمرکزکننده سهموی مرکب به مراتب انرژی بیش‌تری بر واحد سطح را نسبت به پنل‌های خورشیدی که به صورت پیوسته در کنارهم قرار می‌گیرند تولید می‌کنند. همچنین متمرکزکننده سهموی باعث کارایی بیشتر سیستم از نظر حرارتی می‌شود. برای راه اندازی یک سیستم تهویه مطبوع، العلیلی و همکاران [۵۶] اقدام به طراحی و ساخت یک سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک-حرارتی کردند. این سیستم شامل یک متمرکزکننده سهموی مرکب با نسبت تمرکز ۲ و همچنین یک سیستم فتوولتاییک-حرارتی بوده است. نتایج نشان داد که جدا کردن بارهای محسوس و نهان برای برآورده کردن نیازهای رطوبتی و دمایی ساختمان در مناطق گرمسیر و مرطوب امری بسیار مهم و حیاتی می‌باشد. گیکانگ و همکاران [۵۷] همچنین نشان دادند که سیستم هیبریدی فتوولتاییک-حرارتی که مجهز به متمرکزکننده سهموی مرکب می‌باشد دارای راندمان حرارتی و الکتریکی بهتری نسبت به سیستم‌های فتوولتاییک رایج دارند همچنین برای تولید مقدار معینی توان الکتریکی سلول‌های فتوولتاییک کم‌تری مورد نیاز است که در نهایت منجر به کاهش هزینه‌های مرتبط با تولید برق می‌گردد. امریزال همکاران [۵۸] مدل کامپیوتری برای سیستم‌های فتوولتاییک-حرارتی ارائه دادند و پس از انجام تست‌های آزمایشگاهی نتایج را با یکدیگر مقایسه کردند. طبق مشاهدات صورت گرفته تطابق مناسبی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل کامپیوتری مشاهده گردید. الامام و همکاران [۵۹] به بررسی سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک-حرارتی در ترکیب با مواد PCM پرداختند و نتایج خود را برای بازدهی الکتریکی و حرارتی ارائه نمودند. برای بررسی بهتر و مقایسه راندمان الکتریکی و حرارتی و همچنین ظرفیت ذخیره سازی مواد PCM دو آزمایش در دو روز کاملاً آفتابی و نیمه ابری انجام گرفت. در این مطالعه اتلافات حرارتی، مقدار انرژی مفید، راندمان حرارتی و راندمان حرارتی کلکتور خورشیدی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج راندمان حرارتی سیستم بین ۴۰ تا ۵۰ درصد برای روز آفتابی متغیر است. همچنین برای روز نیمه آفتابی این راندمان ۴۰ درصد است. راندمان کلی سیستم برای روز کاملاً آفتابی ۵۵ تا ۶۳ درصد و برای روز نیمه آفتابی ۴۶ تا ۵۵ درصد است.

۵-۲ معرفی پژوهش حاضر

هدف اصلی در این مطالعه طراحی، ساخت و ارزیابی یک سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب -فتوولتاییک می‌باشد. همان‌طوری‌که از نام آن مشخص است سیستم مورد نظر از دو قسمت اصلی یعنی یک متمرکزکننده سهموی مرکب و یک پنل فتوولتاییک تشکیل شده است.

برای طراحی متمرکزکننده سهموی مرکب ابتدا معادلات حاکم بر شدت تابش خورشیدی و همچنین معادلات حاکم بر هندسه و میزان شدت تابش دریافتی توسط این نوع متمرکزکننده در نرم افزار متلب نوشته شده و بر اساس آن بهینه سازی پارامترهای مورد نظر صورت گرفته است. با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم افزار متلب مدل ایجاد شده بهینه‌سازی شده است و پارامترهای اصلی نظیر زاویه پذیرش و شیب قرار گیری کلکتور محاسبه شده است. با استفاده از این پارامترها سایر مشخصات هندسی متمرکزکننده سهموی مرکب تعیین شده اند و درنهایت متمرکزکننده سهموی مرکب مورد نظر ساخته شده است. از آنجایی که پنل خورشیدی با ابعاد مورد نظر برای استفاده در سیستم طراحی شده به صورت تجاری در بازار موجود نبوده است، این پنل در ابعاد مورد نظر به صورت سفارشی توسط یک شرکت فعال در زمینه تولید پنل‌های خورشیدی طراحی و ساخته شده است.

در این پژوهش برای دستیابی به هدف گفته شده در فصل اول به معرفی انواع سلول‌های خورشیدی موجود در بازار و همچنین به معرفی متمرکزکننده سهموی مرکب پرداخته شده است. در فصل دوم به بررسی تحقیقات و مطالعات انجام شده در دو حوزه طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب و همچنین مطالعات انجام شده بر روی سیستم‌های متمرکزکننده سهموی مرکب -فتوولتاییک پرداخته شده است. در فصل سوم روابط و معادلات حاکم بر شدت تابش خورشیدی و همچنین معادلات حاکم بر هندسه متمرکزکننده سهموی مرکب و شدت تابش دریافتی توسط آن ارائه شده است تا بر اساس آن متمرکزکننده مورد نظر طراحی و ساخته شود. فصل چهارم در برگیرنده فرآیند ساخت و مونتاژ دستگاه متمرکزکننده سهموی مرکب - فتوولتاییک و نحوه انجام تست‌های مورد نظر بر روی دستگاه می‌باشد. در فصل پنجم نتایج حاصل از انجام

آزمایشات و تحلیل ها و نمودارهای مرتبط با هر آزمایش ارائه شده است و در نهایت در فصل ششم علاوه بر نتیجه گیری کلی اقدام به ارائه پیشنهاداتی در راستای توسعه هر چه موثرتر این سیستم ها شده است.

فصل سوم

مدل سازی و معادلات حاکم

۳-۱ مقدمه

در دسترس بودن نور خورشید در طول روز در بسیاری از نقاط جهان و همچنین دریافت راحت انرژی خورشیدی باعث شده است تا این بخش از انرژی سبز نسبت به سایر بخش‌های انرژی‌های تجدیدپذیر توسعه و پیشرفت بیش‌تری داشته باشد. اگرچه با وجود پنج دهه توسعه و تجاری سازی انرژی خورشیدی این منبع هنوز منبعی قابل اتکا به عنوان جایگزین برای سوخت‌های رایجی که برای تولید توان نظیر گازوئیل و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد نمی‌باشد. هزینه بالای تولید سلول‌های خورشیدی اولین و مهم‌ترین عاملی است که مانع گسترش این فناوری از ابتدا تا کنون شده است. به همین دلیل همواره محققان تلاش کرده اند تا با ارائه روش‌های گوناگون این هزینه را کاهش دهند. به طور کلی متمرکزکننده‌های سهموی از جمله متمرکزکننده‌های سهموی مرکب به عنوان راه حلی مناسب برای این منظور در نظر گرفته می‌شود. استفاده از متمرکزکننده‌های سهموی مرکب باعث می شود تا برای دست یابی به مقدار معینی توان از تعداد کم‌تری سلول خورشیدی استفاده شود که خود باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های مرتبط می شود. طبق آمارهای ارائه شده گرچه هنوز مقدار انرژی حاصل از متمرکزکننده‌های خورشیدی آن‌چنان قابل توجه نمی باشد اما سال به سال مقدار آن در حال افزایش می باشد.

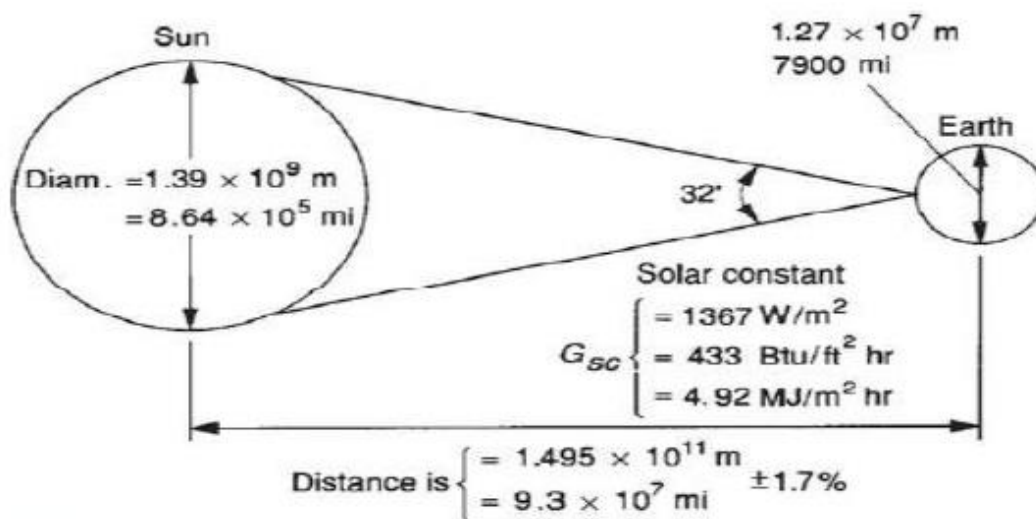
در این فصل ابتدا روابط و معادلات اولیه تابش خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته و سپس روابط و معادلات هندسی و تابشی حاکم بر متمرکزکننده سهموی مرکب ارائه شده است. بر اساس این معادلات مدلی برای متمرکزکننده سهموی مرکب ایجاد شده است و بر طبق این مدل طراحی دستگاه صورت پذیرفته است.

۲-۳ معادلات حاکم بر شدت تابش خورشید

آهنگ انرژی خورشیدی دریافتی بر روی یک مترمربع از سطح عمود بر جهت پرتو مستقیم، در فاصله میانگین زمین - خورشید خارج از اتمسفر کره زمین به عنوان ثابت خورشیدی تعریف می‌گردد. در منابع گوناگون مقادیر متفاوتی را برای آن ذکر نموده‌اند. در این مطالعه مقدار عددی ثابت خورشیدی ۱۳۶۷ وات بر متر مربع در نظر گرفته شده است [۳].

شدت تابش خورشیدی خارج از جو زمین روی صفحه عمود بر راستای تابش در روز n ام سال طبق رابطه (۱-۳) محاسبه می‌شود.

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



شکل ۱-۳ وضعیت نسبی زمین و خورشید نسبت به یکدیگر [۳]

در جو زمین تابش خورشید با برخورد به لایه اوزن، مولکول‌های هوا و سایر ذرات مانند گردوغبار و بخار آب و همچنین ابرها تضعیف می‌شود. به همین دلیل تابش رسیده به سطح زمین به دلیل عبور از جو، از مقدار گفته شده در رابطه (۱-۳) کم‌تر است. تابش خورشیدی که در صورت نبودن جو بر روی صفحه افقی جذب می‌شود از رابطه (۲-۳) محاسبه می‌شود.

$$G_o = G_{on} \cos(\theta_z) \quad (2-3)$$

θ_z زاویه برخورد پرتو مستقیم با جهت عمود بر صفحه افقی است که می‌توان آن را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta \quad (3-3)$$

φ عرض جغرافیایی محل مورد نظر، δ زاویه انحراف خورشیدی^۱ و ω زاویه ساعت^۲ خورشیدی است که به ترتیب بر اساس روابط (۴-۳) و (۵-۳) تا (۸-۳) محاسبه می‌شوند.

$$\delta = 23/45 \sin(360 \cdot (\frac{284 + n}{365})) \quad (4-3)$$

$$\omega = 15(AST - 12) \quad (5-3)$$

AST ^۳ زمان خورشیدی است و طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$AST = LST + [(\pm L_{st} - L_{loc}) + E - DS] \quad (6-3)$$

^۱ Solar declination angle

^۲ Hour angle

^۳ Apparent solar time

LST ^۱ ساعت رسمی محلی است که تابش در آن ساعت مدنظر است، L_{st} طول جغرافیایی برای زمان استاندارد، L_{loc} طول جغرافیایی محل مورد نظر است و DS ^۲ مقدار تغییر ساعت رسمی در تابستان و زمستان است که برای شش ماهه اول سال ۶۰ و برای شش ماهه دوم سال صفر دقیقه لحاظ می‌گردد.

در رابطه (۶-۳) E بیانگر نوسانات موجود در سرعت چرخش زمین است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E = 229/2 \left(0/000075 + 0/001868 \cos B - 0/32077 \sin B - 0/14615 \cos 2B - 0/4089 \sin 2B \right) \quad (7-3)$$

$$B = (n - 1) \left(\frac{360}{365} \right) \quad 1 \leq n \leq 360. \quad (8-3)$$

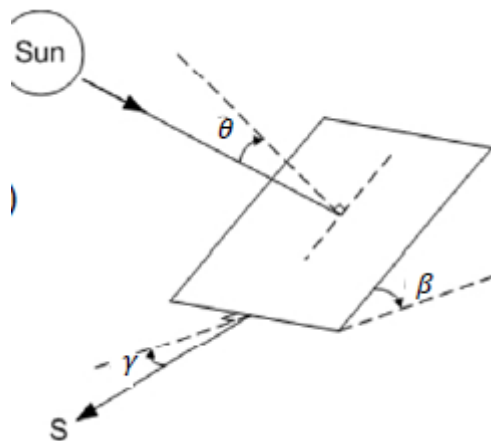
برای محاسبه تابش بر روی سطح شیبدار باید زاویه پرتو خورشید با عمود بر سطح به جای زاویه سمت الراس درنظر گرفته شود (شکل ۲-۳). این زاویه از رابطه (۹-۳) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \varphi \sin \delta \cos \beta \\ & - \cos \varphi \sin \delta \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \varphi \cos \delta \cos \beta \cos \omega \\ & + \sin \varphi \cos \delta \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (9-3)$$

در رابطه بالا θ زاویه برخورد پرتو مستقیم با نرمال صفحه شیب دار، β زاویه شیب صفحه همچنین γ زاویه سمت صفحه نسبت به جنوب می‌باشد.

^۱ Local standard time

^۲ Daylight saving



شکل ۳-۲ شماتیک برخورد پرتو خورشید بر روی سطح شیب دار [۳]

۳-۳ تخمین تشعشع آسمان صاف

روابط (۱-۳) تا (۹-۳)، شار تشعشعی خورشید را در عدم حضور جو زمین محاسبه می کنند. شدت تابشی خورشید پس از عبور از جو به مراتب ضعیف تر از آن قبل از ورود به جو زمین است. در محاسبات سیستم های خورشیدی این تغییرات می بایست لحاظ شود به همین دلیل از مدل های دیگری برای تخمین شدت تابش استفاده می شود. که در این قسمت به ارائه آن ها می پردازیم. برای تخمین شدت تابش های دریافتی بر مبنای داده های اندازه گیری شده مدل های مختلفی ارائه شده است [۳]. در این قسمت مدل ایزوتروپیک^۱ برای محاسبه شار تشعشعی خورشید ارائه شده است.

بر مبنای مدل ایزوتروپیک، تشعشع نرمال (عمودی) مستقیم در آسمان صاف به صورت زیر ارائه می شود.

$$G_{cnb} = G_{on} \tau_b \quad (۱۰-۳)$$

^۱ Isotropic model

τ_b ضریب عبور^۱ تابش از جو برای تابش مستقیم می باشد. τ_b را می توان به صورت نسبت تابش مستقیم با حضور جو به تابش مستقیم بدون حضور تعریف نمود. این نسبت به صورت زیر بیان می شود.

$$\tau_b = \left(\frac{G_{cnb}}{G_{on}} \right) \quad (۱۱-۳)$$

برای محاسبه مقدار τ_b می توان از روابط زیر استفاده کرد.

$$\tau_b = a_1 + a_2 \exp\left(\frac{-k}{\cos \theta}\right) \quad (۱۲-۳)$$

ضرایب a_1 ، a_2 و k به صورت تجربی با توجه به نوع اقلیم و ارتفاع از سطح دریا در مراجع ارائه شده است [۳]. در شرایط آسمان صاف، شدت تابش مستقیم بر روی صفحه افقی از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$G_{cb} = \tau_b G_o = \tau_b G_{on} \cos \theta_z \quad (۱۳-۳)$$

همانند ضریب تعریف شده برای جزء تابش مستقیم، ضریب τ_d برای محاسبه تابش پخشیده دریافت شده در سطح زمین استفاده می شود.

$$G_{cd} = \tau_d G_o = \tau_d G_{on} \cos \theta_z \quad (۱۴-۳)$$

$$\tau_d = \frac{G_d}{G_o} = 0.271 - 0.294 \tau_b \quad \text{رابطه (۱۵-۳)}$$

معادلات (۱۳-۳) و (۱۴-۳) بیان گر محاسبه تابش مستقیم و پخشیده در حضور جو می باشند. با توجه به این روابط می توان شدت کل تابش خورشید را به صورت مجموع تابش مستقیم و پخشیده در نظر گرفت.

$$G_c = G_{cb} + G_{cd} = (\tau_b + \tau_d) G_{on} \cos \theta_z \quad (۱۶-۳)$$

^۱ Transmittance coefficient

در محاسبه تابش بر روی یک سطح شیبدار علاوه بر تابش مستقیم و پخشیده، تابش انعکاسی^۱ از سطح زمین و اجسام نیز باید در نظر گرفته شود. بنابراین معادله کلی تابش خورشیدی بر روی سطح شیبدار در حضور جو به صورت زیر بیان می‌شود.

$$G_{ct} = G_{cbt} + G_{cdt} + G_{crt} \quad (۱۷-۳)$$

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

G_{cb} شدت تابش مستقیم خورشیدی، G_{cd} شدت تابش پخشیده، ρ_g ضریب انعکاس سطح و R_b نسبت تشعشع مستقیم روی سطح شیبدار به تابش مستقیم روی سطح افقی است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$R_b = \frac{G_{bt}}{G_b} = \frac{G_{bn} \cos \theta}{G_{bn} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (۱۸-۳)$$

۳-۴ معادلات و روابط حاکم بر هندسه متمرکزکننده‌های سهموی مرکب

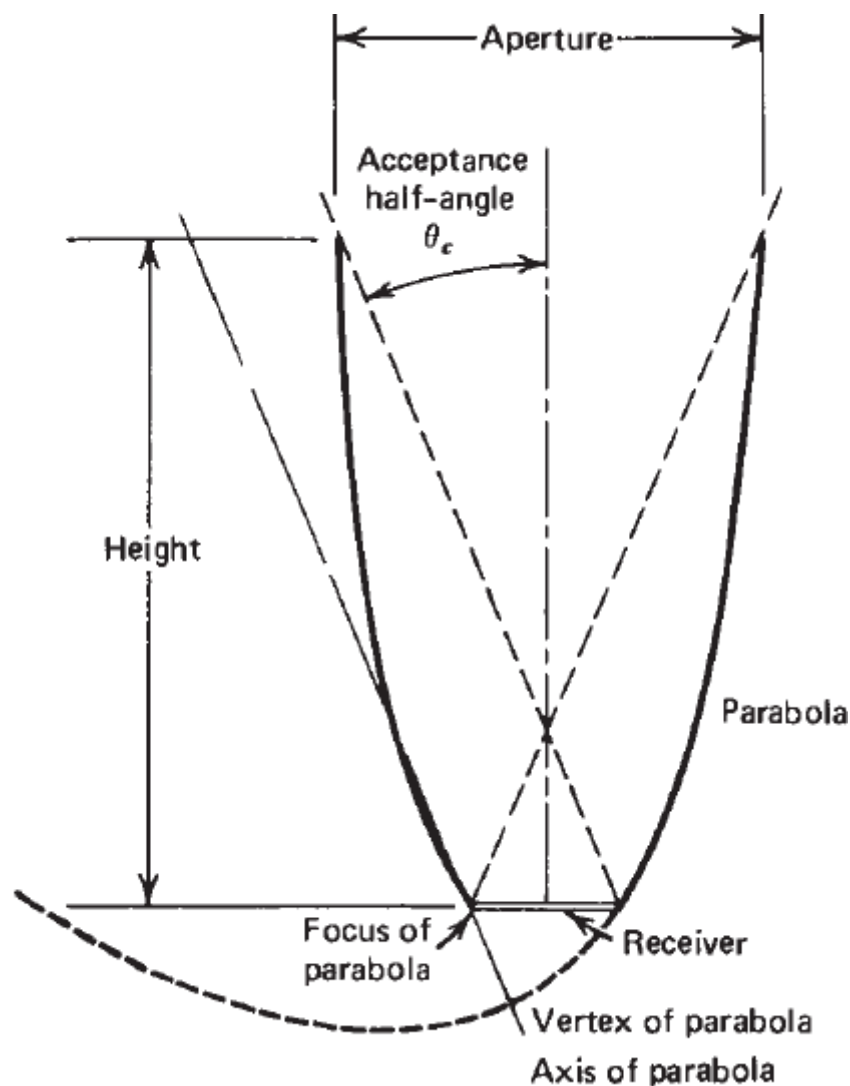
همان‌طوری که گفته شد متمرکزکننده‌های سهموی مرکب در دسته متمرکزکننده‌هایی که تصویر واضحی از خورشید ایجاد نمی‌کنند، قرار می‌گیرند. این گونه متمرکزکننده‌ها دارای نسبت تمرکز پایینی می‌باشند. مهم‌ترین ویژگی آن‌ها توانایی جذب تابش خورشیدی در بازه‌ای از روز می‌باشد و بر خلاف متمرکزکننده‌های سهموی خطی نیازی به ردیاب خورشیدی ندارند. طراحی بهینه متمرکزکننده‌های سهموی مرکب جزء

^۱ Reflected radiation

چالش‌هایی است که محققان همواره با آن روبه‌رو بوده‌اند. در این قسمت به بررسی معادلات، روابط و شرایط حاکم برای طراحی یک متمرکزکننده سهموی مرکب پرداخته شده است.

متمرکزکننده‌های سهموی مرکب برای اولین بار توسط هینتربرگر و وینستون در سال ۱۹۶۶ در ساخت وسایلی برای شناسایی تابش چرنوکو^۱ در علم فیزیک انرژی بالا طراحی شده و مورد استفاده قرار گرفتند. پتانسیل استفاده از متمرکزکننده‌های سهموی مرکب در کلکتورهای خورشیدی برای اولین بار توسط آقای وینستون [۳۷] در سال ۱۹۷۴ مورد مطالعه قرار گرفت. این مطالعات بعدها مبنای مطالعات دیگر نظیر ولفرد و وینستون [۳۸]، رابل [۳۹] و بسیاری دیگر از محققان در سال‌های بعد گردید. در شکل ۳-۳ نمونه‌ای از یک متمرکزکننده سهموی مرکب و متغیرهای مهم در طراحی آن شامل نصف زاویه پذیرش θ_c ، عرض دهانه ورودی و خروجی و همچنین ارتفاع h نشان داده شده است.

^۱ Cherenkov radiation

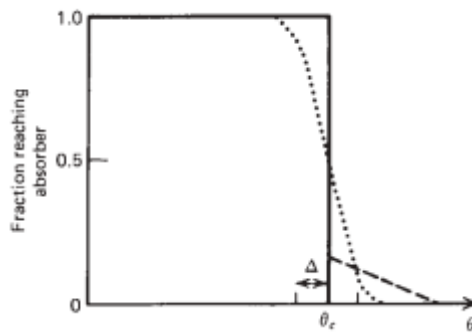


شکل ۳-۳ متمرکزکننده سهموی مرکب [۳۷]

۳-۴-۱ مدل سازی هندسی متمرکزکننده های سهموی مرکب کامل^۱

شکل ۳-۴ درصدی از تابش های خورشیدی که وارد دهانه متمرکزکننده سهموی مرکب می شود و در محدوده زاویه پذیرش قرار می گیرند و بر روی جاذب قرار می گیرند را نشان می دهد. برخلاف متمرکزکننده سهموی خطی که تنها قابلیت تمرکز پرتوهای موازی با محور تقارن خود را دارد، متمرکزکننده سهموی مرکب تمامی تابش ها در محدوده زاویه پذیرش خود را دریافت و بر روی جاذب منعکس می کند.

^۱ Full compound parabolic concentrator



شکل ۳-۴ درصد تابش متمرکز شده بر روی جاذب توسط متمرکز کننده سهموی مرکب [۳۹]

در شرایط ایده آل با توجه به شکل بالا مشاهده می شود که اگر زاویه برخورد تابش های خورشیدی با سطح متمرکز کننده در محدوده کم تر از زاویه پذیرش قرار گیرد تمامی آن بر روی جاذب متمرکز می شود. وینستون و همکاران [۳۷] نشان دادند که بالاترین حد نسبت تمرکز برای متمرکز کننده های سهموی مرکب طبق رابطه زیر محاسبه می شود.

$$C_{max} = \frac{1}{\sin \theta_c} = \frac{A_a}{A_r} \quad (۱۹-۳)$$

با استفاده از رابطه ۳-۱۹ مساحت دهانه ورودی متمرکز کننده سهموی مرکب مطابق با رابطه ۳-۲۰ بیان می گردد.

$$A_a = \frac{A_r}{\sin \theta_c} \quad (۲۰-۳)$$

A_a مساحت دهانه ورودی^۱ و A_r مساحت جاذب می باشد. ولفورد و وینستون [۳۸] به ارائه روابط و معادلات هندسی حاکم بر متمرکز کننده های سهموی مرکب کامل پرداختند که به صورت زیر ارائه می شوند.

$$f = a' (1 + \sin \theta_c) \quad (۲۱-۳)$$

^۱ Entrance apertuer area

^۲ Reciever area

که f فاصله کانونی سهمی و a' نصف عرض جاذب و θ_c نصف زاویه پذیرش می باشد. ارتفاع متمرکزکننده سهموی از رابطه (۲۲-۳) محاسبه می گردد.

$$h = \frac{f \cos \theta_c}{\sin^2 \theta_c} \quad (22-3)$$

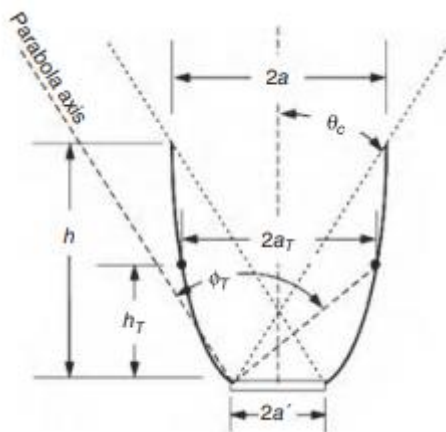
همچنین مساحت متمرکزکننده سهموی مرکب نیز طبق رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\frac{A_{ref}}{a} = f \left[\frac{\cos(\phi/2)}{\sin^2(\phi/2)} + \ln \cot\left(\frac{\phi}{4}\right) \right] \quad \frac{\pi}{2} + \theta_c \leq \phi \leq 2\theta_c \quad (23-3)$$

۳-۴-۲ مدل سازی هندسی متمرکزکننده های سهموی مرکب برش داده شده^۱

متمرکزکننده های سهموی مرکب به صورت ذاتی در مقایسه با دهانه ورودی آن ها صفحات سهموی بلندی هستند. در نتیجه برای ساخت آن ها نیاز به مواد اولیه زیادی می باشد. ساخت این نوع هندسه باعث می شود علاوه بر سنگین و حجیم شدن متمرکزکننده در حین نصب نیز مشکلات فراوانی بوجود آید. طبق مطالعات حذف کردن لبه های متمرکزکننده باعث کاهش ارتفاع آن می شود اما باعث کاهش قابل توجهی در راندمان سیستم نمی شود.

^۱ Truncated compound parabolic concentrator



شکل ۳-۵ متمرکزکننده سهموی برش داده شده [۳]

مقادیر دهانه ورودی a_T ، ارتفاع متمرکزکننده سهموی مرکب پس از برش زدن h_T ، نسبت تمرکز C_t ، مساحت منعکس کننده A_{RT} و تعداد تابش‌های دریافتی متمرکزکننده n طبق روابط (۳-۲۴) تا (۳-۲۹) محاسبه می‌شود [۳].

$$a_T = \frac{f \sin(\phi_T - \theta_c)}{\sin^2(\phi_T/2)} - a' \quad (3-24)$$

$$h_T = \frac{f \cos(\phi_T - \theta_c)}{\sin^2(\phi_T/2)} \quad (3-25)$$

$$C_t = \frac{a_T}{a'} \quad (3-26)$$

$$\frac{A_{RT}}{a_T} = f \left[\frac{\cos(\phi/2)}{\sin^2(\phi/2)} + \ln \cot\left(\frac{\phi}{4}\right) \right] \quad \frac{\pi}{2} + \theta_c \leq \phi \leq \phi_T \quad (3-27)$$

$$n = \max \left[C \frac{A_{RT}}{f a_T} - \frac{x^2 - \cos^2 \theta_c}{2(1 + \sin \theta_c)}, 1 - \frac{1}{C} \right] \quad (3-28)$$

$$x = \left(\frac{1 + \sin \theta_c}{\cos \theta_c} \right) \left(-\sin \theta_c + \left(1 + \frac{h_t}{h} \cot^2 \theta_c \right)^{1/2} \right) \quad (3-29)$$

۳-۵ محاسبه شدت تابش دریافتی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب

مقدار کل تابش جذب شده توسط متمرکزکننده سهموی مرکب به صورت زیر بیان می‌شود [۳].

$$S = G_{b.cpc} \tau_{c.b} \tau_{cpc.b} \alpha_b + G_{d.cpc} \tau_{c.d} \tau_{cpc.d} \alpha_d + G_{g.cpc} \tau_{c.g} \tau_{cpc.g} \alpha_g \quad (30-3)$$

$\tau_{c,b}$ ضریب عبور تابش مستقیم برای هرگونه پوشش که بر روی متمرکزکننده قرار می‌گیرد می‌باشد و α_b ضریب جذب تابش مستقیم برای جاذب است. τ_{cpc} به عنوان ضریب عبور برای سطح متمرکزکننده سهموی مرکب تعریف می‌شود و نشان دهنده اتلافات تابشی است و تابعی از میانگین تعداد بازتاب n می‌باشد که از رابطه (۳۱-۳) محاسبه می‌شود [۳].

$$\tau_{CPC} = \rho^n \quad (31-3)$$

رابطه (۳۲-۳) بیان‌گر جزء تابش مستقیم متمرکزکننده سهموی مرکب در رابطه (۳۰-۳) می‌باشد [۳].

$$G_{b.cpc} = F G_{bn} \cos \theta \quad (32-3)$$

$$F = \begin{cases} 1 & (\beta - \theta_c) \leq \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos \gamma_s) \leq (\beta + \theta_c) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (33-3)$$

برای محاسبه $G_{d.CPC}$ و $G_{g.CPC}$ مربوطه به جزء تابش پخشیده و انعکاسی نیز از رابطه (۳۴-۳) و (۳۵-۳) استفاده می‌شود [۳].

$$G_{d.CPC} = \begin{cases} \frac{G_d}{C} & \text{if } (\beta + \theta_c) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{C} + \cos \beta \right) & \text{if } (\beta + \theta_c) > 90^\circ \end{cases} \quad (34-3)$$

$$G_{g.CPC} = \begin{cases} 0 & \text{if } (\beta + \theta_c) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{C} - \cos \beta \right) & \text{if } (\beta + \theta_c) > 90^\circ \end{cases} \quad (35-3)$$

با استفاده از روابط گفته شده می‌توان مقدار انرژی تابشی خورشیدی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب را محاسبه کرد.

۳-۶ محاسبه توان الکتریکی تولیدی توسط سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب - فتوولتاییک

در قسمت قبل مقدار انرژی تابشی دریافتی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب محاسبه گردید. برای محاسبه مقدار توان الکتریکی تولیدی توسط سیستم علاوه بر داشتن مقدار انرژی تابشی دریافتی، نیاز به دانستن راندمان سلول خورشیدی استفاده شده نیز می‌باشد. معمولاً راندمان مرجع سلول‌های خورشیدی توسط شرکت‌های سازنده ارائه می‌شود که این راندمان تحت شرایط استاندارد یعنی دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و شدت تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع محاسبه شده است. در شرایط مشابه شرایط استاندارد می‌توان از این راندمان برای محاسبه مقدار توان الکتریکی تولید شده استفاده کرد. اما طبق تحقیقات انجام شده راندمان سلول‌های خورشیدی تابعی از تغییرات دمای آن می‌باشد و با توجه به دما سلول خورشیدی در هر لحظه مورد نظر می‌بایست محاسبه شود. این روابط به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\eta = \frac{p}{SA_a} \quad (36-3)$$

در رابطه بالا p حداکثر توان الکتریکی تولیدی، S تابش دریافتی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب و A_a مساحت دهانه ورودی منعکس کننده می‌باشد.

تغییرات راندمان پنل خورشیدی با دما به صورت زیر بیان می‌شود [۴۷].

$$\eta = \eta_{ref} (1 - \beta(T_{cell} - T_{ref})) \quad (37-3)$$

β مقدار ثابت وابسته به نوع سلول خورشیدی می‌باشد. همچنین T_{cell} دمای سطح سلول، T_{ref} دمای مرجع می‌باشد.

با ترکیب روابط (۳-۳۶) و (۳-۳۷) می‌توان حداکثر توان الکتریکی تولیدی توسط سیستم متمرکزکننده - فتوولتاییک محاسبه کرد [۴۷].

$$p = (\eta_{ref} (1 - \beta(T_{cell} - T_{ref}))) SA_a \quad (38-3)$$

فصل چهارم

طراحی و ساخت متمرکزکننده سهموی مرکب

۴-۱ مقدمه

در فصل سوم ابتدا معادلات و روابط حاکم بر شدت تابش خورشیدی، سپس معادلات هندسی و همچنین روابط حاکم بر میزان شدت تابش خورشیدی دریافتی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب برای طراحی آن‌ها ارائه گردید. از آنجایی که این متمرکزکننده‌ها دارای ساختار نسبتاً پیچیده‌ای هستند دستیابی به بهترین هندسه ممکن برای دریافت حداکثر میزان تابش خورشیدی و همچنین به حداقل رساندن هزینه‌ها امری بسیار ضروری و مهم است. مهم‌ترین چالش‌های پیش‌رو در طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب دستیابی به ایده‌آل‌ترین هندسه ممکن در جهت دستیابی به توزیع هر چه یکنواخت‌تر تابش بر روی جاذب آن می‌باشد. از ابتدای پیدایش متمرکزکننده‌های سهموی مرکب محققان با استفاده از روش‌های مختلف سعی در طراحی این نوع متمرکزکننده‌ها به بهینه‌ترین شکل ممکن داشته‌اند و راه‌ها و روش‌های گوناگونی را امتحان کرده‌اند. در سال‌های اخیر مدل‌سازی‌ها و شبیه‌سازی‌های فراوانی در نرم‌افزارهای نوری برای رسیدن به بهترین هندسه ممکن انجام شده است. در این فصل ابتدا به تشریح مدل توسعه داده شده برای طراحی بهینه متمرکزکننده سهموی مرکب در نرم‌افزار متلب پرداخته شده است و بعد از آن فرآیند ساخت متمرکزکننده سهموی مرکب تشریح می‌گردد.

۴-۲ مشخصات پنل خورشیدی

در این مطالعه از سلول خورشیدی سیلیکونی تک کریستالی به عنوان دریافت‌کننده استفاده شده است. مشخصات هندسی و الکتریکی ماژول‌های^۱ خورشیدی در جدول ۴-۱ آورده شده است. در این ماژول خورشیدی از ۲۱ سلول برش خورده استفاده شده است و با توجه به این که ابعاد مورد نظر به صورت تجاری

^۱ Modules

در بازار موجود نیست، به صورت سفارشی تولید شده است. سپس با استفاده از اتصالات مخصوص قاب مناسبی برای ماژول تهیه و نصب شده است (شکل ۴-۱).



شکل ۴-۱ پنل خورشیدی تک کریستالی استفاده شده در سیستم طراحی شده

جدول ۴-۱ مشخصات هندسی و الکتریکی پنل خورشیدی تک کریستالی

۲۶/۵	توان نامی پنل (W)
۱۱/۵	ولتاژ ماکزیمم توان (V)
۲/۴	جریان ماکزیمم توان (A)
۲/۶۵	جریان اتصال کوتاه (A)
۱۳/۶۵	ولتاژ مدار باز (V)
۱۰۰۰	شدت تابش استاندارد (W/m^2)
۲۵	دمای محیط استاندارد ($^{\circ}\text{C}$)
۱۷	راندمان مرجع
۱۱	عرض پنل (cm)
۱۲۰	طول پنل (cm)
۱۲۰×۱۱	مساحت ناخالص پنل (cm^2)
۱۱۵×۸	مساحت خالص پنل (cm^2)

۴-۳ بهینه سازی طرح متمرکزکننده سهموی مرکب

طراحی هندسی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب کاری به نسبت پیچیده و دشوار است و پارامترهای زیادی نظیر مقدار زاویه پذیرش، درصد برش، شیب قرارگیری کلکتور، موقعیت جغرافیایی و شرایط ساخت در دستیابی به بهترین هندسه متمرکزکننده سهموی مرکب اثر گذارند. ابعاد هندسی متمرکزکننده سهموی مرکب باید به گونه‌ای انتخاب شود که در طول یک بازه مشخص از روز حداکثر میزان تابش خورشیدی دریافت گردد و از لحاظ اقتصادی نیز کمترین هزینه برای ساخت متمرکزکننده صرف گردد. برای غلبه بر عوامل گفته شده می‌توان از ابزارهای بهینه‌سازی برای تعیین ابعاد بهینه متمرکزکننده سهموی مرکب استفاده کرد. در میان موارد گفته شده دو پارامتر زاویه پذیرش و شیب قرارگیری کلکتور در میزان دریافت تابش خورشیدی نقش مهم‌تری دارند که در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۴-۳-۱ زاویه پذیرش

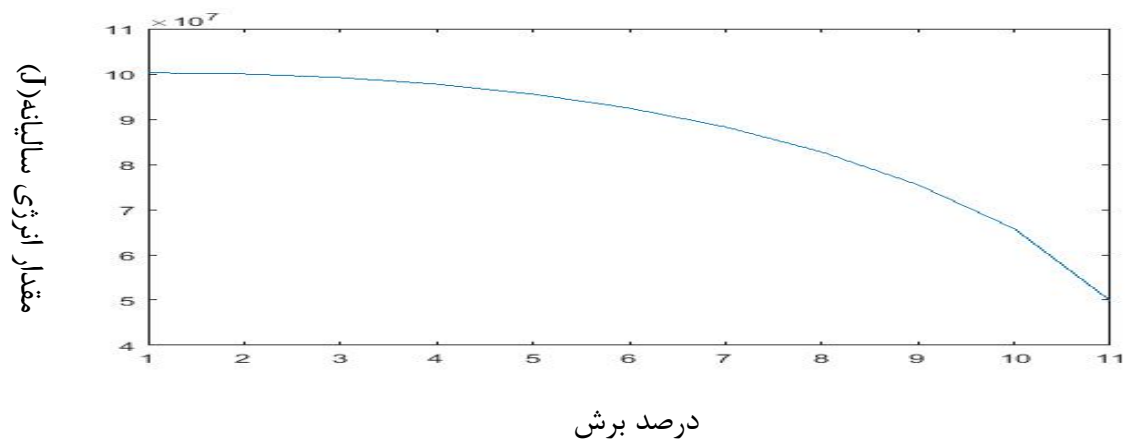
زاویه پذیرش به عنوان اصلی‌ترین و مهم‌ترین پارامتر در طراحی متمرکزکننده‌های سهموی مرکب در نظر گرفته می‌شود. در فصل قبل مشاهده شد با داشتن مقدار زاویه پذیرش سایر پارامترهای هندسی مرتبط با متمرکزکننده‌های سهموی مرکب را می‌توان تعیین کرد. رابطه ۳-۱۹ ارتباط بین زاویه پذیرش و نسبت تمرکز متمرکزکننده‌های سهموی مرکب را نشان می‌دهد. با توجه به این رابطه با افزایش مقدار زاویه پذیرش نسبت تمرکز کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه راندمان متمرکزکننده سهموی مرکب کاهش پیدا می‌کند. در مقادیر زاویه‌های پذیرش کوچک مقدار نسبت تمرکز افزایش پیدا می‌کند اما به دلیل کوچک بودن مقدار

زاویه پذیرش، متمرکزکننده در بازه کوتاه‌تری از روز توانایی دریافت تابش خورشید را دارد در نتیجه برای دریافت تابش خورشید نیاز به دستگاه‌های ردیاب خورشیدی وجود دارد. همچنین در زاویه‌های پذیرش کوچک مانند ۱۰ درجه، ارتفاع متمرکزکننده سهموی مرکب به بیش از یک متر می‌رسد که باعث بوجود آمدن مشکلات فراوانی در طی فرآیند ساخت می‌گردد. باتوجه به موارد گفته شده تعیین مقدار زاویه پذیرش برای ساخت متمرکزکننده سهموی مرکب باید به گونه‌ای باشد که در شرایط جغرافیایی مدنظر بتوان مقدار مناسبی از تابش خورشید را دریافت کرد همچنین مقدار هزینه‌های ساخت را به کم‌ترین میزان ممکن کاهش داد.

۴-۳-۲ تعیین درصد برش ارتفاع متمرکزکننده سهموی مرکب

هندس متمرکزکننده سهموی مرکب به گونه‌ای است که لبه‌های انتهایی آن موازی با محور مرکزی می‌شود و طبق مشاهدات صورت گرفته [۳۹]. این لبه‌ها مشارکت اندکی در مقدار دریافت شدت تابشی توسط متمرکزکننده سهموی مرکب دارند بنابراین می‌توان از آن‌ها صرف نظر کرد و به عبارتی ارتفاع متمرکزکننده را کاهش داد. نسبت ارتفاع کاهش یافته متمرکزکننده سهموی مرکب به ارتفاع اولیه به عنوان درصد برش تعریف می‌شود. با توجه به نمودار (۴-۲) می‌توان مشاهده کرد سرعت کاهش انرژی دریافتی سالانه بر حسب درصد برش توسط جاذب در ابتدا کم بوده و سپس افزایش پیدا می‌کند. مثلاً مشاهده می‌شود با ۵۰ درصد برش ارتفاع متمرکزکننده سهموی مرکب کمتر از ۱۰ درصد میزان انرژی دریافتی کاهش می‌یابد.

این موضوع علاوه بر کاهش سطح مورد نیاز انعکاس دهنده، سهولت در نصب و کاهش وزن سازه را نیز به دنبال خواهد داشت. همچنین بازده سیستم نیز کاهش ناچیزی دارد.



شکل ۴-۲ نمودار افت میزان انرژی تابشی دریافتی توسط جاذب بر حسب درصد برش ارتفاع

۴-۳-۳ شیب قرار گیری کلکتور

سلول‌های خورشیدی زمانی که نور خورشید به صورت عمود به سطح آن‌ها تابیده می‌شود راندمان بهتری از خود نشان می‌دهند. برای این منظور می‌بایست کلکتور خورشیدی در زاویه‌ای مناسب قرار گیرد تا بتوان در طول روز میزان حداکثر تابش عمود خورشیدی را دریافت کرد. شیب قرار گیری کلکتورهای خورشیدی در نواحی مختلف کره زمین متفاوت است و به مقدار عرض جغرافیایی آن منطقه وابسته است. همچنین این مقدار شیب در تمامی فصول یکسان نیست به همین دلیل بسیاری از سیستم‌های خورشیدی علاوه بر داشتن سیستم ردیاب خورشیدی روزانه به صورت فصلی نیز شیب قرار گیری آن‌ها تغییر می‌کند. با توجه به روابط ارائه شده در فصل سوم مشخص گردید که انعکاس مناسب پرتوها و دریافت آن‌ها توسط جاذب به شدت به زاویه ورود پرتو به سطح متمرکزکننده سهموی مرکب بستگی دارد. از سوی دیگر زاویه پذیرش و درصد برش

مناسب نیز به همین دلیل به شیب کلکتور وابسته است. لذا این پارامتر نقش مهمی در طراحی سایر پارامترهای بهینه سیستم دارد. بررسی این پارامترها لزوم انجام بهینه سازی را جهت طراحی مناسب متمرکزکننده سهموی مرکب مشخص نمود.

۴-۳-۴ بهینه سازی

برای تعیین ابعاد هندسی بهینه متمرکزکننده سهموی مرکب یک مدل ریاضی در نرم افزار متلب نوشته شده است و با استفاده از بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک موجود در نرم افزار متلب پارامترهای بهینه مورد نظر (مقدار زاویه پذیرش، شیب قرارگیری کلکتور) استخراج شده است. در این مدل با ترکیب معادلات هندسی و تابشی حاکم بر متمرکزکننده های سهموی مرکب سعی شده است تا ابعاد و مشخصات هندسه بهینه برای ساخت متمرکزکننده استخراج گردد. دو پارامتر مهم در طراحی متمرکزکننده برای دریافت تابش حداکثری مقدار زاویه پذیرش و شیب قرارگیری کلکتور می باشند که به عنوان متغیرهای تصمیم^۱ ورودی تابع هدف در نظر گرفته شده اند. به همین دلیل تابع زیر با هدف دریافت حداکثر میزان انرژی الکتریکی سالیانه Q_u نسبت به کمترین میزان مساحت ممکن برای متمرکزکننده A_r به صورت زیر تعریف می گردد.

$$\min f(\theta_c, \beta) = -\frac{Q_u}{A_r} \quad (۱-۴)$$

$$\text{Subjected to } \begin{cases} 0 \leq \theta_c \leq 90 \\ 0 \leq \beta \leq 90 \end{cases}$$

^۱ Decision variable

۴-۳-۵ روش بهینه‌سازی

امروزه با گسترش نرم افزارهای شبیه‌سازی روش‌های متنوع و کارآیی برای بهینه‌سازی مدل‌های ریاضی توسعه داده شده است. نرم افزار متلب یکی از قوی‌ترین و بهترین ابزارهای موجود برای بهینه‌سازی این مدل‌ها می‌باشد. در ماژول بهینه‌سازی این نرم افزار روش‌های مختلفی بهینه‌سازی وجود دارد که از آن‌ها می‌توان بهره گرفت. یکی از معروف‌ترین و پرکاربردترین این روش‌ها الگوریتم ژنتیک^۱ می‌باشد که در این پژوهش برای بهینه‌سازی مدل ایجاد شده استفاده شده است که در این قسمت معرفی می‌گردد.

۴-۳-۵-۱ الگوریتم ژنتیک

به طور کلی الگوریتم‌های ژنتیک به عنوان الگوریتم‌های بهینه‌ساز تابع^۲ شناخته می‌شوند. از این الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی توابع هدف^۳ استفاده می‌شود. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، معمولاً با تولید جمعیتی از کروموزوم‌ها آغاز می‌شود (جمعیت اولیه از کروموزوم‌ها در الگوریتم‌های ژنتیک معمولاً تصادفی تولید می‌شوند و مقید به حد بالا و پایین متغیرهای مسأله هستند). در مرحله بعد ساختارهای داده‌ای تولید شده (کروموزوم‌ها) ارزیابی می‌شوند و کروموزوم‌هایی که به شکل بهتری می‌توانند جواب بهینه^۴ مسأله مورد نظر را نمایش دهند شانس بیشتری برای تولید مثل نسبت به جواب‌های ضعیف‌تر پیدا می‌کنند به عبارتی دیگر فرصت‌های تولید مثل بیشتری به این دسته از کروموزوم‌ها اختصاص داده می‌شود. میزان خوب بودن یک جواب، معمولاً نسبت به جمعیت جواب‌های کاندید فعلی سنجیده می‌شود.

^۱ Genetic algorithm

^۲ Function optimizer

^۳ Objective function

^۴ Optimal solution

پس از انجام محاسبات مقدار بهینه نصف زاویه پذیرش ۲۵ درجه و شیب بهینه قرار گیری کلکتور ۳۵ درجه محاسبه گردید. بر اساس این مقادیر سایر پارامترهای هندسی متمرکزکننده سهموی مرکب نیز محاسبه شده است که این مقادیر در جدول ۴-۲ آورده شده‌اند.

جدول ۴-۲ ابعاد هندسی متمرکزکننده سهموی مرکب ساخته شده

پارامتر	مقدار
نصف زاویه پذیرش	۲۵
طول کانونی (cm)	۳
ارتفاع متمرکزکننده استاندارد کامل (cm)	۲۹/۳
ارتفاع متمرکزکننده بعد از برش (cm)	۷/۸
عرض دهانه ورودی متمرکزکننده سهموی کامل (cm)	۱۹
عرض دهانه ورودی متمرکزکننده سهموی برش خورده (cm)	۱۴
نسبت تمرکز متمرکزکننده سهموی کامل	۲/۳۴
نسبت تمرکز متمرکزکننده سهموی برش خورده	۱/۷
عرض دهانه خروجی (cm)	۸

۴-۴ فرآیند ساخت

۴-۴-۱ ساخت تکیه گاه

بعد از تعیین ابعاد مهم در طراحی متمرکزکننده سهموی مرکب نظیر زاویه پذیرش و ارتفاع اقدام به ساخت آن شده است. هندسه اولیه متمرکزکننده سهموی مرکب در نرم افزار سالید ورکز^۱ ترسیم شده است و به کمک دستگاه CNC موجود در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود این هندسه بر روی چوب‌هایی درخت

^۱ Solid works

گردو که دارای استحکام مناسب و همچنین مقاومت مناسبی در برابر حرارت و رطوبت دارد حکاکی شده است تا از آن به عنوان تکیه گاه مناسب برای قرار گیری ورق انعکاس دهنده استفاده شود.



شکل ۳-۴ چوب‌های درخت گردوی استفاده شده در ساخت تکیه‌گاه متمرکزکننده سهموی مرکب



شکل ۴-۴ حکاکی پروفیل متمرکزکننده سهموی مرکب طراحی شده بر روی چوب توسط CNC

۴-۴-۲ انتخاب ماده مناسب برای سطح منعکس کننده

مواد بسیار زیادی هستند که دارای خواص مورد نظر برای استفاده در ساخت دستگاه متمرکز کننده می باشند. باید توجه داشت که دستگاه باید به گونه ای ساخته شود که از لحاظ اقتصادی کاملاً مقرون به صرفه باشد و از ایجاد هزینه های مازاد پرهیز گردد. از میان تعداد بی شمار مواد مناسب، آلومینیم و فولاد ضد زنگ برای این کار مناسب می باشند. که در این قسمت به بررسی هر کدام از آن ها پرداخته شده است و مزایای هر کدام از آن ها را بر شمرده می شود.

برخی از خواص آلومینیم، ظاهر زیبا و شفاف، ساخت آسان، مقاومت به خوردگی بالا، چگالی پایین و همچنین چقرمگی شکست بالا می باشد که باعث شده از این فلز در صنایع مختلف و برای مصارف گوناگون استفاده شود. برای پوشاندن سطح تکیه گاه های چوبی ساخته شده می توان از آلومینیم به عنوان انتخابی مناسب بهره گرفت.

از جمله مهم ترین خواص فولاد ضد زنگ مقاومت به خوردگی بالای آن است که قابلیت استفاده در شرایط آب و هوایی مختلف را دارد. همچنین این آلیاژ خواص مکانیکی مناسبی دارد، به راحتی شکل داده می شود، در دسترس است و نسبت به آلومینیم ارزان تر است.

با توجه به مطالعات گذشته و مواد استفاده شده برای سطح منعکس کننده، برای این کار از ورق فولاد ضد زنگ شفاف با ضخامت ۰/۳ میلی متر که علاوه بر دارا بودن سطح صیقل داده شده، شکل پذیری بالای دارد و به راحتی می توان آن را بر روی تکیه گاه های چوبی ساخته شده چسباند، استفاده شده است. برای اتصال ورق فولادی به چوب نیز از چسب چوب که قابلیت چسبانندگی بالا و همچنین مقاومت در برابر حرارت بالایی دارد استفاده شده است.

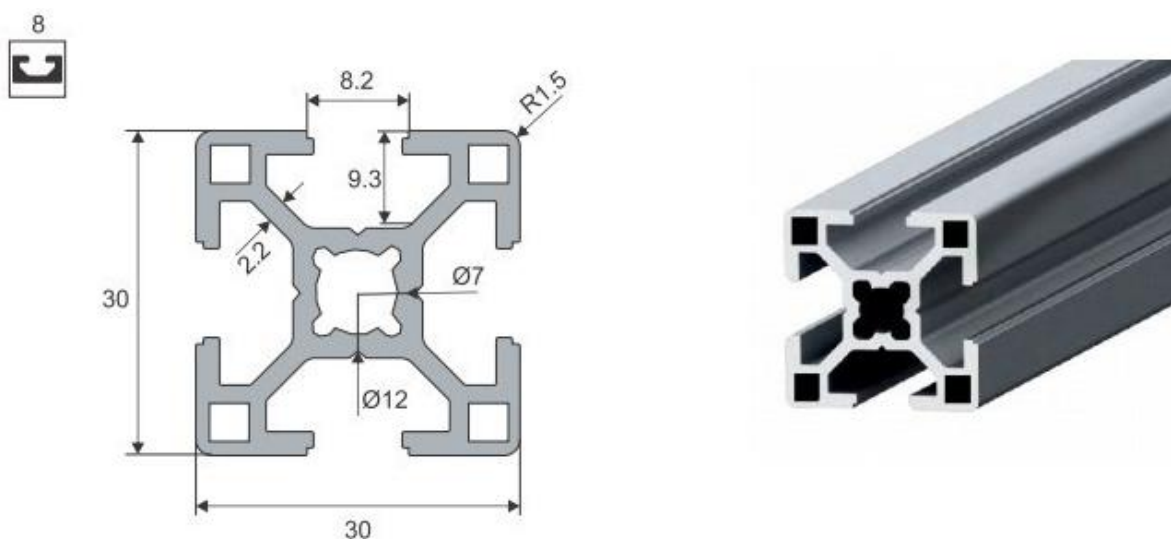
۴-۳-۳ مونتاژ دستگاه

برای کنارهم قرار دادن متمرکزکننده سهموی مرکب و پنل خورشیدی و همچنین اتصال راحت تر آن به تکیه‌گاه دو درجه آزادی از شیارهای آلومینیمی^۱ استفاده شده است و بر اساس شرایط در نظر گرفته شده سه حالت مجزا برای تست دستگاه در نظر گرفته شده است که به صورت زیر ارائه می‌شود:

حالت اول : سیستم فتوولتاییک ساده بدون متمرکزکننده و بدون خنک کاری (PV)

حالت دوم : سیستم فتوولتاییک با متمرکزکننده بدون خنک کاری (CPC-PV)

حالت سوم : سیستم فتوولتاییک با متمرکزکننده به همراه خنک کاری با آب



شکل ۴-۵ شیارهای آلومینیمی استفاده شده جهت اتصال سیستم‌ها به تکیه‌گاه دو درجه آزادی

۴-۳-۴-۱ نحوه خنک کاری پنل خورشیدی

ارزیابی عملکرد سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک - متمرکزکننده سهموی مرکب تحت خنک کاری یکی از

^۱ T-slot

اهداف این پژوهش می‌باشد. طراحی پنل‌های خورشیدی به گونه‌ای است که برای خنک‌کاری آن‌ها سیستم معینی در نظر گرفته نشده است. از آنجایی که در این مطالعه سیال عامل خنک‌کاری آب می‌باشد، اقدام به ساخت مجرای خنک‌کاری پلاستیکی به دلیل سبکی، قابلیت نصب آسان و هزینه ساخت پائین برای عبور آب با استفاده از پرینتر سه بعدی شده است. مجرای ساخته شده با استفاده از چسب میل پوکسی که علاوه بر داشتن مقاومت بالا در برابر حرارت زیاد باعث آب بندی مناسب سیستم می‌شود، به پشت پنل خورشیدی مورد نظر چسبانیده شده است. که این مراحل در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷ اتصال مجرا به پنل خورشیدی و آب بندی آن



شکل ۴-۶ مجرای طراحی شده برای گذر سیال

۴-۵ تجهیزات اندازه‌گیری

برای محاسبه هر چه دقیق‌تر راندمان سیستم، نیاز به دانستن اطلاعاتی نظیر شدت تابش خورشیدی بر روی سلول‌های خورشیدی، دمای محیط، جریان و ولتاژ خروجی از سلول‌های خورشیدی و همچنین میانگین دمای سلول‌های خورشیدی می‌باشد تا بتوان توان خروجی هر کدام از سیستم‌ها محاسبه کرد. برای این منظور از تجهیزات زیر برای اندازه‌گیری کمیت‌های مورد نیاز استفاده شده است.

پیرانومتر^۱ : برای اندازه‌گیری مقدار شدت تابش خورشیدی استفاده می‌شود. پیرانومتر بر روی تکیه‌گاه دو درجه آزادی با شیب مورد نظر قرار گرفته و به صورت لحظه‌ای مقدار شدت تابش خورشیدی را گزارش می‌کند. این پیرانومتر مدل ۱۶۱۰۳ ساخت شرکت آلمانی لامبرخت^۲ می‌باشد.

مولتی‌متر^۳ : برای اندازه‌گیری مقدار ولتاژ و جریان خروجی از پنل‌های خورشیدی از مولتی‌متر دیجیتال مدل VICTOR ۸۸C استفاده شده است که در نهایت با استفاده از این دو پارامتر می‌توان توان خروجی از پنل‌ها را برای هر حالت محاسبه کرد.

دوربین ترموگراف^۴ : برای مشاهده توزیع دمای میانگین بر روی سلول‌ها از دوربین ترموگراف که مدل آن NEC AVIO InfRec R۵۰۰ می‌باشد، استفاده شده است. با عکس برداری از سطوح پنل‌ها محدوده توزیع دمایی آن مشخص می‌شود.

سنسور دمای محیط^۵ : دمای محیط از جمله پارامترهای اثرگذار در محاسبه توان خروجی از پنل‌های خورشیدی است که می‌بایست اندازه‌گیری شود. برای این منظور از سنسور دمای محیط با دقت مناسب استفاده شده است.

شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ سیستم فتوولتاییک-متمرکزکننده سهموی مرکب را بعد از مونتاژ و قرارگیری بر روی تکیه‌گاه دو درجه آزادی نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که در بالا اشاره شد سیستم‌های مورد نظر در سه حالت پنل خورشیدی ساده، سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک -متمرکزکننده سهموی مرکب بدون خنک‌کاری و سیستم فتوولتاییک - متمرکزکننده سهموی مرکب با خنک‌کاری مورد ارزیابی قرار گرفته است.

^۱ Pyranometer

^۲ lambrecht

^۳ Multi-meter

^۴ Thermography camera

^۵ Environment temperature sensor



شکل ۴-۸ نمونه آزمایشگاهی ساخته شده سیستم فتوولتاییک-متمرکز کننده سهموی مرکب



شکل ۴-۹ نمای روبه روی دستگاه ساخته شده و نصب شده در فضای بیرون

فصل پنجم

نتیج

۵-۱ مقدمه

در این فصل به ارائه، بررسی و تحلیل نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی سیستم فتوولتاییک - متمرکزکننده سهموی مرکب در سه حالت پرداخته شده است. دستگاه‌های ساخته شده در شهرستان شاهرود با موقعیت جغرافیایی ۲۵ دقیقه و ۳۶ درجه عرضی و ۵۸ دقیقه و ۵۴ درجه طولی با ارتفاعی معادل ۱۳۸۰ متر از سطح دریا در فصل تابستان و در مرداد ماه مورد ارزیابی قرار گرفته است. مطابق با آنچه در فصل قبل گفته شده سیستم در سه حالت مورد آزمایش قرار گرفته است: ۱- سیستم فتوولتاییک ساده بدون متمرکزکننده و بدون خنک‌کاری ۲- سیستم فتوولتاییک با متمرکزکننده و بدون خنک‌کاری ۳- سیستم فتوولتاییک با متمرکزکننده و با خنک‌کاری. در حین انجام آزمایش‌ها اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه توان خروجی از پنل‌های خورشیدی نظیر ولتاژ، جریان و همچنین دمای سطح پنل‌های خورشیدی اندازه‌گیری شده است. با استفاده از دوربین ترموگرافی و عکس‌های گرفته شده از سطح پنل‌های خورشیدی میانگین دمای سطح سلول‌ها اندازه‌گیری شده است که در نهایت از این دما برای محاسبه توان تولیدی سیستم‌ها استفاده شده است. نمودارهای توان خروجی از سیستم‌ها برای هر حالت ترسیم شده است و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

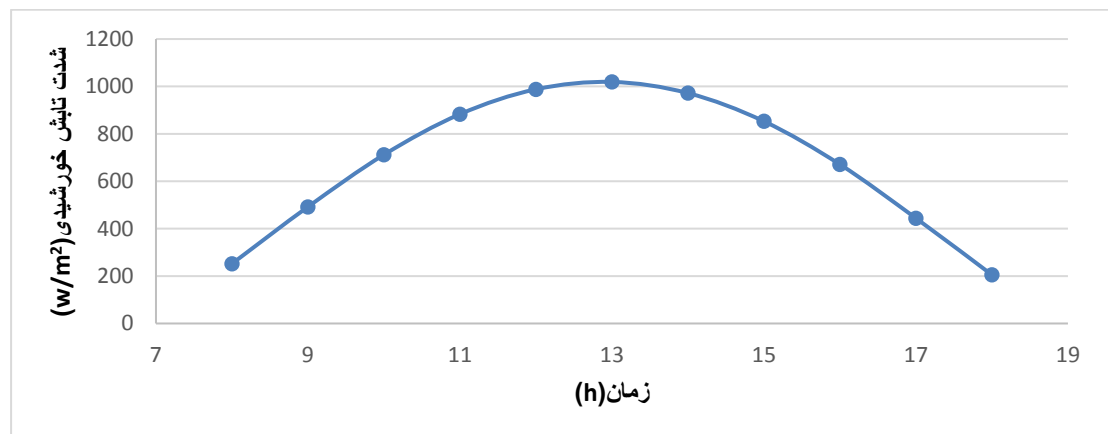
۵-۲ نحوه انجام آزمایش

پس از مونتاژ دستگاه‌ها، هر سه سیستم بر روی تکیه‌گاه دو درجه آزادی موجود در محوطه آزمایشگاه تخصصی انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود با شیب مورد نظر قرار گرفته‌اند. با توجه به محاسبات صورت گرفته، داده‌ها و اطلاعات موجود در سایر منابع مقدار زاویه بهینه برای قرارگیری کلکتورهای خورشیدی ۳۵ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شده است که تقریباً برابر با عرض جغرافیایی شهرستان شاهرود می‌باشد. در مرحله اول انجام آزمایش‌ها شیب کلکتورها را ثابت در نظر گرفته و به صورت روزانه برای چندین روز پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه توان تولیدی از پنل‌های خورشیدی استخراج و نمودارهای مرتبط با شدت تابش خورشیدی،

دمای محیط، دمای سطح سلول‌ها و توان تولیدی هرکدام از سیستم‌ها ترسیم شده است. در مرحله دوم مقدار شیب کلکتور را تغییر داده و مقدار توان خروجی پنل‌های خورشیدی را در زاویه‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ مورد بررسی قرار داده و به طور مشابه نمودارهای مربوطه ترسیم شده است.

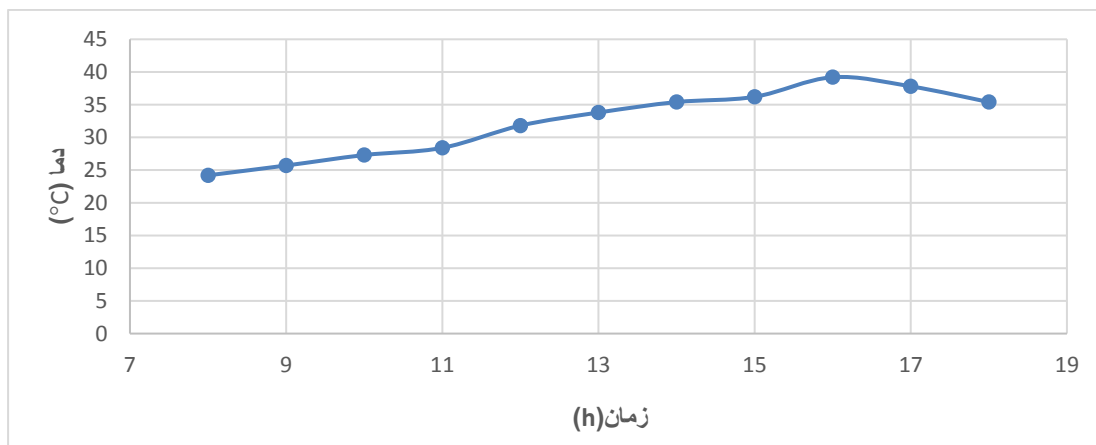
۳-۵ تحلیل نتایج در شیب ثابت

شدت تابش خورشیدی و دمای محیط دو پارامتر مهم برای محاسبه توان خروجی از پنل‌های خورشیدی می‌باشند که داده‌های آن به عنوان ورودی مدل اهمیت زیادی دارد. از این رو این داده‌ها در تمام روزهای آزمایش به ترتیب با استفاده از پیرانومتر و سنسور دمای محیط اندازه‌گیری شده است. شکل ۵-۱ نمودار تغییرات شدت تابش خورشیدی را برای شهرستان شاهرود در روز ۹ مرداد سال ۱۳۹۹ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل حداکثر میزان تابش دریافتی در این روز 1020 W/m^2 اندازه‌گیری شده است. این مقدار تابش در شرایط آسمان صاف و بدون گرد و غبار اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵-۱ توزیع شدت تابش خورشیدی در طول روز برای شهرستان شاهرود روز ۹ مرداد ۱۳۹۹

دمای محیط نیز یکی از پارامترهای اثرگذار در محاسبه راندمان پنل‌های خورشیدی می‌باشد. شکل ۵-۲ نیز تغییرات دمای محیط برای روز ۹ مرداد سال ۱۳۹۹ در شهرستان شاهرود را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود بیشینه دما در محدوده ساعت ۱۶ بعدظهر ثبت شده است.



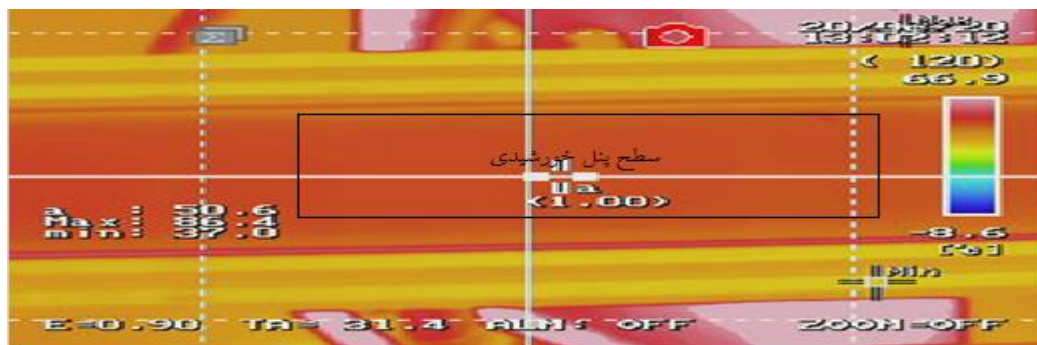
شکل ۲-۵ تغییرات دمای محیط در محل انجام آزمایش برای شهرستان شاهرود ۹ مرداد ۱۳۹۹

۵-۳-۱ بررسی تغییرات دمای سطح پنل‌های خورشیدی و ثبت دما بوسیله

دوربین ترموگرافی

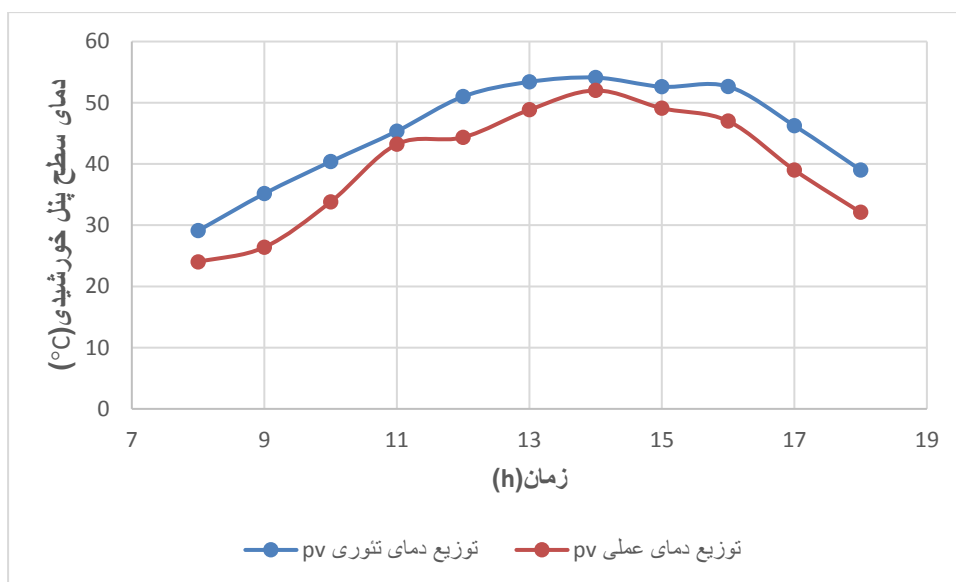
برای محاسبه مقدار توان تولیدی سلول‌های خورشیدی اندازه‌گیری دمای میانگین سطح سلول‌های خورشیدی ضروری است. برای این منظور با استفاده از دستگاه دوربین ترموگرافی از سطوح پنل‌های خورشیدی در هر سه سیستم عکس برداری شده است. با وارد کردن عکس‌های گرفته شده در نرم‌افزار مرتبط با دوربین و تعیین محدوده مورد نظر میانگین دمای سطح پنل‌های خورشیدی محاسبه شده است.

شکل ۵-۳ تصویر ترموگرافی گرفته شده از سطح پنل خورشیدی بدون متمرکزکننده را نشان می‌دهد. قسمتی از محدوده پنل خورشیدی بر روی شکل نشان داده شده است. دماهای به دست آمده از نمونه برداری ترموگرافی به عنوان دمای مورد نظر در محاسبه راندمان پنل‌های خورشیدی استفاده شده است.



شکل ۵-۳ تصویر ترموگرافی پنل خورشیدی ساده

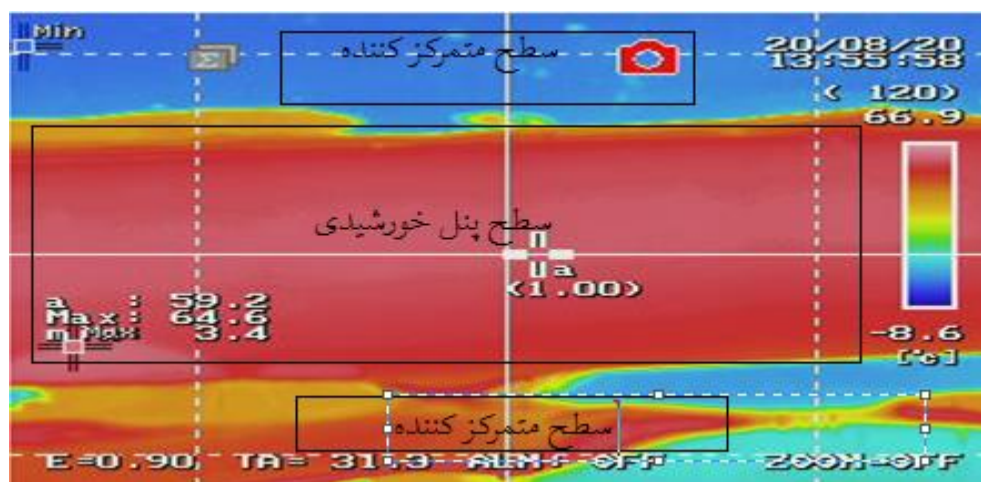
شکل ۵-۴ تغییرات دمای سطح پنل خورشیدی ساده بدون متمرکزکننده در دو حالت تئوری و عملی را نشان می‌دهد. برای محاسبه دمای تئوری سطح پنل‌های خورشیدی مدلی در نرم افزار ایجاد شده است که به کمک آن دمای تئوری تخمین زده شده است. طبق اندازه گیری‌های انجام شده حداکثر دمای سطح پنل به ۵۲ درجه در روز رسیده است. همچنین با مقایسه مقادیر عملی و تئوری میزان اختلاف دمای این دو حالت ۱۵ درصد محاسبه شده است.



شکل ۵-۴ توزیع دمای تئوری و عملی پنل خورشیدی بدون متمرکزکننده

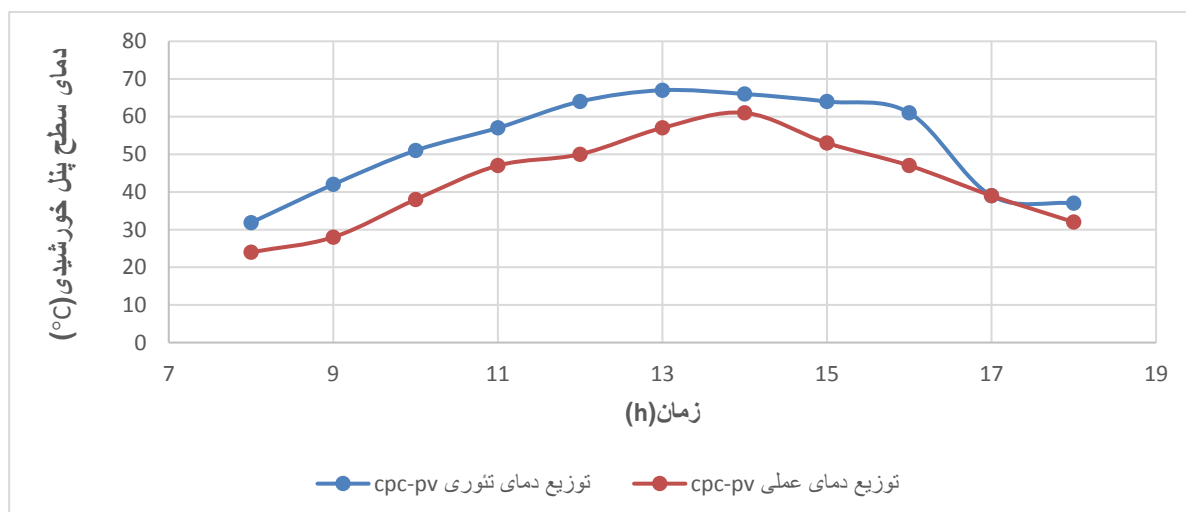
شکل ۵-۵ تصویر ترموگرافی گرفته شده از سطح پنل خورشیدی سیستم فتوولتائیک - متمرکزکننده

سهموی مرکب را نشان می‌دهد. برای درک بهتر تصویر محدوده پنل خورشیدی و همچنین محدوده متمرکزکننده سهموی مرکب بر روی تصویر نشان داده شده است.



شکل ۵-۵ تصویر ترموگرافی پنل خورشیدی با متمرکزکننده و بدون خنک‌کاری

شکل ۵-۶ توزیع دما بر روی سطح پنل خورشیدی سیستم فتوولتائیک – متمرکزکننده سهموی مرکب برای دو حالت عملی و تئوری نشان می‌دهد. با توجه به نمودار و داده‌های اندازه‌گیری شده می‌توان اثر متمرکزکننده سهموی مرکب را بر روی افزایش دمای سطح سلول خورشیدی مشاهده کرد. حداکثر دمای اندازه‌گیری شده برای سطح پنل ۶۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که در مقایسه با حداکثر دمای سطح پنل خورشیدی ساده و بدون متمرکزکننده اختلاف دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. مقایسه داده‌های عملی و تئوری برای این حالت اختلاف ۲۳ درصدی را نشان می‌دهد. یکی از دلایل عمده این خطا می‌تواند خطای ایجاد شده توسط دوربین ترموگراف در مواجهه با بازتاب‌های نور از سطح متمرکزکننده باشد.



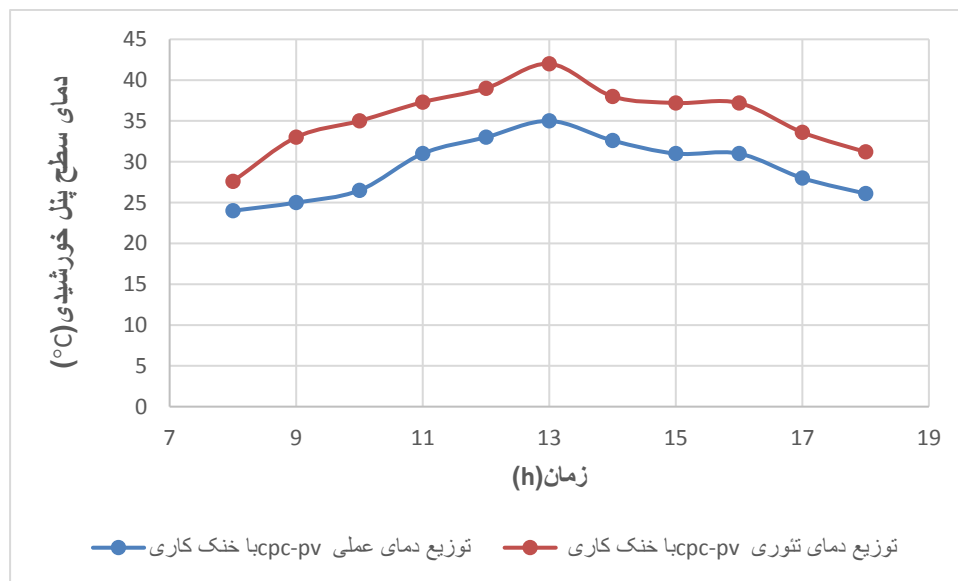
شکل ۵-۶ توزیع دمای تئوری و عملی سیستم متمرکزکننده فتوولتائیک بدون خنک کاری

شکل ۵-۷ تصویر ترموگرافی گرفته شده از سطح پنل خورشیدی که با آب در حال خنک کاری می باشد را نشان می دهد. مانند حالت های قبلی محدوده پنل خورشیدی و متمرکزکننده کننده سهموی مرکب نیز مشخص شده است. در این حالت دبی سیال عامل خنک کاری ۱ لیتر بر دقیقه می باشد.



شکل ۵-۷ تصویر ترموگرافی پنل خورشیدی با متمرکزکننده و خنک کاری

شکل ۵-۸ نمودار توزیع دما بر روی سطح پنل خورشیدی سیستم فتوولتائیک-متمرکزکننده به همراه خنک-کاری نشان می دهد. به طور مشابه با حالت های قبل با مقایسه داده های عملی و تئوری می توان درصد خطای موجود را محاسبه کرد. که در این حالت این اختلاف ۱۵ درصد محاسبه شده است.



شکل ۵-۸ توزیع دمای تئوری و عملی برای پنل خورشیدی با متمرکزکننده و خنک کاری

۵-۳-۲ محاسبه توان تولیدی برای هر حالت

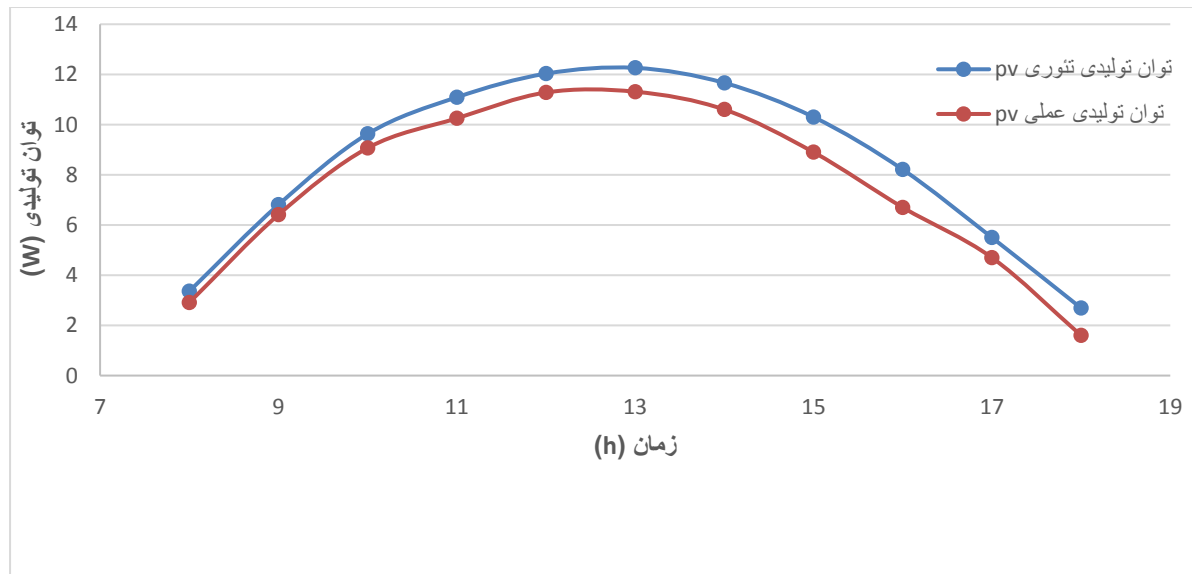
در این قسمت به محاسبه توان تولیدی عملی توسط هر کدام از سیستم‌ها به صورت مجزا پرداخته شده است. پس از محاسبه توان تولیدی این مقادیر با مقادیر بدست آمده از مدل تئوری ایجاد شده مقایسه و درصد اختلاف موجود را محاسبه شده است.

شکل ۵-۹ مقدار توان تولیدی عملی و تئوری توسط سیستم فتوولتاییک ساده بدون متمرکزکننده را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن دمای میانگین بر روی سطح سلول‌ها با استفاده از رابطه‌های (۳۷-۳) و (۳۸-۳) می‌توان مقدار توان تولیدی تئوری را برای سیستم مورد نظر محاسبه کرد و در حالت عملی نیز با اندازه‌گیری جریان و ولتاژ و محاسبه فیل فاکتور^۱ می‌توان توان تولیدی واقعی را محاسبه کرد. براساس اندازه‌گیری‌ها و داده‌های استخراج شده نمودار زیر در نرم افزار اکسل ترسیم شده است.

اندازه‌گیری‌ها برای محاسبه توان تولیدی عملی توسط پنل فتوولتاییک ساده نشان می‌دهد این سیستم

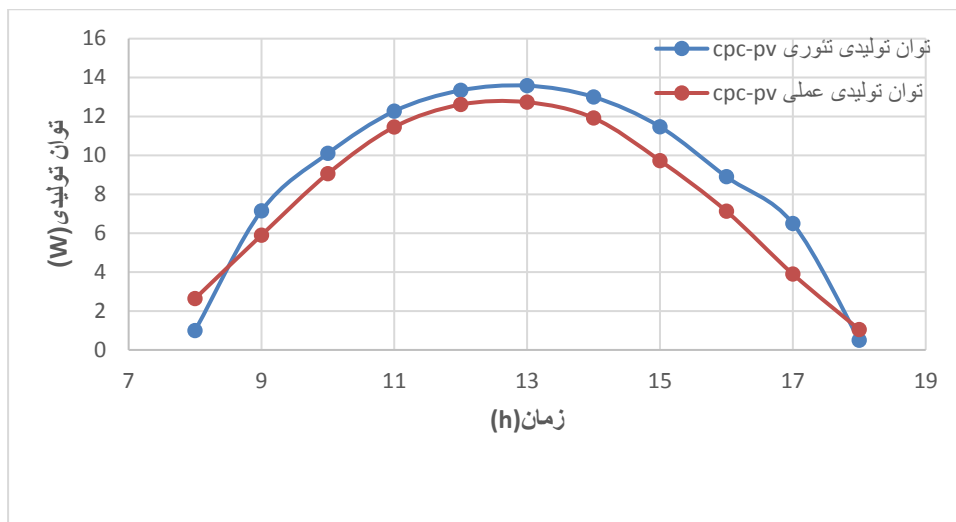
^۱ Fill factor

توانایی تولید حداکثر ۱۱/۳ وات را در طول روز دارد. در حالی که حداکثر توان تولیدی تئوری برای این سیستم ۱۲/۲۶ وات می‌باشد. با مقایسه کلی داده‌های عملی و تئوری به طور میانگین اختلاف بین آن‌ها ۱۶/۷ درصد می‌باشد.



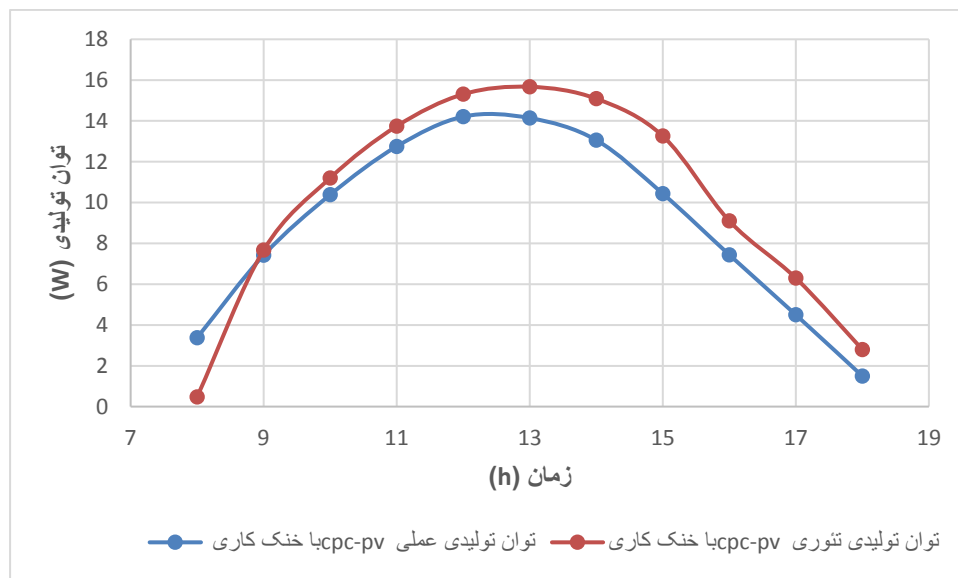
شکل ۵-۹ مقایسه توان تولیدی عملی و تئوری برای سیستم فتوولتاییک بدون متمرکزکننده

شکل ۵-۱۰ توان تولیدی عملی و تئوری برای سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب - فتوولتاییک نشان می‌دهد. همان‌طوری که قبلاً اشاره شد متمرکزکننده سهموی مرکب با افزایش شدت نور خورشید بر روی پنل خورشیدی باعث افزایش توان تولیدی می‌شود که این موضوع در نمودار ۱۰-۵ نشان داده شده است. اختلاف توان تولیدی تئوری و عملی برای این سیستم با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های تئوری ۱۳ درصد محاسبه شده است.



شکل ۵-۱۰ مقایسه توان تولیدی عملی و تئوری برای سیستم فتوولتائیک با متمرکزکننده

شکل ۵-۱۱ توان تولیدی عملی و تئوری توسط سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب - فتوولتائیک به همراه خنک کاری را نشان می دهد. وجود متمرکزکننده سهموی از طرفی و خنک کاری همزمان سیستم باعث افزایش توان تولیدی سیستم نسبت به سیستم متمرکزکننده فتوولتائیک بدون خنک کاری شده است. حداکثر توان تولیدی تئوری این سیستم ۱۵/۶۶ وات می باشد و حداکثر توان تولیدی عملی این سیستم با توجه به داده های اندازه گیری شده ۱۴/۲۱ وات می باشد. نتایج داده های برای این حالت نیز مقدار خطای اندازه گیری شده بین دو حالت عملی و تئوری ۱۳ درصد می باشد.

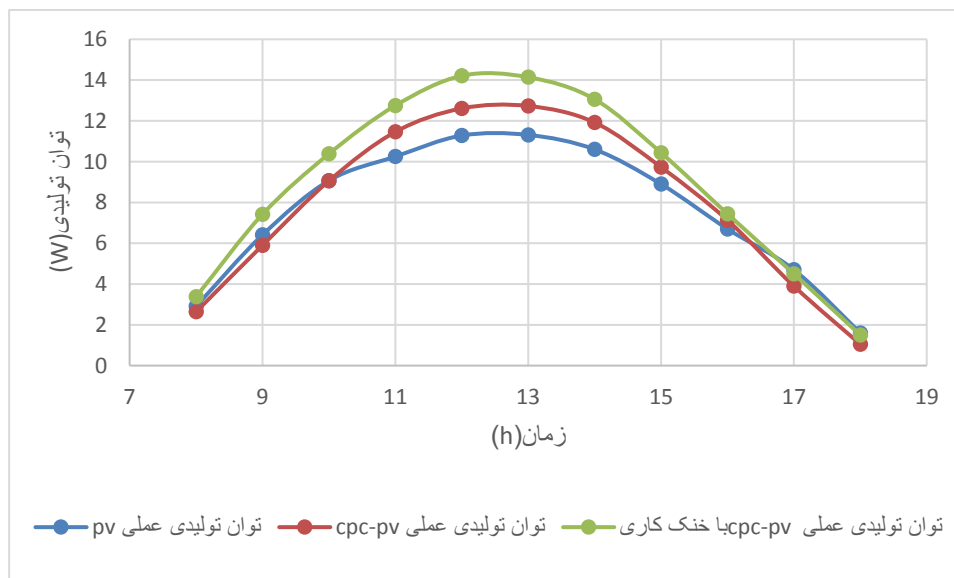


شکل ۵-۱۱ مقایسه توان تولیدی عملی و تئوری برای سیستم فتوولتاییک با متمرکزکننده و خنک کاری

۵-۳-۳ مقایسه توان تولیدی عملی و تئوری در هر سه حالت

در این قسمت به بررسی و مقایسه توان تولیدی عملی و تئوری توسط هر کدام از سیستم‌ها پرداخته و همچنین میزان تاثیر متمرکزکننده سهموی مرکب و خنک کاری را بر روی افزایش توان خروجی از پنل خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است.

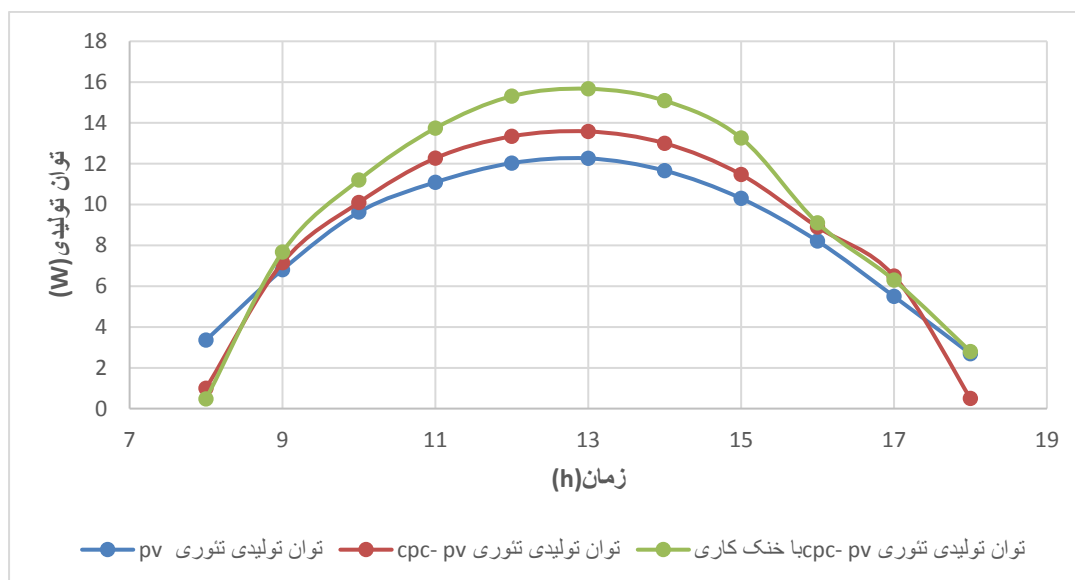
شکل ۵-۱۲ توان تولیدی عملی برای هر سه حالت را نشان می‌دهد. این آزمایش در روز ۹ مرداد سال ۱۳۹۹ انجام شده است. با توجه به داده‌های به دست آمده می‌توان دریافت که استفاده از متمرکزکننده سهموی مرکب باعث افزایش توان خروجی شده است همچنین خنک کاری فعال سیستم به طور همزمان نیز باعث افزایش بیشتر توان خروجی شده است.



شکل ۵-۱۲ مقایسه توان تولیدی عملی در سه حالت

بیشترین توان تولیدی به ترتیب برای سیستم فتوولتایک - متمرکزکننده سهموی مرکب با خنک کاری، سیستم فتوولتایک متمرکزکننده بدون خنک کاری و در نهایت سیستم فتوولتایک ساده می باشد. با توجه به داده های استخراج شده به طور متوسط سیستم فتوولتایک متمرکزکننده بدون خنک کاری به میزان ۱۱ درصد و سیستم فتوولتایک متمرکزکننده با خنک کاری به طور متوسط ۲۱ درصد نسبت سیستم فتوولتایک ساده توان خروجی شان بیشتر بوده است.

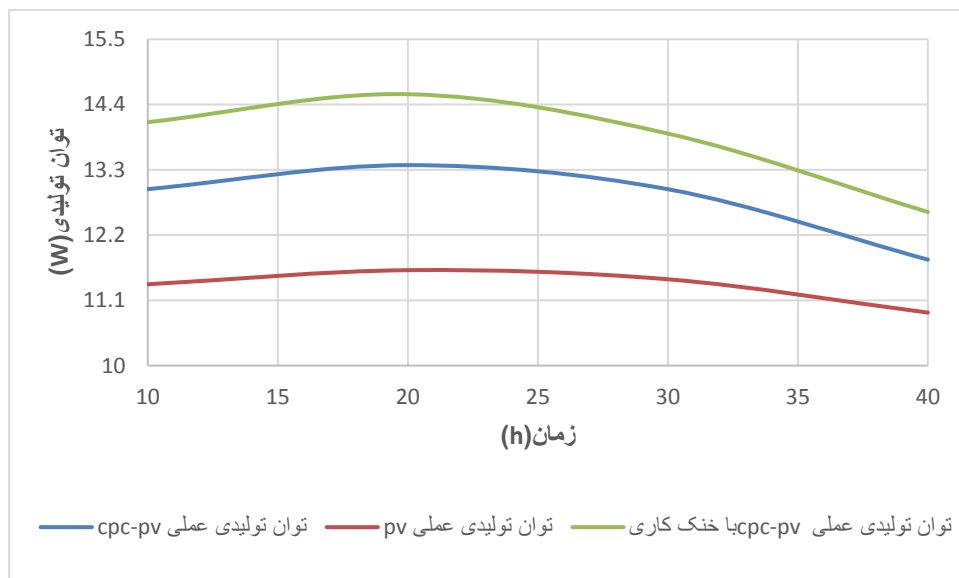
شکل ۵-۱۳ توان تولیدی تئوری برای سه حالت را نشان می دهد. در این حالت نیز سیستم متمرکزکننده - فتوولتایک با خنک کاری بیشترین توان خروجی را تولید می کند و بعد از آن سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب فتوولتایک بدون خنک کاری و در نهایت پنل خورشیدی ساده بیشترین توان را تولید می کنند. در حالت تئوری سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب - فتوولتایک با خنک کاری و سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب فتوولتایک بدون خنک کاری به ترتیب به میزان ۲۶ و ۱۴ درصد نسبت به پنل ساده فتوولتایک توان خروجی بیشتری تولید کرده اند.



شکل ۵-۱۳ مقایسه توان تولیدی تئوری در سه حالت

۵-۴ نتیجه آزمایش در شیب‌های متفاوت

شکل ۵-۱۴ توان تولیدی خروجی از سیستم‌ها را در شیب‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درجه نشان می‌دهد. این آزمایش در فصل تابستان و در روز ۱۳ مرداد سال ۱۳۹۹ انجام شده است. از آنجایی که تغییرات شدت تابش خورشیدی در بازه زمانی ۱۲ تا ۱۴ ظهر اندک است، این زمان برای انجام این آزمایش انتخاب شده است. با توجه به داده‌های استخراج شده و محاسبات صورت گرفته نمودار تغییرات توان سیستم‌ها بر حسب تغییرات شیب ترسیم شده است. با توجه به نمودار می‌توان نتیجه گرفت هر سه سیستم در زاویه شیب ۲۰ درجه نسبت به افق حداکثر توان را تولید می‌کنند. این مقادیر برای سیستم متمرکزکننده فتوولتایک ۱۳/۳۷، برای سیستم متمرکزکننده سهموی مرکب فتوولتایک با خنک کاری ۱۴/۵۷ و برای پنل ساده خورشیدی ۱۱/۶۰ وات می‌باشد.



شکل ۵-۱۴ تغییرات توان خروجی از سیستم‌ها در شیب‌های متفاوت

با مقایسه مقادیر توان تولیدی در زاویه‌های ۳۵ و ۲۰ درجه می‌توان دریافت توان تولیدی خروجی از سیستم فتوولتاییک-متمرکزکننده در شیب ۲۰ درجه نسبت به افق به میزان ۶ درصد نسبت به قرارگرفتن سیستم در شیب ۳۵ در فصل تابستان افزایش پیدا می‌کند. این مقدار برای پنل خورشیدی ساده ۳ درصد می‌باشد.

فصل ششم

نتیجہ گیری و پیشہادات

۶-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پیدا کردن راه‌کارهایی برای افزایش توان و کاهش هزینه‌های سیستم‌های فتوولتاییک همواره مورد توجه بوده است. در این پژوهش اثر بکارگیری انعکاس‌دهنده سهموی مرکب در سیستم‌های فتوولتاییک به صورت عملی مورد ارزیابی قرار گرفته است. متمرکزکننده سهموی مرکب دستگاهی است که با افزایش شدت نور بر روی سلول‌های خورشیدی باعث افزایش توان خروجی از مقدار معینی از سلول‌های خورشیدی می‌شود. دهانه این متمرکزکننده‌ها به گونه‌ای طراحی می‌شود که نیاز به سیستم ردیاب خورشیدی گران قیمت ندارند. افزون بر این در این سیستم‌ها قابلیت تولید توان الکتریکی و حرارتی به صورت هم‌زمان وجود دارد. ویژگی‌های فراوان این سیستم‌ها در سال‌های اخیر باعث رشد قابل توجه مطالعات در این زمینه شده است. ویژگی‌هایی نظیر بهره‌گیری از هر دو نوع تابش پخشیده و مستقیم در تولید توان، کاهش مقدار فضای مورد نیاز برای تولید مقدار معینی توان، تولید انرژی بیشتر در اندازه استاندارد (یک متر مربع) در مقایسه با سیستم‌های فتوولتاییک ساده و توانایی تولید انرژی با ظرفیت کامل از صبح تا غروب به وسیله حداقل نیاز به سیستم ردیاب خورشیدی همه باعث شده‌اند تا توجه خاصی در تحقیقات اخیر به این سیستم‌ها شود.

در این پژوهش طراحی، ساخت و ارزیابی عملکرد سیستم فتوولتاییک مجهز به متمرکزکننده سهموی مرکب و مقایسه آن با حالت بدون متمرکزکننده صورت پذیرفت. سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده سهموی مرکب شامل دو جزء اصلی یک سیستم فتوولتاییک ساده و جزء دوم یک متمرکزکننده سهموی مرکب می‌باشد. یکی از اهداف این پژوهش تعیین ابعاد بهینه هندسی متمرکزکننده سهموی مرکب بر اساس دریافت تابش حداکثری خورشید در طول یک سال می‌باشد. برای دستیابی به این هدف روابط مرتبط با تابش خورشیدی و معادلات حاکم بر هندسه متمرکزکننده سهموی مرکب با یکدیگر ترکیب گردید و بر اساس آن‌ها مدلی برای دریافت تابش حداکثری سالیانه توسط متمرکزکننده سهموی مرکب در نرم افزار متلب ارائه شد. با استفاده از این مدل مقادیر بهینه نصف زاویه پذیرش و شیب قرارگیری کلکتور که دو پارامتر اساسی برای دریافت تابش حداکثری می‌باشند به ترتیب ۲۵ و ۳۵ درجه محاسبه شد. بر اساس مقدار بهینه زاویه پذیرش

سایر ابعاد هندسی نظیر دهانه متمرکزکننده و همچنین ارتفاع متمرکزکننده سهموی مرکب استاندارد کامل محاسبه شد. برش ۷۵ درصدی ارتفاع متمرکزکننده سهموی مرکب باعث از دست رفتن ۲۰ درصد از مقدار انرژی دریافتی سالیانه می‌شود اما از طرفی باعث کاهش ۷۵ درصدی سطح مورد نیاز و به تبع آن باعث کاهش هزینه‌های مربوط به ساخت این دستگاه می‌شود.

سیستم فتوولتاییک متمرکزکننده سهموی مرکب ساخته شده در شهرستان شاهرود در سه حالت مورد ارزیابی قرار گرفت و توان تولیدی آنها مورد بحث و بررسی قرار گرفت. متمرکزکننده سهموی مرکب با افزایش شدت تابش خورشیدی بر روی سلول‌های خورشیدی باعث افزایش میزان توان خروجی از سطح معینی از پنل خورشیدی می‌شود. بر اساس تحلیل دمایی صورت گرفته در این مطالعه استفاده از متمرکزکننده سهموی مرکب باعث افزایش دمای سطح سلول خورشیدی حداکثر به میزان ۱۰ درجه نسبت به پنل خورشیدی ساده در شرایط عملکرد یکسان می‌گردد. طبق اندازه گیری های صورت گرفته بیشینه دمای میانگین سطح پنل خورشیدی بدون متمرکزکننده ۵۲ درجه سانتیگراد و دمای سطح پنل خورشیدی با متمرکزکننده سهموی مرکب ۶۲ درجه سانتیگراد می‌باشد. از آنجایی که راندمان سلول‌های خورشیدی تابعی از توزیع دمای سطح آنها می‌باشد در نتیجه متمرکزکننده با افزایش دمای بیشتر سطح سلول باعث افت بیشتر راندمان سیستم می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد متمرکزکننده سهموی مرکب در ترکیب با سلول‌های خورشیدی موجب افزایش توان خروجی به میزان ۱۱ درصد نسبت به پنل فتوولتاییک ساده در همان ابعاد می‌شود. افزون بر این سرمایش فعال پنل خورشیدی توسط آب به ترتیب نشان از افزایش ۲۱ درصدی و ۱۰ درصدی توان خروجی نسبت به سیستم فتوولتاییک ساده و سیستم متمرکزکننده فتوولتاییک بدون خنک‌کاری دارد. همچنین نتایج آزمایش سیستم‌ها در شیب‌های متفاوت نشان می‌دهد بهترین شیب قرارگیری سیستم در فصل تابستان با شیب بهینه سالیانه آن متفاوت است. بر اساس نتایج حاصل از آزمایش سیستم‌ها برای چهار شیب متفاوت ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درجه بیشترین راندمان تولیدی سیستم در روز ۱۳ مرداد سال ۱۳۹۹ در شیب ۲۰ درجه حاصل می‌شود.

۶-۲ پیشنهادات

فراوانی انرژی خورشیدی و قابلیت تبدیل مستقیم آن به انرژی الکتریکی توسط سلول‌های خورشیدی فرصت بسیار مناسبی برای بهره‌مندی از انرژی‌های پاک را پیش‌رو گذاشته است. به طور قطع استفاده از متمرکزکننده‌هایی نظیر سهموی مرکب فرصت تولید هرچه ارزان‌تر انرژی پاک را برای ما فراهم می‌آورد. خوشبختانه تنوع تغییر شرایط بهره‌برداری در این سیستم‌ها زیاد است به طوری که می‌توان با تغییر پارامترهای گوناگون و شرایط بهره‌برداری عملکرد آن را مورد ارزیابی قرار دارد. بر اساس تحقیقات پیشین و پژوهش صورت گرفته می‌توان موارد زیر را به عنوان پیشنهادات مناسبی در مطالعات آینده مورد نظر و بررسی قرار داد:

- ۱- ارزیابی عملی نوری متمرکزکننده سهموی مرکب در آزمایشگاه
- ۲- خنک کاری سیستم با سیال‌های عامل متفاوت نظیر نانو سیال‌ها
- ۳- طراحی، ساخت و ارزیابی عملی راندمان تولید حرارت توسط سیستم منعکس کننده سهموی مرکب- فتوولتاییک
- ۴- بررسی راندمان تولید توان الکتریکی توسط سیستم فتوولتاییک-متمرکزکننده سهموی مرکب با استفاده از سلول‌های خورشیدی از جنس‌های متفاوت

مراجع

[۱] گروه مولفین سازمان انرژی های نو ایران (سانا)، از انرژی های نو چه می دانید؟ گزارش (۵ تا ۱) صفحات ۱-۵ و ۹-۱۵ و ۱۸-۲۰ و ۲۶-۲۷ و ۳۱-۳۲.

[۲] <https://www.forbes.com>

[۳] Duffie, J.A. and W.A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes. ۳rd ed. ۲۰۰۶, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc. ۹۰۸.

[۴] Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook ۲۰۱۴. Total Energy consumption, ۲۰۱۴.

[۵] <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/solar-photovoltaic-power-potential-by-country>.

[۶] <https://globalsolaratlas.info/map>

[۷] صفایی، ب.، و خلجی اسدی، م.، و تقی زاده، ح.، و جیلاوی، ا.، و طالقانی، گ.، و دانش، م. (۱۳۸۴). برآورد پتانسیل تابش خورشیدی در ایران و تهیه اطلس تابشی آن. مجله علوم و فنون هسته ای، (۱) (مسلسل ۳۳)، ۲۷-۳۴.

[۸] Mekhilef, S. and S. Rahman, A review on solar energy use in industries. Renewable and Sustainable Energy Reviews, May ۲۰۱۱. ۱۵(۴): p. ۱۷۷۷-۱۷۹۰.

[۹] Miles R.W, Hynes K.M, and F. I., Photovoltaic solar cells: An overview of the-state of the art cell development and environmental issues. Progress in crystal growth and characterization of materials, ۲۰۰۵. ۵۱: p. ۱-۴۲.

[۱۰] Mankins, J., The case for Space Solar Power Kindle Edition. January ۵, ۲۰۱۴: Virginia Edition Publishing: First Edition ۷۰۹.

[۱۱] Society, N.S., Space Solar Power: Limitless clean energy from space. National Space Society, October ۲۰۰۷.

[۱۲] Green, M.A., et al., Solar cell efficiency tables (Version ۴۸). Progress in Photovoltaics, ۲۰۱۶. ۲۴(۷): p. ۹۰۵-۹۱۳.

[۱۳] Bony, L., et al., Achieving Low-Cost Solar PV: Industry Workshop Recommendations for

Near-Term Balance of System Cost Reduction. September, 2010, Rocky Mountain Institute. p. 1-43.

[14] Philipps, S., Solar cells efficiency tables version 1-47: Progress in Photovoltaics - Research applications. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) and National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2016. 1993-2015.

[15] Hermann, A.M., Polycrystalline thin film solar cells -a review. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1998. 55: p. 75-81.

[16] Green, M.A., et al., Solar cell efficiency table (Version 45). Progress in Photovoltaics, January 2015. 23(1): p. 1-9.

[17] Coutts T.J, Yamaguchi M, and Meakin J.D, Current Topics in Photovoltaic. Academic Press, 1989. 3, London: p. 79-234.

[18] Ward J.S, et al., Proceeding 22nd IEEE PV specialist conference. 1991: p. 365.

[19] Pentsch, J., Current efficiencies of selected commercial PV modules. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) and National Renewable Energy Laboratory (NREL), November 2015. Company product data sheets.

[20] Bisquert, Juan; "Dye-sensitized solar cells", Departament de Física, Universitat Jaume

[21] Bisquert, J.; Cahen, D.; Hodes, G.; Rühle, S.; Zaban, A.; "Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells ", Journal of Physical Chemistry B, Vol. 108, p.p. 8106-8118, 2004.

[22] Stathatos, E.; "Dye Sensitized Solar Cells as an Alternative Approach to the Conventional Photovoltaic Technology Based on Silicon - Recent Developments in the Field and Large Scale Applications, Solar Cells -Dye-Sensitized Devices, Prof. Leonid A. Kosyachenko (Ed.), 2011, ISBN: 978-963-207-735-2, In Tech.

[23] NREL, "Best Research-Cell Efficiencies", US Department of Energy, Apr. 2013.

[24]] McGehee D.G.; Topinka M.A.; "Solar cells: Pictures from the blended zone". Nature Materials, Vol. 5, No. 9, p.p. 675-676, 2006. doi:10.1038/nmat1723.

[٢٥] Nelson J.; "Organic photovoltaic films", Current Opinion in Solid State and Materials Science, Vol. ٦, p.p. ٨٧.

[٢٦] Halls J.J.M.; Friend R.H.; (ed.: Archer M.D.; Hill R.D.); "Clean electricity from photovoltaic", London Imperial college .

[٢٧] Tandem solar cells", available in: <http://www.superstrate.net/pv/limit/tandem.html>.

[٢٨] Scharber MC; Sariciftci NS.; "Efficiency of bulk-heterojunction Organic Solar Cells", Journal of Progress in Polymer Sciences, ٢٠١٣; available in:

<http://dx.doi.org/١٠.١٠١٦/j.progpolymsci.٢٠١٣.٠٥.٠٠١>

[٢٩] Yastrebova N. V.; "High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential ", Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, April ٢٠٠٧.

[٣٠] S. Kurtz.; "Opportunities and Challenges for Development of a Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry". www.nrel.gov. p. ٥ (PDF: p. ٨). Retrieved ٢٠١٢-٠٢-٠٨.

[٣١] Julio Chaves; "Introduction to Nonimaging Optics", CRC Press, ٢٠٠٨ ISBN ٩٧٨-١٤٢٠٠٥٤٢٩٣.

[٣٢] <https://www.evwind.es/٢٠٢٠/٠٢/٠٢/concentrated-solar-power-had-a-global-total-installed-capacity-of-٦٤٥١-mw-in-٢٠١٩/٧٣٣٦>.

[٣٣] Wiston, R., Principles of solar concentrators of a novel design solar Energy, ١٩٧٤. ١٦: p. ٨٩-٩٥.

[٣٤] Mallick TK, Eames PC. Design and fabrication of low concentrating second generation PRIDE concentrator. Sol Energy Mater Sol Cells ٢٠٠٧;٩١ (٧):٥٩٧-٦٠٨

[٣٥] Zanesco I, Lorenzo E. Optimisation of an asymmetric static concentrator: the PEC-٢٤D. Prog Photovoltaics Res Appl ٢٠٠٢;١٠(٥):٣٦١-٧٦.

[٣٦] Nilsson J, Hkansson H, Karlsson B. Electrical and thermal characterization of a PV-CPC hybrid. Sol Energy ٢٠٠٧;٨١(٧):٩١٧-٢٨.

[37] Winston, R., Principles of solar concentrators of a novel design solar Energy, 1974. 16: p. 89-95.

[38] welford, w.t. & winston, R.. (1989). chapter 9. Shape Tolerances and Manufacturing Methods for Nonimaging Optical Components. 10.1016/B978-0-12-742885-7.50012-7.

[39] Ari Rabl, Optical and thermal properties of compound parabolic concentrators, Solar Energy, Volume 18, Issue 6, 1976.

[40] Tang R, Wu M, Yu Y, Li M. Optical performance of fixed east–west aligned CPCs used in China. Renewable Energy 2010;35(8):1837–41.

[41] Garg HP, Adhikari RS. Optical design calculations for CPC's. Energy 1998;23 (10):907–9.

[42] Hatwaambo S, Hakansson H, Nilsson J, Karlsson B. Angular characterization of low concentrating PV–CPC using low-cost reflectors. Sol Energy Mater Sol Cells 2008;92(11):1347–51.

[43] Hatwaambo S, Hakansson H, Nilsson J, Karlsson B. Angular characterization of low concentrating PV–CPC using low-cost reflectors. Sol Energy Mater Sol Cells.

[44] Nilsson J, Hkansson H, Karlsson B. Electrical and thermal characterization of a PV–CPC hybrid. Sol Energy 2007;81(7):917–28.

[45] Xu C, Chen Z, Li M, Zhang P, Ji X, Luo X, et al. Research on the compensation of the end loss effect for parabolic trough solar collectors. Appl Energy 115,128-133(2014).

[46] Bellos, E., et al. "Design, simulation and optimization of a compound parabolic collector." Sustainable Energy Technologies and Assessments 16 (2016): 53-63.

- [٤٧] Bahaidarah, H.M., et al., Experimental and numerical study on non-concentrating and symmetric unglazed compound parabolic photovoltaic concentration systems. *Applied Energy*, ٣١st Dec ٢٠١٤. ١٣٤: p. ٥٢٧-٥٣٤.
- [٤٨] Bahaidarah, H.M., et al., A comparative study on the effect of glazing and cooling for compound parabolic concentrator PV systems – Experimental and analytical investigations, *energy conversion and management* ٢٧st march ٢٠١٤. ١٣٤: p. ٥٢٧-٥٣٤.
- [٤٩] M. Proell, H. Karrer, C. J. Brabec, and A. Hauer, “ScienceDirect The influence of CPC reflectors on the electrical incidence angle modifier of c-Si cells in a PVT hybrid collector,” *Sol. ENERGY*, vol. ١٢٤, pp ٢٢٠–٢٣٠, ٢٠١٤.
- [٥٠] M. Proell, P. Osgyan, H. Karrer, and C. J. Brabec, “Experimental efficiency of a low concentrating CPC PVT flat plate collector,” *Sol. Energy*, vol. ١٤٧, pp. ٤٤٣–٤٤٩, ٢٠١٧.
- [٥١] A. Hameed, K. Sopian, and T. Sumer, “Results in Physics Study of the electrical and thermal performances of photovoltaic thermal collector-compound parabolic concentrated,” *Results Phys.*, vol. ٩, pp. ٥٠٠–٥١٠, ٢٠١٨.
- [٥٢] M. Brogren and P. E. R. Nostell, “OPTICAL EFFICIENCY OF A PV – THERMAL HYBRID CPC MODULE FOR,” vol. ٤٩, no. ١٩٨٨, pp. ١٧٣–١٨٥, ٢٠٠١.
- [٥٣] Hjothman, M., et al., Performance analysis of a double pass photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector with CPC and fins. *Renewable Energy*, ٢٠٠٥. ٣٠: p. ٢٠٠٥–١٧.
- [٥٤] Kong C, Xu Z, Yao Q. Outdoor performance of a low-concentrated photovoltaic thermal hybrid system with crystalline silicon solar cells. *Appl Energy* ٢٠١٣;١١٢(١٢):٤١٨–٢٥.
- [٥٥] Li J, Pei G, Li Y, Ji J. Design and performance analysis of low temperature solar thermal electric generation integrated PV cells. In: ٢٠١٠ Asia-Pacific power and energy engineering conference.
- [٥٦] Al-Alili A, Hwang Y, Radermacher R, Kubo I. A high efficiency solar air conditioner using concentrating photovoltaic/thermal collectors. *Appl Energy* ٢٠١٢;٩٣:١٣٨–٤٧.
- [٥٧] Guiqiang L, Gang P, Su Y, Xi Z, Jie J. Preface. *Energy Proc* ٢٠١٢;١٤:١.

[٥٨] Amrizal N, Chemisana D, Rosell JI. Hybrid photovoltaic–thermal solar collectors dynamic modeling. Appl Energy ٢٠١٣;١٠١:٧٩٧–٨٠٧.

[٥٩] M.F.I. Al Imam, R.A. Beg, M.S. Rahman, M.Z.H. Khan, Performance of PVT solar collector with compound parabolic concentrator and phase change materials, Energy and Buildings, Volume ١١٣, ٢٠١٦, Pages ١٣٩-١٤٤,

[٦٠] Kalogirou, S., Solae Energy Engineering:Process and Systems. Elsevier Academic Press, ٢٠٠٩.

,

Abstract

Due to the increasing development of photovoltaic systems in the supply of electricity in different countries, numerous applied researchs have been done to increase the production and efficiency of these systems. In this research, a photovoltaic system integrated with a compound parabolic reflector is designed, constructed and evaluated. in design of Compound parabolic concentrators several parameters such as acceptance angle, collector slope and height truncation percentage have different effects on the amount of production and the required reflector area (which is directly related to the design cost).

Therefore, first, with the means of the solar radiation governing relationships and the compound parabolic concentrator geometry governing equations, the relevant mathematical model was created in MATLAB software to evaluate and optimize the important geometric parameters related to the construction of the device. Optimization was performed with the objective function of maximizing the amount of electricity generation per unit of reflective surface, and based on this, the optimal acceptance angle of 20° degrees, the optimal slope relative to the horizon for the whole system was 20° degrees and the truncation percentage was 70% . The system was evaluated in summer and in Shahrud city. To compare different modes, this evaluation was performed for three modes of simple photovoltaic panel (without concentrator), panel with concentrator without cooling and panel with concentrator and cooling with water simultaneously. The results showed that the use of compound parabolic reflectors with a concentration ratio of 1.7 in both modes with and without cooling, increased the output power by 11% and 21% , respectively, compared to the photovoltaic panel. The quality

of construction and installation of reflectors from the point of view of light efficiency and increasing panel temperature have been two important factors in achieving these results.

.

Keywords: compound parabolic concentrator, photovoltaic systems, sustainable, development, energy,output power



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronic Engineering

M.Sc. Thesis in energy systems and environment

Design, construction and evaluation of photovoltaics system integrated with compound parabolic concentrator (cpc- pv)

By: Alireza Kharaghani

Supervisor:
Dr Ali Abbas Nejad
Dr Mohammad Zamen

Spring

۲۰۲۱

۸۸

