





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

بهینه‌سازی و مدل‌سازی کلکتور فتوولتاییک حرارتی (PV/T) آب‌خنک مارییچ و
اعتبارسنجی با داده‌های آزمایشگاهی

نگارنده: سمانه کیانی‌فرد

اساتید راهنما

دکتر علی عباس‌نژاد

دکتر محمد ضامن

بهمن ۱۳۹۷

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خدای رابی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیحت ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیایم و از

ریشه آنها شاخ و برگ بگیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم.

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگار

مایه هستی ام بوده اند وستم را گرفتند و راه رفتن را داد این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

شکر شایان نثار ایزدمنان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم . از
استادان فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر علی عباس نژاد و دکتر محمد ضامن به عنوان استادان راهنما که
همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند ، کمال تشکر را دارم چرا که بدون راهنماییهای ایشان تا این
این پایان نامه بسیار مشکل مینمود.

تعمدنامه

اینجانب سمانه کیانی فرد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد (دکتری) رشته مهندسی سیستم‌های انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بهینه‌سازی و مدل‌سازی کلکتور فتوولتاییک حرارتی (PV/T) آب‌خنک مارپیچ و اعتبارسنجی با داده‌های آزمایشگاهی تحت راهنمایی 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.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها 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

استفاده از پنل های فتوولتائیک جهت تولید برق در دنیا به سرعت در حال گسترش است و یکی از منابع مهم تجدیدپذیر جهت تامین انرژی دنیا در آینده محسوب می گردد. بازده سلولهای فتوولتائیک تجاری در دنیا معمولاً زیر ۲۰٪ است و لذا محققان همواره به دنبال روش‌هایی جهت افزایش این بازده هستند. از آنجا که بازده سلول های فتوولتائیک با افزایش دمای آنها کاهش می‌یابد، یکی از این روش‌ها خنک کاری سلول‌ها است. چنانچه بتوان از حرارت جذب شده نیز استفاده نمود پنل‌ها را فتوولتائیک حرارتی یا PV/T ^۱ می‌نامند. این خنک کاری می‌تواند توسط آب، هوا یا سیال‌های دیگر صورت بگیرد که استفاده از آب و هوا متداول‌ترین گزینه‌ها می‌باشد. در این پژوهش مدل‌سازی یک نوع پنل فتوولتائیک حرارتی (PV/T) آب‌خنک انجام شده است. آرایش سیستم انتخابی مبتنی بر کلکتور ورق-لوله^۲ ماریچ^۳ است که به جای استفاده از یک لوله متصل شده به ورق پشت پنل، خنک کاری از طریق یک نیم لوله انجام شده است. از سوی دیگر سلول‌ها به جای قرار گرفتن بر روی بستر پلیمری (تدلار^۴) روی یک بستر فلزی قرار گرفته‌اند. با استفاده از این روش‌ها تعداد مقاومت های حرارتی کاهش یافته و به حداقل رسیده است. مدل‌سازی این سیستم در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده و مدل ارائه شده با داده‌های تجربی به دست آمده از نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود اعتبارسنجی شده است. سپس تحلیل پارامتری مدل انجام شده و برای رسیدن به طراحی مناسب‌تر، بهینه سازی چندهدفه با توجه به بازده حرارتی و الکتریکی و میزان افت فشار صورت گرفته است. نتایج کلی نشان می‌دهد بازده پنل‌ها با این روش خنک کاری از حدود ۱۰ درصد به ۱۲ درصد

^۱ Photovoltaic Thermal(PVT)

^۲ Sheet and Tube design

^۳ Serpentine

^۴ Tedlar

افزایش یافته است. از سوی دیگر بر اساس حرارت جذب شده بازده کلی پنل (مجموع حرارتی و الکتریکی) در ساعات اوج تابش تا بیش از ۸۰ درصد قابل دستیابی است.

کلمات کلیدی : پنل فتوولتاییک حرارتی آب‌خنک، ساختار ورق-لوله مارپیچ، مدل‌سازی، بازده الکتریکی و حرارتی، بهینه‌سازی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- سمانه کیانی فرد، محمد ضامن، علی عباس نژاد، "مدلسازی کلکتور جدید فتوولتائیک حرارتی (PV/T) آب خنک با استفاده از نیم لوله ماریچ"، شانزدهمین کنگره ملی شیمی ایران، تهران، دانشگاه امیرکبیر، بهمن ۱۳۹۷

۲- سمانه کیانی فرد، محمد ضامن، علی عباس نژاد، "بررسی آزمایشگاهی پنل فتوولتائیک حرارتی (PV/T) آب خنک با آرایش ماریچ و مقطع جریان نیم لوله"، نهمین همایش سراری محیط زیست انرژی و منابع طبیعی پایدار، تهران، بهمن ۱۳۹۷

فهرست مطالب

فهرست جداول	ز
فهرست اشکال	س
فهرست علائم	ص
فصل ۱: آشنایی با مفاهیم اولیه	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ سیستم‌های فتوولتاییک	۳
۱-۲-۱ نسل اول فناوری فتوولتاییک: سلول‌های کریستالی	۴
۲-۲-۱ نسل دوم فناوری فتوولتاییک: سلول‌های خورشیدی لایه نازک	۵
۳-۲-۱ نسل سوم فناوری‌های فتوولتاییک: فناوری‌های نوظهور	۵
۳-۱ سیستم‌های فتوولتاییک در جهان	۶
۴-۱ انرژی خورشیدی در ایران	۸
۵-۱ سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی	۹
۱-۵-۱ دسته بندی با توجه به نحوه بکارگیری حرارت	۹
۲-۵-۱ تقسیم بندی از نظر نوع اتصال به شبکه:	۱۰
۳-۵-۱ دسته بندی با توجه به سیال عامل	۱۰
۴-۵-۱ دسته بندی با توجه به ساختار	۱۵
فصل ۲: بررسی سوابق موضوع	۱۹
۱-۲ مقدمه:	۲۰
۲-۲ پیشینه تحقیق:	۲۱
۳-۲ معرفی کار حاضر	۲۷
۴-۲ نوآوری:	۲۷
فصل ۳: معرفی و مدل سازی سیستم	۲۹
۱-۳ مقدمه	۳۰
۲-۳ تشریح سیستم	۳۰
۱-۲-۳ سیستم PV/T متداول:	۳۰
۲-۲-۳ سیستم PV/T با طراحی جدید:	۳۰
۳-۲-۳ معرفی سیستم آزمایشگاهی:	۳۱
۳-۳ معادلات حاکم بر سیستم PV/T:	۳۳
۱-۳-۳ معادلات حاکم بر سیستم PV/T متداول:	۳۴
۲-۳-۳ معادلات حاکم بر سیستم PV/T طرح جدید:	۴۱
۴-۳ روش حل و تحلیل نتایج	۴۲

فصل ۴ : نتایج.....	۴۵
۱-۴ مقدمه:.....	۴۶
۲-۴ بررسی تجربی اثر خنک کاری.....	۴۶
۳-۴ مقایسه مدل نیم لوله جدید با مدل متداول با لوله کامل.....	۴۹
۴-۴ اعتبارسنجی مدل نیم لوله ارایه شده با داده های تجربی.....	۵۳
۵-۴ تحلیل پارامتری مدل ارایه شده.....	۵۷
۶-۴ بهینه سازی.....	۶۲
۱-۶-۴ روش های حل یک مسئله بهینه سازی چندهدفه.....	۶۳
۲-۶-۴ الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II).....	۶۴
۳-۶-۴ دلایل انتخاب الگوریتم NSGA-II نسبت به سایر الگوریتم های تکاملی.....	۶۵
۴-۶-۴ نتایج بهینه سازی مدل.....	۶۷
فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادات.....	۷۱
۱-۵ مقدمه:.....	۷۲
۲-۵ نتیجه گیری:.....	۷۲
۳-۵ پیشنهادات:.....	۷۴
پیوست.....	۷۵
مراجع.....	۷۹

فهرست جداول

جدول ۱-۲: بازده‌ها در طرح‌های مختلف PV/T.....	۲۴
جدول ۱-۳: مشخصات پنل در مطالعه حاضر.....	۳۱
جدول ۱-۴: داده‌های خروجی سولار پاور آنالیزر و محاسبه بازده الکتریکی.....	۴۸
جدول ۲-۴: پارامترهای مورد استفاده در مقایسه دو مدل تمام لوله و نیم‌لوله.....	۵۱
جدول ۳-۴: شرایط محیطی ثابت برای مقایسه دو مدل تمام لوله و نیم‌لوله.....	۵۱
جدول ۴-۴: میزان خطاهای موجود در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری.....	۵۴
جدول ۵-۴: پارامترهای ثابت برای بررسی تحلیل پارامتری.....	۵۷
جدول ۶-۴: مقادیر جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص.....	۶۹
جدول ۷-۴: مقادیر جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص و توان مصرفی پمپ.....	۷۰

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: مقایسه ای از ضخامت سیلیکون مورد نیاز در لایه نازک‌ها و سلول‌های کریستالی [۲].....	۵
شکل ۲-۱: ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های فتوولتائیک به تفکیک مناطق مختلف دنیا [۳].....	۷
شکل ۳-۱: چشم انداز سناریوهای مختلف روند بازار فتوولتائیک در جهان [۳].....	۷
شکل ۴-۱: دسته بندی انواع PV/T های تخت [۶].....	۱۱
شکل ۵-۱: شمای سیستم PV/T آب‌خنک [۸].....	۱۲
شکل ۶-۱: مقطع کلکتور PV/T دوگذر [۱۴].....	۱۳
شکل ۷-۱: مقطع کلکتور PV/T دوگذر با پره مقطع کلکتور PV/T دوگذر با پره و CPC. [۱۰-۱۱].....	۱۴
شکل ۸-۱: مقطع مدل های مختلف کلکتور PV/T [۱۵].....	۱۴
شکل ۹-۱: آرایش هدر رایزر سیستم PV/T [۱۶].....	۱۵
شکل ۱۰-۱: آرایش ماریج سیستم PV/T [۱۶].....	۱۶
شکل ۱۱-۱: طرح ویژه سیستم PV/T [۱۷].....	۱۷
شکل ۱-۲: شمایی از اتصال لوله سرپانتین به PV.....	۲۷
شکل ۱-۳: شمایی از مقطع سیستم PV/T روی یک مجرای جریان [۶۰].....	۳۰
شکل ۲-۳: شمایی از مقطع سیستم PV/T با طراحی جدید روی یک مجرای جریان.....	۳۱
شکل ۳-۳: نمایی از اتصال لوله ماریج به صفحه جاذب.....	۳۱
شکل ۴-۳: ستاپ آزمایشگاهی.....	۳۲
شکل ۵-۳: مدار مقاومت حرارتی معادل سیستم PV/T متداول.....	۳۳
شکل ۶-۳: مدار مقاومت حرارتی معادل سیستم PV/T طرح ارایه شده.....	۳۳
شکل ۷-۳: شمایی از صفحه جاذب و لوله PV/T ماریج [۳۸].....	۳۵
شکل ۸-۳: توزیع دمای صفحه جاذب بین لوله‌های i و i+1 [۳۸].....	۳۵
شکل ۹-۳: الگوریتم نحوه انجام محاسبات حرارتی، الکتریکی سیستم PV/T.....	۴۴
شکل ۱-۴: تصویر دوربین حرارتی در حالت بدون خنک‌کاری.....	۴۷
شکل ۲-۴: تصویر دوربین حرارتی در حالت با خنک‌کاری.....	۴۸
شکل ۳-۴: بررسی بازده الکتریکی در دو حالت با خنک‌کاری و بدون خنک‌کاری با تابش تقریباً ثابت.....	۴۹
شکل ۴-۴: اعتبارسنجی مدل متداول با مقاله [۶۰].....	۵۰
شکل ۵-۴: مقایسه دمای خروجی سیال با تغییر دبی آب در دو حالت لوله و نیم‌لوله.....	۵۲
شکل ۶-۴: بازده‌های حرارتی و الکتریکی بر حسب دمای ورودی سیال در دو حالت لوله و نیم‌لوله.....	۵۲
شکل ۷-۴: بازده‌های حرارتی و الکتریکی بر حسب دبی جریان سیال در دو حالت لوله و نیم‌لوله.....	۵۳
شکل ۸-۴: مقایسه دمای خروجی سیال در حالت آزمایشگاهی با تئوری در سه دبی مختلف.....	۵۴
شکل ۹-۴: اعتبارسنجی بازده حرارتی بر حسب دبی‌های مختلف در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری در حالت نیم‌لوله.....	۵۵
شکل ۱۰-۴: اعتبارسنجی دمای خروجی بر حسب دبی‌های مختلف در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری در حالت نیم‌لوله.....	۵۶
شکل ۱۱-۴: عدد رینولدز.....	۵۶

شکل ۴-۱۲: روند تغییرات بازده‌ها با تغییر دمای ورودی سیال در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری در حالت

نیم‌لوله..... ۵۷

شکل ۴-۱۳: بررسی اثر دبی جریان ۵۸

شکل ۴-۱۴: بررسی اثر تعداد ردیف لوله‌ها..... ۵۹

شکل ۴-۱۵: بررسی اثر سرعت باد بر روی بازده‌های سیستم..... ۶۰

شکل ۴-۱۶: بررسی اثر دمای ورودی..... ۶۱

شکل ۴-۱۷: جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص..... ۶۸

شکل ۴-۱۸: جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص و توان مصرفی پمپ..... ۷۰

فهرست علائم

مساحت	$A \text{ (m}^2\text{)}$
سطح صفحه جاذب	$A_c \text{ (m}^2\text{)}$
سطح سلول‌های خورشیدی	$A_{cell} \text{ (m}^2\text{)}$
عرض صفحه جاذب روی یک مجرای جریان	$B \text{ (m)}$
ظرفیت حرارتی ویژه آب	$C_{pw} \text{ (J/kg.K)}$
قطر	$D \text{ (m)}$
ضریب پرکنندگی	FF
ضریب اصطکاک	F
ضریب برداشت حرارت	F_R
شدت تابش خورشیدی	$G \text{ (W/m}^2\text{)}$
ضریب انتقال حرارت	$H \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
قابلیت هدایت حرارتی	$K \text{ (W/mK)}$
ضخامت، طول مجاری جریان	$L \text{ (m)}$
نرخ جریان	$\dot{m} \text{ (kg/s)}$
تعداد مجاری جریان	N
عدد ناسلت	Nu
عدد رینولدز	Re
عدد پرانتل	Pr
نرخ انتقال حرارت	$\dot{Q}$
جریان حرارتی وارد شده به قسمت اام	q_i
نرخ انتقال حرارت	$\dot{S}$
دما	$T \text{ (}^\circ\text{C)}$
ضریب انتقال حرارت کلی از سطح پایین PV/T به محیط	$U_b \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
ضریب اتلاف حرارتی کلی	$U_L \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
ضریب اتلاف حرارت از بالای PV/T به محیط	$U_t \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
ضریب انتقال حرارت هدایتی از سلول خورشیدی به سیال از طریق تدلار	$U_T \text{ (W/m}^2\text{.K)}$
ضریب انتقال حرارت کلی از شیشه به جریان سیال از طریق تدلار و سلول خورشیدی	U_{tw}
سرعت متوسط سیال	$\bar{V}$
سرعت باد	V_w
فاصله مجاری جریان	$W \text{ (m)}$

علائم یونانی:

α	ضریب جذب نور
ε	ضریب صدور
η	بازده
τ	ضریب انتقال نور
σ (W/m ² K ⁴)	ثابت استفان بولتزمن
Δ	تابع دلتا
ρ	چگالی سیال
$(\tau\alpha)_{\text{eff}}$	ضریب انتقال - جذب موثر
β	ضریب پکینگ
Φ	زاویه شیب سیستم PV/T

زیرنویس:

Abs	جاذب
Adh	چسب
Air	هوا
Amb	هوای محیط
B	پایه، سطح زیرین
Bs	پشت تدلار
Conv	جابه‌جایی
cell	سلول خورشیدی
D	قطر
el	الکتریکی
f F,	سیال
g G,	شیشه، پوشش شفاف
i	داخلی
In	ورودی
Ins	عایق
o	خارجی
out	خروجی
ov	کلی
P	صفحه جاذب
r	تابشی
ref	مرجع
s	آسمان
si	سیلیکون
t	سطح بالایی
T	تدلار
th	حرارتی
tube	لوله
w	باد
u, useful	مفید

فصل ۱: آشنایی با مفاهیم اولیه

۱-۱ مقدمه:

بحران انرژی در زندگی امروز موضوعی بسیار مهم و حیاتی است. رشد روزافزون نیاز به انرژی و پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی از یک سو و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی از سوی دیگر، محرکی شده است که محققان و سرمایه‌گذاران در بخش انرژی، به سمت تامین انرژی از منابع تجدیدپذیر جذب شوند. با توجه به پتانسیل بالای تابش در مناطق وسیعی از کشور، از بین منابع تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی دارای جذابیت بیشتری برای سرمایه‌گذاری و همچنین پژوهش است. در یک طبقه‌بندی ساده، فناوری‌های تولید الکتریسیته از خورشید به سه دسته فتوولتاییک، متمرکزکننده^۵، نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی (مبتنی بر روش‌های متمرکز کننده تابش) و فناوری‌های نوظهور تقسیم می‌شوند. در میان این سه دسته فناوری فتوولتاییک که بر اساس تبدیل مستقیم نور خورشید به الکتریسیته عمل می‌کند، بیشترین رشد را داشته و امروزه کشورهای زیادی از آن در قالب متصل به شبکه و مستقل از شبکه استفاده می‌کنند. در میان دو دسته دیگر نیز، فناوری گرمایش خورشیدی به ویژه روش سهموی خطی گسترش بیشتری یافته است. همچنین، تحلیل آماری بزرگترین نیروگاه‌های احداث شده با فناوری فتوولتاییک و گرمایشی نشان از برتری چشم‌گیر فناوری فتوولتاییک از بعد هزینه احداث و سطح زمین اشغال شده، و نیز انعطاف‌پذیری نصب و راه‌اندازی در میان انواع فناوری‌های خورشیدی دارد [۱].

همانگونه که گفته شد تولید الکتریسیته از انرژی خورشید به دو روش مستقیم و غیرمستقیم صورت می‌گیرد. در روش غیرمستقیم، ابتدا انرژی خورشیدی به انرژی حرارتی تبدیل می‌شود، سپس از طریق یک سیکل ترمودینامیکی انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد، که به آن نیروگاه حرارتی خورشیدی گفته می‌شود. به پدیده‌هایی که در اثر تابش نور بدون استفاده از مکانیزم‌های محرک، الکتریسیته تولید کند پدیده فتوولتاییک و به هرسیستمی که از این پدیده‌ها استفاده کند سیستم

⁵ concentrator

فتوولتاییک می‌گویند . سیستم فتوولتاییک یکی از پرمصرف ترین کاربردهای انرژی‌های نو می‌باشد و تاکنون سیستم‌های گوناگونی با ظرفیت‌های مختلف (چند وات تا چند مگاوات) در سراسر جهان نصب و راه‌اندازی شده است . بطور عمده سیستم‌های فتوولتاییک در دو کاربرد عمده استفاده می‌شود:

کاربردهای مستقل از شبکه و کاربردهای متصل به شبکه [۲].

۲-۱ سیستم‌های فتوولتاییک

سلول فتوولتاییک نور خورشید را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. اصل مقدماتی در این تکنولوژی پدیده "فتوالکتریک" است که اولین بار توسط انیشتین مطرح گردید. "فتو" به معنای نور و "ولتاییک" به معنای الکتریسیته می‌باشد. عنصر اصلی در ساخت سلول‌های خورشیدی، نیمه‌هادی‌هایی مانند سیلیکون و گالیم آرسناید می‌باشد. اساس کار سلول‌های خورشیدی بر مبنای تئوری الکترون‌های ظرفیت اتم قابل توجیه است.

در سطح خارجی تراز انرژی اتم دو سطح تراز مشخص وجود دارد. سطح تراز ظرفیت اتم (والانس) که در عملیات شیمیایی دخالت دارد و سطح تراز هدایت اتم (لایه هدایت) که در هدایت الکتریکی نقش دارد. هر اتم برای اینکه از تراز ظرفیتی خود به تراز هدایت انتقال یابد، احتیاج به مقدار مشخصی انرژی دارد که به آن انرژی گپ می‌گویند. علت استفاده از نیمه‌هادی‌ها هم دقیقاً به این خاطر است که این عناصر نیاز به انرژی گپ بسیار پایین دارند تا به تراز هدایت منتقل گردند. در نیمه‌هادی‌ها با اضافه کردن ناخالصی به کریستال خالص آنها می‌توان میزان انرژی گپ را بیش از پیش کاهش داد. اگر به سیلیسیم که یک نیمه‌هادی است، فسفر اضافه شود دارای بار منفی و اگر عنصر بُر اضافه شود، دارای بار مثبت می‌گردد.

حال اگر به الکترونی که در تراز ظرفیت است انرژی بیش از مقدار انرژی گپ داده شود به تراز هدایت منتقل شده و باعث ایجاد الکترون و حفره‌ای آزاد می‌گردد. لذا از همین خاصیت برای ساخت دو قطب مثبت (P) و منفی (N) استفاده می‌گردد.

از کنار هم قرار گرفتن دو قطب P و N، یک اتصال PN بوجود می‌آید و در اثر برخورد نور به سطح این نیمه‌هادی نوع PN و کسب انرژی گپ، حامل‌های بار (الکترون - حفره) به‌وجود آمده که می‌توان با هدایت آن در یک مدار خارجی تولید الکتریسیته نمود.

مواد گوناگونی تاکنون در ساخت سلول‌های خورشیدی استفاده شده‌اند که بازده و هزینه‌های ساخت متفاوتی دارند. در واقع این سلول‌ها باید طوری طراحی شوند که بتوانند طول موج‌های نور خورشید را که به سطح زمین می‌رسد با بازده بالا به انرژی مفید تبدیل کنند. موادی که برای ساخت سلول‌های خورشیدی استفاده می‌شوند را می‌توان در سه نسل طبقه‌بندی نمود، که در ادامه به بررسی هر یک پرداخته می‌شود.

۱-۲-۱ نسل اول فناوری فتوولتاییک: سلول‌های کریستالی^۶

سیلیکون^۷ یکی از فراوان‌ترین عناصر حال حاضر کره‌زمین می‌باشد. این عنصر یک نیمه‌هادی بسیار مناسب برای استفاده در سیستم‌های فتوولتاییک است. سلول‌های کریستالی سیلیکون بسته به این که ویفرهای سیلیکونی به چه روش ساخته می‌شوند به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌شوند: مونوکریستال^۸ سیلیکونی و پلی کریستال^۹ سیلیکونی.

^۶ Crystalline cells

^۷ Silicon

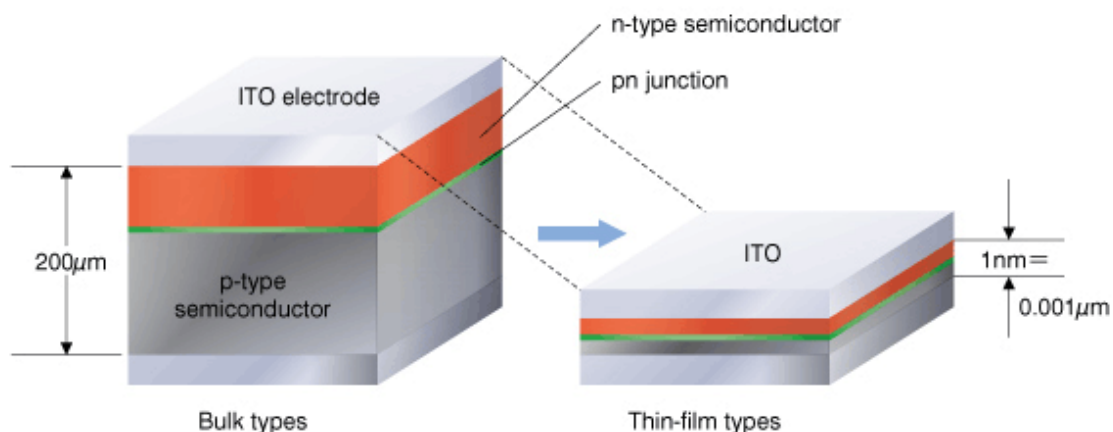
^۸ Monocrystalline

^۹ Polycrystalline

۲-۲-۱ نسل دوم فناوری فتوولتاییک: سلول‌های خورشیدی لایه نازک^{۱۰}

بیش از ۱۱ سال تحقیق و توسعه، مطابق شکل (۱-۱)، سلول‌های خورشیدی لایه نازک شروع به گسترش نمودند. نسل سلول‌های لایه نازک علاوه بر خاصیت انعطاف‌پذیری، به‌طور قابل ملاحظه‌ای در هزینه تولید الکتریسیته نسبت به ویفرهای سیلیکونی کاهش ایجاد نمودند. سه نوع اصلی سلول‌های خورشیدی لایه نازک که در حال تجاری شدن است عبارتست از:

- سیلیکون‌های آمورف (a-Si) و (a-Si/ μ c-Si)
- کادمیوم تلورید (Cd-Te)
- مس-اینیدیوم-سلنید (CIS) و مس-اینیدیوم-گالیم-دیسلنید (CIGS)



شکل ۱-۱: مقایسه ای از ضخامت سیلیکون مورد نیاز در لایه نازک‌ها و سلول‌های کریستالی [2]

۳-۲-۱ نسل سوم فناوری‌های فتوولتاییک: فناوری‌های نوظهور

فناوری‌های این نسل که بر پایه مواد آلی و چند پیوندی هستند، در مرحله پیش از تجاری‌سازی به سر می‌برند. این نسل دارای بازده نامی بالاتر از ۳۲٪ می‌باشند. فناوری‌های نسل سوم به دسته‌های زیر تقسیم می‌شوند:

- CPV^{۱۱}

^{۱۰} Thin Film

^{۱۱} Concentrating PV

- سلول‌های خورشیدی ارگانیک
- سلول‌های خورشیدی حساس به رنگ
- سلول‌های خورشیدی پلیمری
- سلول‌های خورشیدی مبتنی بر کریستال‌های مایع [۲].

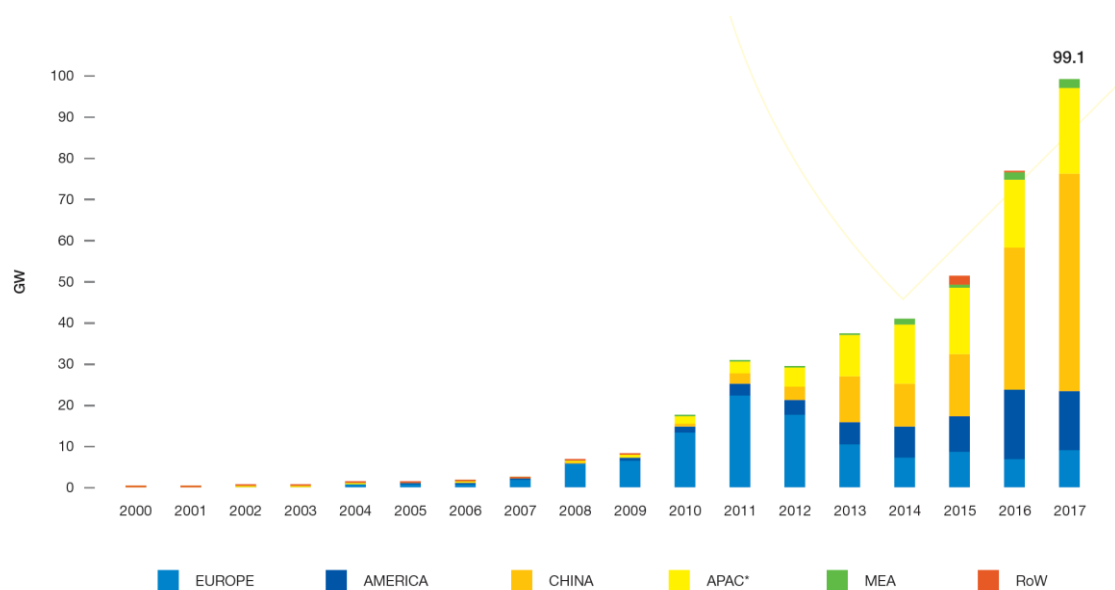
۳-۱ سیستم‌های فتوولتایک در جهان

ظرفیت عملیاتی سیستم‌های فتوولتایک در سال ۲۰۱۷ مجموعاً ۹۹,۱ گیگا وات برق خورشیدی متصل به شبکه بوده است (شکل ۱-۲). این عدد تقریباً معادل ۳۰٪ توان عملیاتی سال ۲۰۱۶ (با ظرفیت ۷۶,۶ گیگاوات) می‌باشد که پایین‌تر از نرخ رشد ۴۹٪ در سال ۲۰۱۶ و بسیار بالاتر از پیش‌بینی کارشناسان بوده است. سناریوی متوسط^{۱۲}، میزان رشد ۵٪ یعنی تا ۸۰,۵ گیگاوات را پیش‌بینی نموده بود. در صورتی که ۹۹,۱ گیگاوات نصب به سناریوی بالا^{۱۳} با تخمین ۱۰۳,۶ گیگاوات نزدیک‌تر بوده است. بیشترین بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به صورت فتوولتایک در چین با سهمی بیشتر از نیمی از ظرفیت جهان یعنی ۵۳,۳٪ می‌باشد، ایالات متحده آمریکا دومین بازار بزرگ PV در سال ۲۰۱۷ بوده است [۳].

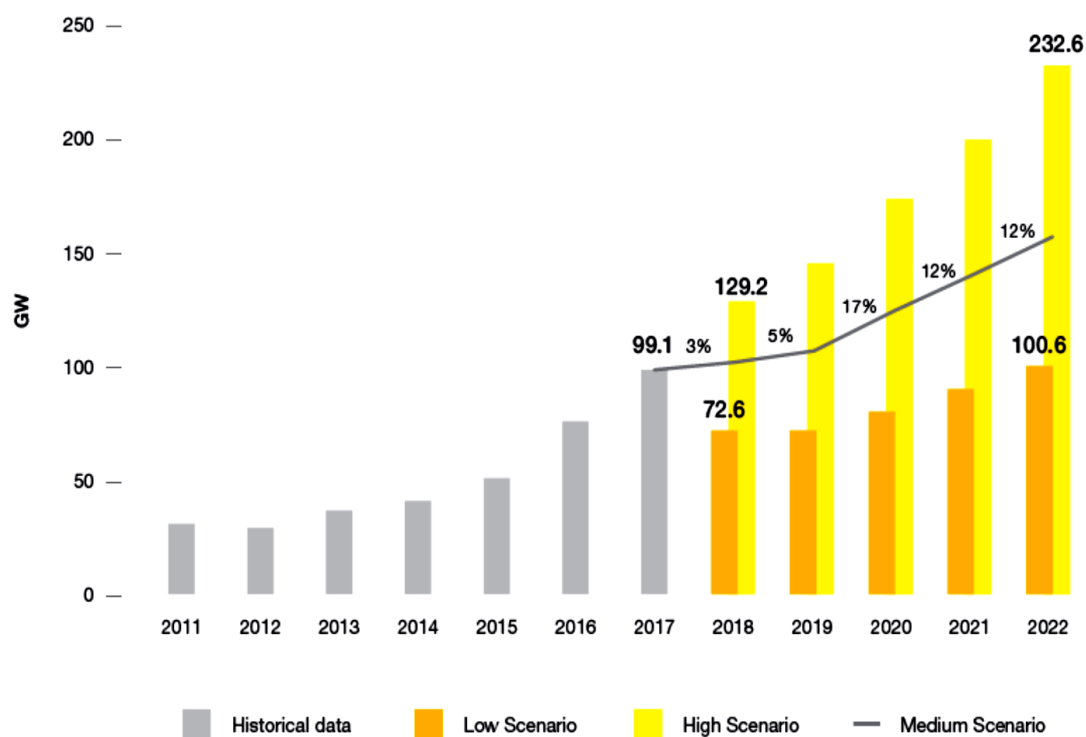
از طرفی مطابق شکل (۱-۳) پیش‌بینی‌های مختلفی برای توسعه این فناوری در سال‌های پیش رو دیده شده است.

¹² Our Medium Scenario,

¹³ GMO (genetically modified organisms)2017 High Scenario



شکل ۲-۱: ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های فتوولتاییک به تفکیک مناطق مختلف دنیا [۳].



شکل ۳-۱: چشم انداز سناریوهای مختلف روند بازار فتوولتاییک در جهان [۳].

۴-۱ انرژی خورشیدی در ایران

در ایران، روزانه به طور متوسط ۵,۵ کیلووات ساعت انرژی خورشیدی بر هر مترمربع از سطح زمین می‌تابد و در بیش از دوسوم مساحت آن، ۳۰۰ روز آفتابی وجود دارد. در ایران بخشی از بکارگیری انرژی خورشید مربوط به انرژی حرارتی مورد استفاده در آبگرمکن‌های خورشیدی است. علاوه بر آن از سیستم‌های کوچک فتوولتاییک جهت روشنایی معابر و جاده‌ها، چراغ‌های ترافیک، سیستم‌های مخابراتی، پمپ آب خورشیدی برای مصارف کشاورزی، تجهیز مناطق مرزی، روشنایی تونل‌ها و برق رسانی روستایی نیز استفاده می‌شود. همچنین با توجه به سیاست‌های دولت در توسعه بکارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر، نیروگاه‌های فتوولتاییک نیز به طور جدی طی سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۱۳۹۴، ظرفیت نیروگاه‌های فتوولتاییک نسبت به سال قبل، افزایش چشم‌گیری به میزان ۱۶,۳ برابر داشته و به ۹۱۶۴,۲ کیلووات رسیده است. این افزایش ظرفیت به دلیل ورود سامانه‌های فتوولتاییک در سطح تمامی استان‌ها و ورود نیروگاه خورشیدی زنجان بوده که در سال مزبور به مجموع نیروگاه‌های فتوولتاییک کشور افزوده گردید. از آنجا که سیستم فتوولتاییک دارای مزایایی نظیر سادگی و سهولت در نصب و راه‌اندازی، حمل و نقل آسان، عدم وجود قطعات مکانیکی، ضریب اطمینان بالا، هم‌خوانی با طبیعت و همچنین عدم نیاز به سوخت است، وزارت نیرو تلاش نموده از این سیستم برای برق‌رسانی به روستاها استفاده نماید. طبق آمار منتشره از سوی شرکت توانیر، علیرغم اتمام عملیات برق‌رسانی به روستاهای بالای ۲۰ خانوار کشور، هنوز ۰,۷ درصد خانوار روستایی کشور که در روستاهایی با جمعیت کمتر از ۲۰ خانوار ساکن می‌باشند، از نعمت دسترسی به برق محروم هستند. تا پایان سال ۱۳۹۴، برق تعداد ۱۸ روستا با تعداد ۲۰۱ خانوار از طریق سیستم‌های فتوولتاییک تامین گردیده است [۴].

۵-۱ سیستم‌های فتوولتاییک/حرارتی

با در نظر گرفتن روند روبه‌رشد استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک افزایش بازده پنل‌های فتوولتاییک مورد توجه قرار گرفته است. سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی (PV/T) با گردش سیالی مانند آب یا هوا در اطراف سلول‌های فتوولتاییک، از یک طرف موجب خنک شدن سلول‌ها می‌گردد و از طرفی دیگر انرژی حرارتی جذب شده را مورد استفاده قرار می‌دهند. این نوع سیستم، ترکیبی است از سیستم فتوولتاییک و سیستم حرارتی خورشیدی که به طور هم‌زمان تولید حرارت و برق خورشیدی در آن میسر می‌شود. به ازای کاهش یک درجه دما ماژول PV افزایش ۰,۴-۰,۶۵ درصدی بازده گزارش شده است [۵]. به عنوان مثال اگر بازده یک پنل ۱۵٪ باشد با کاهش ۲۰ درجه‌ای دما میتوان بازده را تا ۱۶,۵٪ افزایش داد. با استفاده از این ترکیب، ضمن استفاده بهینه از فضای نصب، افزایش بازدهی ماژول فتوولتاییک محقق می‌شود. سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی از منظرهای مختلف مانند نوع کاربرد، سیال عامل، ساختار و ... می‌توانند مورد بررسی و دسته بندی قرار گیرند که در ادامه به این تقسیم بندی‌ها اشاره می‌شود

۱-۵-۱ دسته‌بندی با توجه به نحوه بکارگیری حرارت

الف. کاربرد PV/T از نظر نوع مصرف حرارت در ساختمان:

بر اساس نوع کاربرد در ساختمان می‌توان به گرمایش آب بهداشتی با استفاده از سیستم PV/T آب‌خنک، گرمایش فضای ساختمان با استفاده از سیستم PV/T آب و پمپ حرارتی، گرمایش فضای ساختمان با استفاده از سیستم تهویه PV و کلکتورهای PV/T هوایی اشاره نمود.

ب. شیرین‌سازی خورشیدی آب لب‌شور با PV/T آب‌خنک

پ. خشک کردن محصولات کشاورزی با PV/T هوایی

ت. گرمایش استخرهای عمومی با استفاده از سیستم PV/T آب‌خنک

ث. سرمایش خورشیدی با استفاده از سیستم PV/T متمرکزکننده

۱-۵-۲ تقسیم‌بندی از نظر نوع اتصال به شبکه:

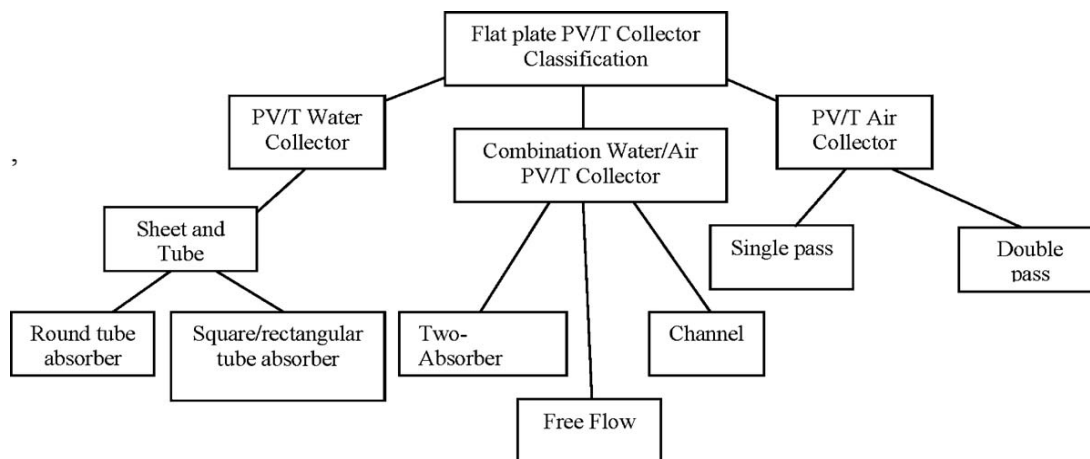
با توجه به کاربرد اصلی سیستم‌های فتوولتائیک در تولید برق، می‌توان این سیستم‌ها را به دو دسته کلی تقسیم‌بندی نمود:

- سیستم‌های PV/T برای کاربردهای خارج یا منفصل از شبکه (off-grid)
- سیستم‌های PV/T برای کاربردهای متصل به شبکه (On-grid)

در صورتی که سیستم در مقیاسی طراحی شده باشد که به شبکه متصل شود، اصلی‌ترین تجهیزات جهت اتصال به شبکه عبارتند از: تبدیل‌کننده/اینورتر یا واحد حالت شبکه (PCU) و ذخیره‌ساز حرارت. در صورتی که سیستم به گونه‌ای طراحی شده باشد که به صورت منطقه‌ای و بدون اتصال به شبکه مورد استفاده قرار گیرد، لازم است سیستم به میزان مشخص بار الکتریکی مستقیم و/یا متناوب تامین کند. برخی تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که در شرایطی که برخی ملاحظات اقتصادی برآورده شود، سرمایه‌گذاری در سیستم‌های متصل به شبکه توجیه اقتصادی سودآورتری دارد.

۱-۵-۳ دسته‌بندی با توجه به سیال عامل

این نوع کلکتورها مشتمل بر سه دسته کلی با سیال خنک‌کاری آب، هوا و سیال ترکیبی هوا/آب می‌باشد (شکل ۱-۴).



شکل ۱-۴: دسته بندی انواع PVT های [۶].

به طور کلی بررسی های پیشین نشان دهنده آن است که در دنیا از بین انواع کلکتورهای خورشیدی PV/T، کلکتور نوع هوایی رایج تر از انواع دیگر است. البته شایان ذکر است که این نوع کلکتور در مقایسه با کلکتورهای آب خنک کاربردهای کمتری دارد [۷]. در ادامه سه دسته کلی از سیستم های PV/T معرفی می شوند.

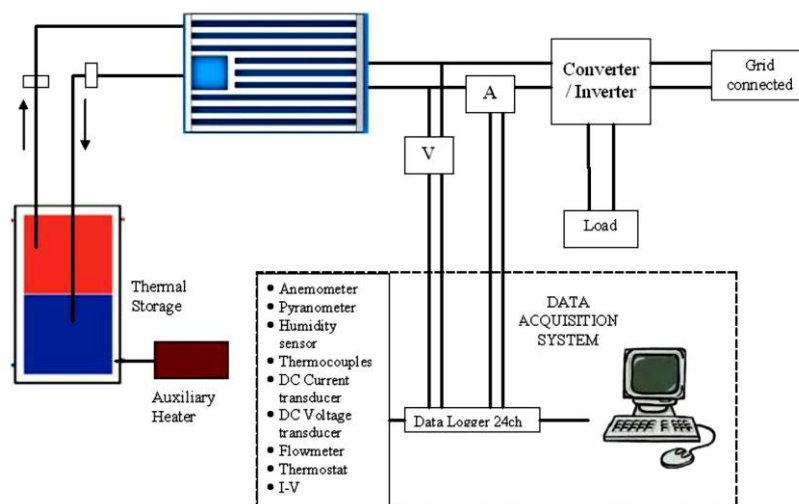
الف) کلکتورهای PV/T ترکیبی آب (W-PV/T)

در این مدل ها نمونه های کلکتور سیستم فتوولتائیک حرارتی عموماً از یک کلکتور حرارتی خورشیدی موجود به عنوان پایه بهره می برند. ساختار معمول این نوع PV/T شبیه به ساختار کلکتور خورشیدی تخت است و تفاوت آن در این است که سطح رویی جاذب با سلول های خورشیدی که به صورت موازی یا سری به هم متصل شده اند، پوشانده شده است و سیال در لوله هایی با آرایش های مختلف در زیر آن در جریان است. عملکرد سیستم های آب خنک با بررسی بازده الکتریکی و حرارتی آنها تعیین می شود. این بازده ها به تغییر دمای آب، نرخ جریان آب، هندسه کانال جریان آب و اندازه آن، نوع فتوولتائیک و شرایط آب و هوایی بستگی دارد.

از نظر کاربرد، آب گرم مصرف بالاتری دارد، ذخیره آن آسان است و در طول سال و در فصول مختلف نیز استفاده می شود. کلکتورهای صفحه تخت برای تولید آب گرم بسیار مناسب هستند و به همین علت تقریباً ۷۵٪ از کل سطح کلکتورهای نصب شده در دنیا را به خود اختصاص داده اند. انواع کلکتورهای

سیستم PV/T نیز براساس همین نوع کلکتور خورشیدی توسعه یافته‌اند که با نصب فتوولتاییک بر صفحه جاذب سیستم PV/T شکل می‌گیرد [۸].

در شکل ۱-۵ طرح سیستم PV/T آب‌خنک متصل به شبکه نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده می‌شود، این سیستم متشکل است از کلکتور PV/T، مخزن ذخیره‌سازی حرارت، گرمکن کمکی و تبدیل‌کننده/اینورتر است.



شکل ۱-۵: شمای سیستم PV/T آب‌خنک [۸].

با استفاده از این نوع سیستم مشکلاتی همچون بازدهی الکتریکی پایین PV، ناهمگونی ساختار معماری و اشغال بیش از اندازه سطح سقف ساختمان برطرف می‌شود. همچنین با استفاده از این نوع سیستم بازدهی ترکیبی به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد [۹]. در کنار مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته در ارتباط با سیستم‌های PV/T آب‌خنک، شبیه‌سازی‌هایی نیز در خصوص تامین گرمایش و سرمایش بر روی این گونه سیستم‌ها انجام گرفته است.

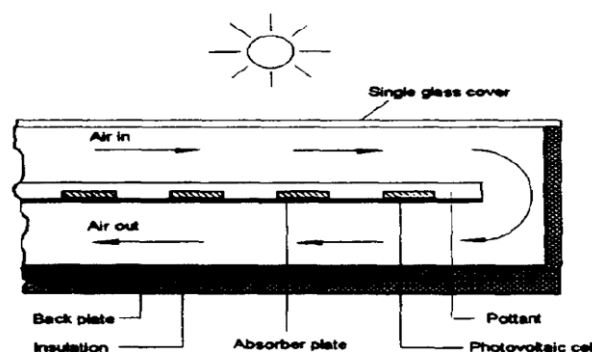
از نظر طبقه‌بندی، کلکتورهای PV/T نوع آب‌خنک به صورت ساختار ورق و لوله با جاذب مقطع گرد و با جاذب مقطع مربع یا مستطیل تقسیم‌بندی می‌شوند.

ب) کلکتورهای PVT هواخنک (A-PVT)

در این نوع سیستم، انرژی حرارتی کلکتور PV/T توسط هوا دریافت می‌شود و به صورت آب گرم یا هوای داغ قابل استفاده است. هوای گرم تولید شده از کلکتور را می‌توان برای کاربردهای مختلفی استفاده نمود. یکی از این موارد خشک کردن است.

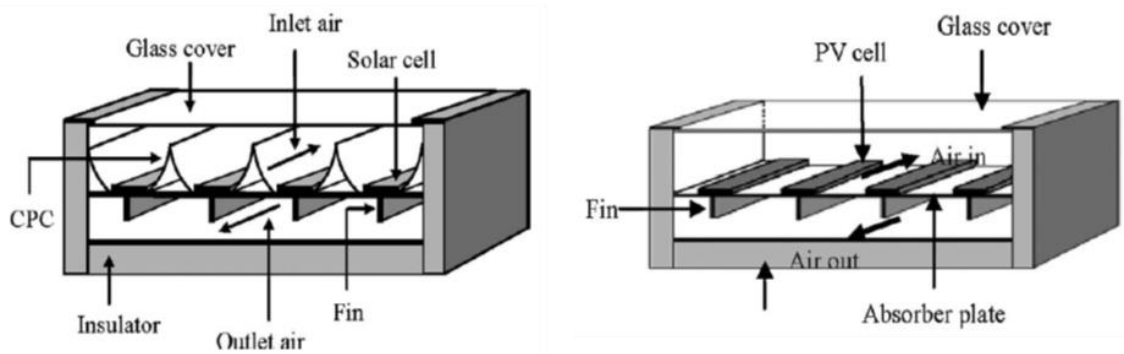
فرآیند خشک کردن محصولات کشاورزی، فرآیندی بسیار مهم در صنایع غذایی است. در شرایط ناپایدار آب و هوای گرم و مرطوب به خصوص در نواحی استوایی، استفاده از کلکتورهای هوایی PV/T یک راهکار مناسب در دستیابی به کیفیت بالا در محصولات خشک است. استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی PV/T در این مناطق علاوه بر اثرات مثبت زیست‌محیطی، منجر به ایجاد ثروت و رشد توسعه پایدار می‌شود [۱۰-۱۱]. در مطالعات دیگری استفاده از فرآیند خشک‌کن برای محصولات کشاورزی و دریایی به عنوان جذاب‌ترین و اقتصادی‌ترین کاربردهای انرژی خورشیدی ذکر شده است [۱۲-۱۳].

PV/T هواخنک معمولاً به دو دسته کلی تک‌گذره و دوگذره دسته‌بندی می‌شوند. برای افزایش بازده حرارتی در این نوع PV/T از پره یا متمرکزکننده‌های سهموی مرکب (CPC^{۱۴}) استفاده می‌شود. در شکل‌های (۶-۱) تا (۷-۱) شمایی از این دو نوع نشان داده شده است. نتایج یک تحقیق نشان دهنده آن است که کلکتورهای خورشیدی PV/T هواخنک از نوع دوگذر در مقایسه با تک‌گذر دارای بازدهی بالاتری هستند [۱۴].



شکل ۶-۱: مقطع کلکتور PVT دوگذر [۱۴].

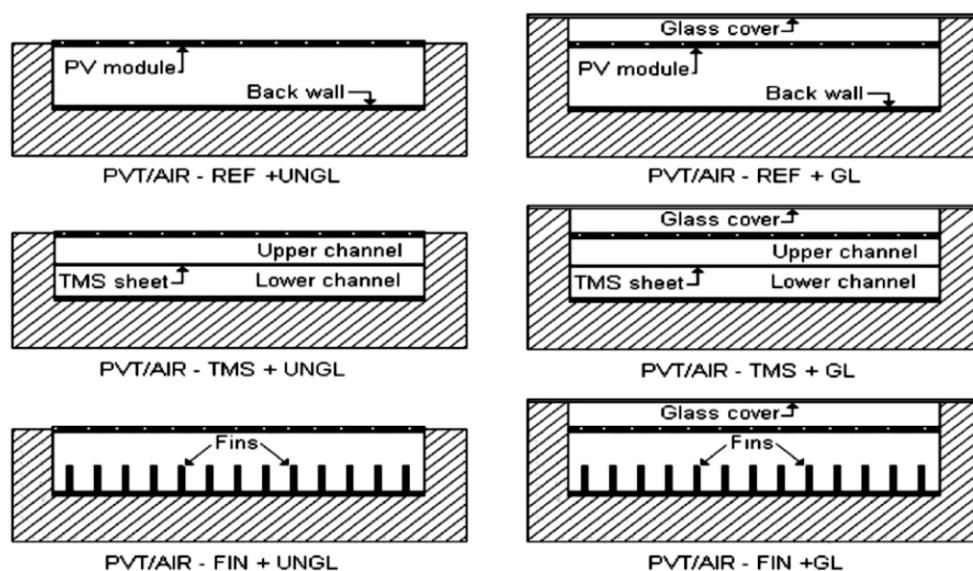
¹⁴ Compound Parabolic Concentrators



شکل ۷-۱؛ مقطع کلکتور PVT دوگذر با پره. مقطع کلکتور PVT دوگذر با پره و CPC. [۱۰-۱۱].

پ) کلکتورهای PVT ترکیبی آب و/یا هوا (W/A-PVT)

ترکیب کلکتورهای نوع آب و/یا هوا را می‌توان مبتنی بر الگوی جریان آب یا هوا متمایز نمود. این نوع کلکتورها را می‌توان مبتنی بر جریان در سمت بالای جاذب، سمت زیرین جاذب، یا هر دو سمت جاذب باشد. همچنین این جریان می‌تواند به صورت کلکتورهای تک‌گذر یا دوگذر باشد. در شکل ۸-۱ ترکیب کلکتور PV/T آب و هوا قابل مشاهده است و این سیستم به گونه‌ای است که به طور همزمان هم آب گرم تولید شده و هم هوای گرم تولیدی دارد [۱۵]. در این سیستم یک ورق فلزی تخت نازک با دیوار پره دار پشت کانال هوا معلق در وسط سیستم استفاده شده است.



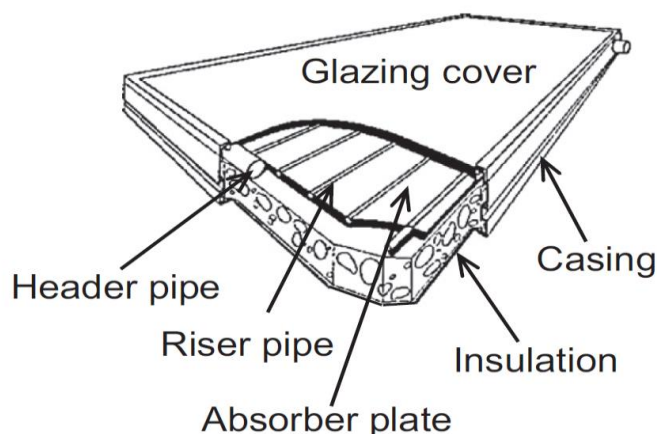
شکل ۸-۱: مقطع مدل‌های مختلف کلکتور PVT [۱۵].

۴-۵-۱ دسته‌بندی با توجه به ساختار

ساختار کلکتور PV/T با توجه به نوع سیال عامل آن تغییر می‌کند. مثلاً در نوع هواخنک ساختار یک گذر، دو گذر و یا متخلخل از انواع ساختارهای این نوع است. اما با توجه به هدف‌گذاری این پایان‌نامه در استفاده از نوع آب‌خنک دسته‌بندی ساختاری این نوع به صورت متوسط مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. لذا کلکتورهای PV/T آب‌خنک بر اساس چیدمان لوله‌های آب‌خنک در پشت پنل فتولتاییک به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود:

الف) هدر-رایزر^{۱۵}

یک طرح کلی از یک نوع کلکتور صفحه تخت خورشیدی با طراحی هدر رایزر در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. این طرح شامل یک صفحه جاذب پوشش داده شده، عایق در پشت و دوطرف است. تابش خورشیدی که از طریق پوشش شفاف شیشه عبور می‌کند، توسط صفحه جاذب جذب می‌شود. سپس انتقال حرارت از طریق لوله‌های مایع به سیال منتقل می‌شود تا برای استفاده یا ذخیره‌سازی انتقال یابد. لوله‌های مایع را میتوان به صفحه جاذب جوش داد و یا می‌تواند لوله و ورق یکپارچه (فین جداگانه) باشد. لوله‌های طولی، لوله‌های رایزر نامیده می‌شوند که، در دو طرف بالا و پایین به لوله‌های هدر، که قطر بزرگتری دارند، متصل می‌شوند.

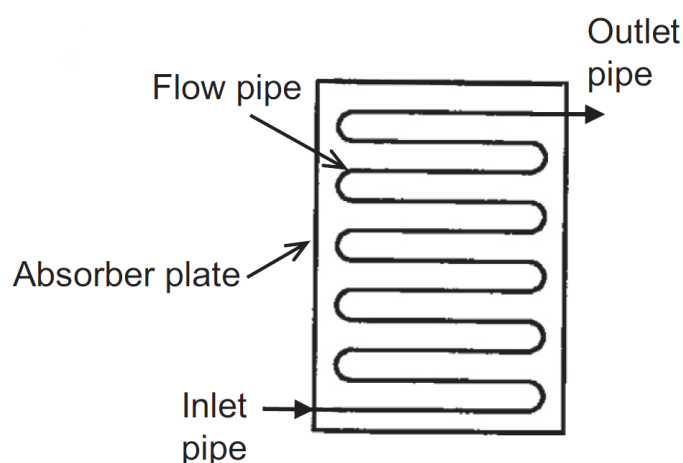


شکل ۹-۱: آرایش هدر رایزر برای یک کلکتور خورشیدی [۱۶].

¹⁵ Header-Riser

ب) ساختار مارپیچ

آرایش لوله ها در این نوع کلکتور مطابق شکل ۱-۱۰ است. در طرح مارپیچ مشکل توزیع نابرابر جریان (بخصوص برای کلکتورهای بزرگ) در لوله های رایزر وجود ندارد اما با توجه به افت فشار نسبتا زیاد این طرح، کلکتور مارپیچ در حالت چرخش طبیعی^{۱۶} کارا نیست و برای انتقال حرارت سیال و چرخش آن به پمپ نیاز است. صفحه جاذب را می توان به صورت یک ورق منفرد ساخت که در آن قطر همه لوله ها ثابت است. در صفحات کوچک تر استفاده از این نوع ساختار بیشتر توصیه می شود.



شکل ۱-۱۰: آرایش مارپیچ سیستم PV/T [۱۶].

ج) طرح های ویژه

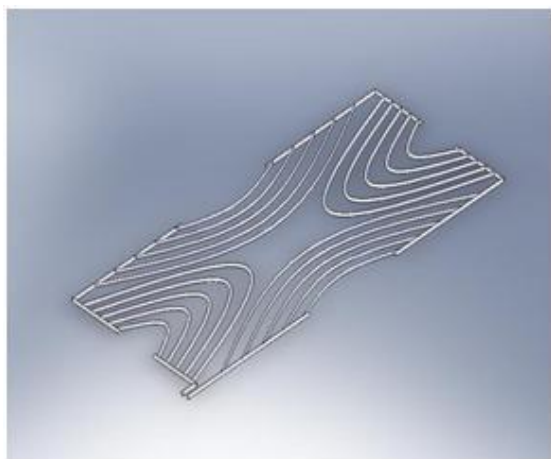
در برخی از طرح های ارایه شده علاوه بر دو طرح ذکر شده در بالا از مسیرهای خاصی (آرایش های خاصی برای لوله ها) استفاده شده است که برخی از آنها در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است. یکی از این طرح ها جریان شبکه ای^{۱۷} است که در آن لوله های توخالی از جنس فولاد ضد زنگ به صفحه جاذب از طریق اتصال جوش متصل شده است. طرح های دیگر مانند حلزونی^{۱۸}، مارپیچ موازی^{۱۹} و... است. برخی از این طراحی ها دارای بازده حرارتی بالایی می باشد اما اجرای این سیستم ها هزینه بالایی دارد.

¹⁶ Thermosyphon

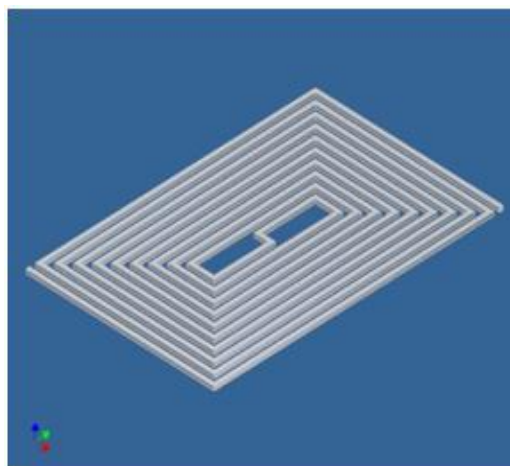
¹⁷ Web Flow Design

¹⁸ Spiral Flow Design

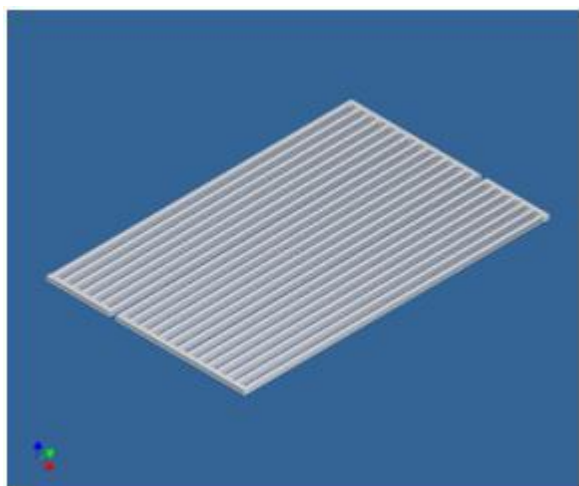
¹⁹ Parallel-Serpentine Flow Design



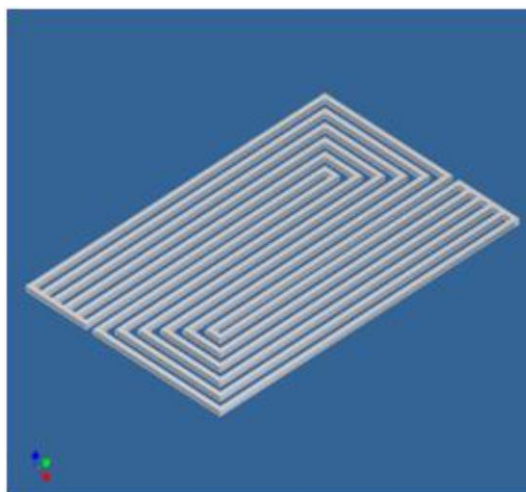
(b)



(a)



(d)



(c)

شکل ۱-۱۱: طرح ویژه سیستم PV/T (a) حلزونی (b) شبکه ای (c) مارپیچ موازی (d) مارپیچ موازی اصلاح شده^{۲۰}. [۱۷]

با توجه به دسته‌بندی‌های گفته شده، در این پژوهش مدل‌سازی و تحلیل یک نوع کلکتور آب‌خنک از نوع مارپیچ مدنظر می‌باشد. حرارت جذب شده در این سیستم می‌تواند به عنوان آب گرم مصرفی در یک ساختمان مورد استفاده قرار گیرد.

²⁰ Modified Serpentine-Parallel Flow Design

فصل ۲: بررسی سوابق موضوع

۱-۲ مقدمه:

طبق گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، افزایش مصرف انرژی برای کشورهای در حال توسعه سریع‌تر از کشورهای توسعه یافته است و تقریباً دوبرابر ظرفیت فعلی خود برای تحقق تقاضای انرژی تا سال ۲۰۲۰ نیاز دارد. همچنین کل انرژی جهان مصرف از سال ۲۰۰۶ تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۴۴ درصد افزایش می‌یابد [۱۹-۲۱]. بنابراین، یک منبع انرژی جایگزین باید برای رفع نیازهای انرژی و حفظ سوخت‌های فسیلی متعارف تعیین کرد. انرژی خورشیدی یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر است و این انرژی پایدار پتانسیل قابل‌توجهی برای رفع تقاضای انرژی جهانی دارد. به طور کلی، سیستم‌های خورشیدی را می‌توان به دو نوع طبقه‌بندی شده اند: سیستم‌های حرارتی و فناوری فتوولتاییک [۲۲-۲۴]. کلکتور حرارتی انرژی خورشیدی را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کند در حالیکه فناوری فتوولتاییک تابش خورشیدی را به برق تبدیل می‌کند. به طور کلی، کلکتور حرارتی و کلکتور فتوولتاییک به طور جداگانه استفاده می‌شد. با این حال، با توجه به تحقیقات قبلی، ترکیب هر دو تکنولوژی در یک سیستم، امکان کاهش فضای موردنیاز، استفاده بهینه از تجهیزات و کاهش هزینه نصب را به دنبال دارد.

این سیستم به عنوان فناوری فتوولتاییک حرارتی (PV/T) ترکیبی شناخته شده است. کلکتور PV/T یک ترکیب از ماژول فتوولتاییک (PV) و کلکتور حرارتی در یک واحد است که به طور همزمان انرژی الکتریکی و حرارتی تولید می‌کند. کلکتور PV/T تولید انرژی بیشتری در واحد سطح را از پنل PV و کلکتور حرارتی به طور جداگانه استفاده می‌شود [۲۵]. Agrawal [۲۶]. بیان می‌کند که بازده تبدیل انرژی تابش خورشیدی به برق توسط پنل PV بین ۱۲ تا ۱۸ درصد و لذا بیش از ۸۰ درصد تابش دریافتی توسط پنل، منعکس شده یا تبدیل به گرما می‌شود. تعداد کمی از محققان [۲۷-۲۸]. پیشنهاد

کرده اند که کارایی پنل PV را می‌توان با حذف گرما بیش از حد از پنل PV با استفاده از مایعات خنک‌کننده مانند هوا و آب افزایش داد [۲۹].

در این فصل در ابتدا به پژوهش‌های مربوط به سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی، سپس به مطالعات مرتبط با آرایش هدر-رایزر کلکتورهای خورشیدی اشاره شده است و بعد از آن، آرایش مارپیچ و مقایسه با آرایش هدر-رایزر بیان شده است.

۲-۲ پیشینه تحقیق:

نخستین تحقیقات مهم در زمینه PV/T از حدود ۴۰ سال قبل در دهه ۷۰ آغاز شده است [۳۰-۳۳]. Prakash در سال ۱۹۹۴ [۳۴]. با تحقیق روی کلکتور فتوولتاییک حرارتی با سیال عامل هوا و آب به این نتیجه رسید که بازده این سیستم‌ها با سیال عامل آب بالاتر از سیال عامل هوا است چون خواص حرارتی فیزیکی آب از هوا بالاتر است.

Nahar و همکارانش [۳۵] نشان دادند که افزودن یک صفحه جاذب در کلکتور PV/T تاثیر کمی بر بازده حرارتی دارد. همچنین Moreno و همکارانش به بررسی کارایی PV/T در فصول مختلف پرداختند و مشکلات گرمای بیش از حد و دمای آب خروجی را در حین تست اعلام کردند [۳۶]. توزیع دما نقش مهمی در تولید توان ایفا میکند [۳۷-۳۸]. تاثیر توزیع دمای پراکنده روی ماژول PV/T به دو صورت تاثیر می‌گذارد: (۱) کاهش کارایی سلول به دلیل از دست‌دادن قدرت خروجی؛ (۲) تنش حرارتی و خستگی حرارتی ناشی از تغییرات دما به علت چرخه‌های حرارتی زیاد [۳۹].

بر اساس تحقیقات انجام شده خنک‌کاری پنل باعث افزایش بازده سیستم می‌شود که عمدتاً از سه روش هدر-رایزر، مارپیچ و یا طرح‌های خاص انجام گرفته است. بسیاری از تحقیقات انجام شده در مورد پنل‌هایی با آرایش هدر-رایزر صورت گرفته که ابتدا به تعدادی از آنها اشاره می‌شود:

۲-۲-۱ بررسی نتایج نوع هدر-رایزر:

Hendrie [۴۰] صفحات تخت PV/T هدر-رایزر را مدل‌سازی نمود. بازده‌های حرارتی در حالت بدون تولید برق برای سیال عامل آب و هوا به ترتیب برابر ۴۵,۲٪ و ۴۰,۴٪ و در حالت با تولید برق ۴۰,۰٪ و ۳۲,۹٪ گزارش شده است. بیشترین بازده الکتریکی حاصله نیز به ترتیب برابر ۶,۸٪ و ۶,۷٪ بوده است. در سال ۲۰۰۱ مطالعه‌ای با هدف مقایسه سیستم‌های PV/T یکپارچه (IPVT) هدر-رایزر با آبگرمکن‌های خورشیدی انجام شده است که این پنل پلی کریستال می‌تواند بازده تا ۶۰٪ بدست آورد و این مقدار بالاتر از یک آبگرمکن خورشیدی و سیستم PV مستقل است [۴۱]. Sodha و Tiwari [۹] یک مدل حرارتی بر اساس بالانس انرژی برای سیستم فوق توسعه دادند. شبیه‌سازی انجام شده یک بازده حرارتی روزانه حدود ۵۸٪ را پیش‌بینی می‌کند که در مقایسه با مقدار تجربی (۶۱,۳٪) قابل قبول است.

در سال ۲۰۰۷، یک سیستم PV/T با کانال‌های مستطیلی با ارایش هدر-رایزر به کمک روابط ریاضی مدل شد. اثر دو پارامتر ضریب عبوردهی پوشش شیشه‌ای و ضریب فشردگی^{۲۱} بررسی شده است. با افزایش ضریب عبوردهی پوشش شیشه‌ای بازده حرارتی الکتریکی افزایش می‌یابد. با افزایش ضریب فشردگی، مساحت پوشانده شده توسط سلول‌ها افزایش می‌یابد. سیستم آب گرم PV/T با گردش طبیعی طراحی شده و آزمایشات با دماهای ورودی متفاوت انجام شد. بازده الکتریکی روزانه حدود ۱۰,۱۵٪ بود، بازده حرارتی روزانه حدود ۴۵٪ و بازده کل روزانه بیش از ۵۲٪ بوده است [۴۲]. همچنین Boubekri و همکارانش [۴۳] در سال ۲۰۰۹ مدلی عددی برای بررسی عملکرد سیستم PV/T هدر-رایزر در نظر گرفتند. نتایج نشان می‌دهد افزایش زاویه قرارگیری ماژول PV/T باعث کاهش بازده الکتریکی می‌گردد و افزایش دبی جرمی موجب کاهش دمای پنل فتوولتاییک و در نتیجه افزایش بازدهی آن می‌شود. دو مدل از انواع سیستم‌های PV/T آب‌خنک به روش تجربی و تئوری توسط Dubey [۴۴] مورد بررسی

²¹ Packing

قرار گرفت. نوع اول شامل لوله‌های هدر-رایزر دایروی و پنل مونوکریستال و نوع دوم دارای پنل مولتی کریستال با کانال‌های مستطیلی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که نوع اول دارای بازده حرارتی ۴۰,۷ درصد و بازده الکتریکی ۱۱,۸ درصد است و نوع دوم دارای بازده حرارتی و الکتریکی به ترتیب ۳۹,۴ و ۱۱,۵ درصد می‌باشد. جواد یزدان پناهی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ [45] به مدل سازی یک مجموعه کلکتور PV/T آب‌خنک در حالت گذرا و یک‌بعدی پرداختند. این مدل با مدل Tiwari [۲۶] مقایسه شده است. مقدار نرخ بهینه دبی جرمی برای بیشینه بازده اگزرژی ۱۳,۹٪ برابر 0.002 kg/s است.

۲-۲-۲ مطالعات ساختار مارپیچ

روش مهم دیگر مورد استفاده در پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک آرایش مارپیچ است. یکی از مدل‌سازی‌های اولیه برای آرایش مارپیچ مدل Abdel-Khalik [۳۰] در سال ۱۹۷۶ است که برای کلکتور گرمایشی لوله ورق انجام داده است و لوله مارپیچ به صفحه جاذب متصل شده است. او ابتدا معادلات توزیع دمای سیال در بخش‌های مختلف مارپیچ به صورت المان به المان را به دست آورد. سپس این معادلات برای تعیین ضریب حذف گرما (FR^{22}) برای کلکتور استفاده می‌شود. این ضریب به گروه‌های بی‌بعد که شامل متغیرهای مختلف عملیاتی و طراحی کلکتور هستند وابسته است. نمودار تعمیم‌یافته، FR را برای هندسه دلخواه و تعداد خم‌های مختلف ارائه شده است. این مدل در سال‌های بعد نیز در سیستم‌های PV/T مورد استفاده قرار گرفته است.

Zondag و همکارانش [۲۵] مدل‌های مختلف حالت پایدار و دینامیکی را بررسی کردند که شامل یک مدل سه بعدی دینامیکی و سه مدل حالت پایدار یک، دو و سه بعدی بوده است. مقایسه نتایج به دست آمده با داده‌های تجربی نشان می‌دهد که مدل یک‌بعدی پایا هم به خوبی مدل سه‌بعدی دینامیکی می‌تواند برای ارزیابی عملکرد روزانه PV/T به کار رود. همچنین آنها برای بدست آوردن یک تصویر

²² Heat removal Factor

واضح تر بر روی عملکرد ترکیبی سیستم PV/T، نه طرح مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند که مختصری از نتایج آنها در جدول (۱-۲) نشان داده شده است. بازده حرارتی کلکتور بدون پوشش ۵۲٪ و بازده حرارتی با یک پوشش ۵۸٪ است، بهترین عملکرد سالانه حرارتی توسط طراحی کانال بالای PV، طراحی دو پوشش لوله و ورق بود با این حال، عملکرد الکتریکی این سه سیستم به دلیل لایه‌های اضافی شیشه و آب بالای PV، تا حدی پایین است. با توجه به این امر، به نظر می‌رسد که کانال زیر PV (که شامل شیشه، EVA، سلول فتوولتاییک، EVA، و شیشه) به نظر بهترین گزینه از دیدگاه کارایی است، در حالی که طراحی یک پوشش لوله ورق جایگزین خوبی است، زیرا کارایی آن تنها ۲٪ کمتر است. از آنجایی که طراحی دومی به منظور ساخت بسیار ساده است، امیدوارکننده ترین طرح مورد بررسی برای تولید آب گرم خانگی است [۴۶].

جدول ۱-۲: بازده‌ها در طرح‌های مختلف PV/T [۴۶].

سیستم	بازده حرارتی سالانه (%)	بازده الکتریکی سالانه (%)
PV	-	۷/۲
Sheet and tube PVT-collector uncovered	۲۴	۷/۶
Sheet and tube PVT-collector 1 cover	۳۵	۶/۶
Sheet and tube PVT-collector 2 cover	۳۸	۵/۸
PVT- collector with channel above PV	۳۸	۶/۱
PVT- collector with channel below opaque PV	۳۵	۶/۷
PVT- collector with channel below transparent PV	۳۷	۶/۵
Free flow PVT-collector	۳۴	۶/۳
Two-absorber PVT-collector (insulated type)	۳۹	۶/۱
Two-absorber PVT-collector (non-insulated type)	۳۷	۶/۱
Thermal collector	۵۱	-

در پژوهشی دیگر عملکرد سه نوع کلکتورهای PV/T شامل طرح جریان موازی، جریان مارپیچ و حلزونی شبیه‌سازی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده طرح حلزونی بازده بالاتری دارد. همچنین کم بودن فاصله بین لوله‌ها و دمای آب ورودی به سیستم و نیز افزایش دمای محیط منجر به افزایش بازده PV/T می‌گردد [۴۷]. Ibrahim و همکارانش [۱۸] هفت ساختار مختلف کلکتورهای PV/T را شبیه‌سازی

نمودند. نتایج حاکی از آن است که بهترین ساختار، طرح جریان حلزونی می‌باشد که در آن بازدهی حرارتی ۵۰,۱٪ و بازدهی سلول برابر با ۱۲٪ بوده است. در سال ۲۰۱۰ مطالعه‌ای توسط Santbergen [48] انجام گرفت که به کمک روش عددی بازده حرارتی PV/T مارپیچ نسبت به کلکتورهای حرارتی معمول ۱۹ درصد کمتر است. دو مدل PV/T هدر-رایزر و مارپیچ توسط Charalambos [۴۹] با نرم‌افزار EES بهینه‌سازی و مقایسه گردید. در این پژوهش، پارامترهای قطر داخلی لوله، فاصله بین لوله‌ها، ضخامت صفحه جاذب بررسی گردیده است و مقادیر بهینه برای پارامترهای مذکور در هر مدل ارائه شده است. پارامترهای قطر لوله، فاصله بین لوله‌ها و دبی جرمی بهینه برای مدل هدر-رایزر به ترتیب، ۶۲,۱,۶۵ میلی‌متر و ۰,۰۱۸ kg/s و برای مدل مارپیچ، ۴,۸۳, ۶۵ میلی‌متر و ۰,۰۱۱ kg/s گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل مارپیچ با تولید برق ۷٪ بازده حرارتی کمتری نسبت به حالت بدون تولید برق است و همچنین مدل مارپیچ ۴٪ بازده حرارتی بالاتری نسبت به هدر رایزر در دو حالت با و بدون تولید برق دارد. در سال ۲۰۱۳ یک سیستم PV/T با لوله مسی مارپیچ با کانال‌هایی جدا برای هر دو سیال آب و هوا طراحی و مورد بررسی قرار گرفت. بازده کلی این سیستم زمانی که هر دو سیال بطور همزمان عمل می‌کنند تا ۷۶٪ پیش‌بینی شده است [۵۰]. Rosli و همکارانش [۵۱] به تحلیل پارامتری PV/T مارپیچ برای بررسی تاثیر قطر لوله و تعداد لوله‌ها بر ضریب برداشت گرما پرداختند. با توجه به نتایج به دست آمده لوله‌های با مقطع مستطیلی ضریب برداشت گرمای بالاتری نسبت به مقطع دایره‌ای و مربعی دارند. همچنین قطر کوچکتر و تعداد بیشتر لوله‌ها منجر به ضریب برداشت گرمای بالاتری می‌شود. در سال ۲۰۱۶ یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی سیستم PV/T در نرم‌افزار Transys برای سه مکان مختلف اروپا (Milan-Paris-Athene) توسعه داده شد. نتایج نشان داده است که بازده کل سالانه ماژول PV/T در پاریس برابر ۳۲,۷٪ در میلان ۳۶,۱٪ در آتن ۴۰,۶٪ است. بازده الکتریکی در پاریس ۱۳,۷٪ در میلان ۱۳,۶٪ و در آتن ۱۳,۴٪ است [۵۲]. Lari و همکارش [۵۳] طراحی یک سیستم بهینه PV/T انجام دادند که با نانوسیال خنک می‌شود. بازده الکتریکی ۸,۵٪ آب‌خنک با خنک‌کاری توسط نانوسیال به ۱۳٪ رسید. علاوه بر این، هزینه انرژی از سیستم پیشنهادی

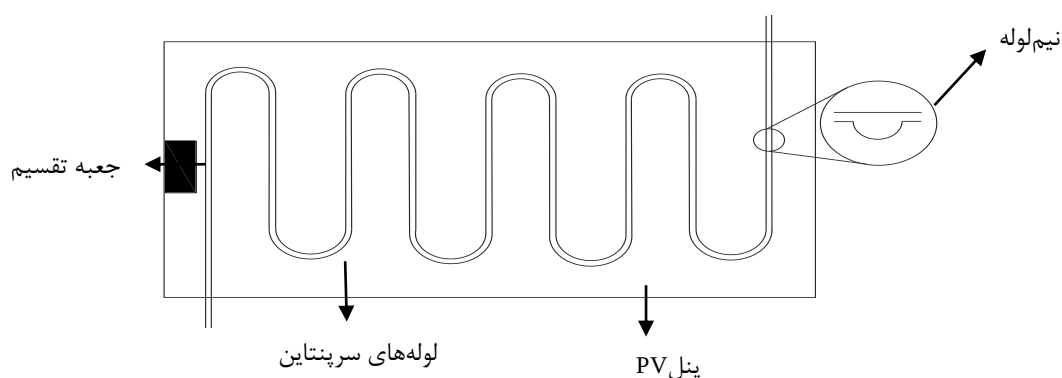
۸۲٪ کمتر از قیمت داخلی برق در عربستان سعودی است. در سال ۲۰۱۷ مقایسه بین کلکتورهای آب‌خنک دارای پوشش و بدون پوشش با جاذب‌های roll-bond آلومینیومی با کانال‌های متفاوت انجام شد. نتایج حاکی از بالا بودن بازده حرارتی و پایین بودن بازده الکتریکی کلکتور با پوشش نسبت به کلکتور بدون پوشش است. بازده حرارتی با پوشش ۲۹,۴٪ بدون پوشش و بدون پوشش ۲۴٪ و بازده کلی برای دارای پوشش و بدون پوشش به ترتیب برابر ۳۵٪ و ۳۶٪ است [۵۴]. Zanlorenzi و همکارانش [۵۵] برای بهبود بازده یک ماژول PV/T مارپیچ از یک سیستم خنک‌کننده آب به صورت اتوماتیک استفاده کردند و حداکثر بازده حرارتی آن ۲۳,۵ درصد و بازده کلی آن حدود ۳۳,۲۸٪ شد. در سال ۲۰۱۸ تحقیق آزمایشگاهی بر روی سیستم PV/T مارپیچ انجام شد که توسط اواپراتور یک سیکل تبرید با مبرد R134a خنک می‌شد. متوسط بازده فتوولتاییک در طول دوره آزمون تقریباً ۹٪ است [۵۶].

Bhattacharjee و همکارانش [۵۷] عملکرد کلکتور PV/T با طرح‌های مختلف جاذب به صورت حلقوی و مارپیچ را به طور عملی ارزیابی نمودند. بهترین عملکرد در طول آزمایش با لوله مسی نازک حلقوی به دست آمد. ماکزیمم توان پنل از ۲۲,۶ به ۲۶,۴ وات افزایش یافت.

حسینزاده و همکارانش [۵۸] اثرات استفاده از نانوسیال ZnO/water به عنوان سیال کاری بر عملکرد یک سیستم PV/T مارپیچ به صورت عددی بررسی کردند. افزایش نسبی بازده حرارتی برای درصد وزنی‌های متفاوت نانوسیال ZnO/water در مقایسه با آب خالص ۲٪-۱۳٪ قابل مشاهده بود. یک تحقیق تجربی در سال ۲۰۱۸ در مورد اثرات استفاده از اکسیدهای فلزی/نانوسیال آب (ZnO و Al₂O₃.TiO₂) به عنوان سیستم خنک‌کننده در یک سیستم PV/T بر روی انرژی و اکسرژی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد سیستم PVT/Al₂O₃ بالاترین افزایش تولید آنتروپی (بازده حدود ۱۸,۳٪) در مقایسه با واحد PV را دارد [۵۹].

۲-۳ معرفی کار حاضر

در مطالعات گذشته به طور عمده از ساختار لوله‌ای کامل برای خنک‌کاری استفاده شده است اما در مطالعه حاضر سطح مقطع نیم‌لوله مستقیماً به سلول‌هایی که بر روی یک صفحه فلزی قرار دارند متصل می‌شود. تغییر سطح مقطع متداول به صورت نیم‌لوله و ارتباط مستقیم سیال با صفحه جاذب منجر به حذف چند مقاومت حرارتی و افزایش بازده شده است. در این پژوهش ارزیابی یک سیستم ترکیبی فتوولتائیک حرارتی (PV/T) آب‌خنک با لوله مارپیچ مطابق شکل (۱-۲) مدنظر می‌باشد. ساختار دقیق کلکتور PV/T موردنظر بر اساس طرح جدید ساخته شده در آزمایشگاه انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود انتخاب شده است. در این طرح سلول‌ها به طور مستقیم بر روی صفحه فلزی از جنس آلومینیوم نصب شده‌اند.



شکل ۱-۲: شمایی از اتصال لوله سرپانتین به PV

۲-۴ نوآوری:

با توجه به موارد ذکر شده، اغلب پژوهش‌ها از سطح مقطع‌های متعارف (کانال‌های مستطیلی و دایره‌ای و...) استفاده شده است. در این پژوهش طرح جدید آزمایشگاهی با نصب مستقیم سلول‌ها بر روی جاذب فلزی یک مقاومت اصلی (مربوط به دلتا) حذف گردیده است. از سوی دیگر با انتخاب کانال نیم‌دایره‌ای و تماس مستقیم سیال روی جاذب دو مقاومت دیگر نیز حذف گردیده است که ساختاری با بازدهی بالا به دست آمده است. هدف از انجام این پروژه بررسی و مدل‌سازی و بهینه‌سازی این سیستم آزمایشگاهی PV/T آب‌خنک با آرایش مارپیچ و اعتبارسنجی مدل با داده‌های تجربی است.

فصل ۳ : معرفی و مدل سازی سیستم

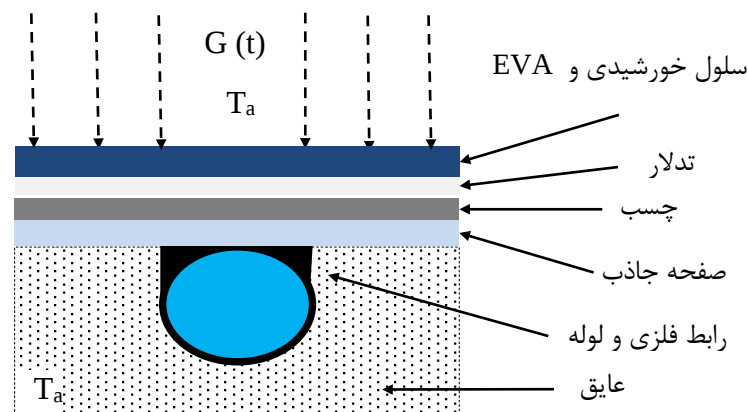
۳-۱ مقدمه :

در این فصل تشریح سیستم، و روابط و معادلات حاکم بر سیستم مورد نظر ارائه شده است. در ابتدا تفاوت‌های مدل طراحی شده با سیستم‌های متداول بیان شده است. سپس به جزییات پنل و تجهیزات استفاده شده در این پژوهش اشاره می‌شود. و پس از آن نحوه مدل‌سازی سیستم و معادلات حاکم بر آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲ تشریح سیستم

۳-۲-۱ سیستم PV/T متداول :

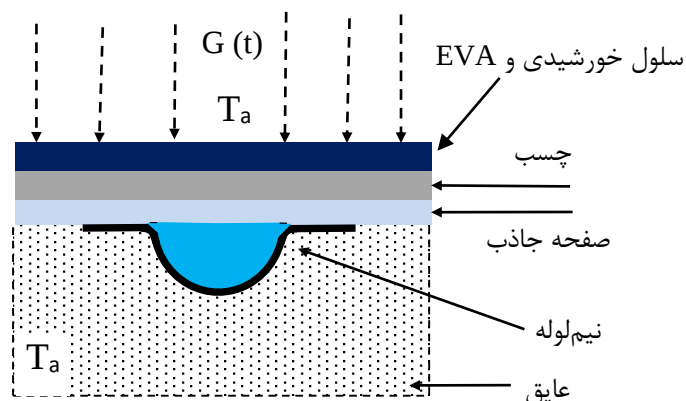
در سیستم فتوولتائیک حرارتی آب‌خنک متداول، به طور معمول لایه‌بندی بخش‌های مختلف سیستم مطابق شکل (۳-۱) می‌باشد. این لایه‌بندی از سطح بالایی پنل به ترتیب شامل: شیشه، EVA، سلول‌های خورشیدی، EVA، تدلار، چسب، صفحه جاذب، رابط فلزی و لوله و عایق است.



شکل ۳-۱: شمایی از مقطع سیستم PV/T روی یک مجرای جریان [60]

۳-۲-۲ سیستم PV/T با طراحی جدید :

در طرح جدید ارائه شده در این مطالعه سعی شده است یک سیستم PV/T به صورت مارپیچ و نیم‌لوله در نظر گرفته شود. بر این اساس مطابق شکل ۳-۲ سلول‌های خورشیدی بر روی یک صفحه فلزی قرار گرفته است. برای جلوگیری از اتصال کوتاه سطح این صفحه پوشش‌دهی شده است. نیم‌لوله با استفاده از چسب‌های مخصوص به صفحه جاذب متصل شده است.



شکل ۳-۲: شمایی از مقطع سیستم PV/T با طراحی جدید روی یک مجرای جریان

۳-۲-۳ معرفی سیستم آزمایشگاهی:

بر اساس طرح فوق نیم لوله ای پایه دار به شکل مارپیچ ساخته شد و مطابق شکل (۳-۳) در پشت یک پنل مونوکریستال نصب گردیده است. طراحی به گونه ای انجام شده است که پشت هر ردیف سلول خورشیدی یک ردیف نیم لوله نیز وجود داشته باشد تا خنک کاری به بهترین نحوه انجام شود. مشخصات پنل فتوولتائیک در جدول (۱-۳) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳: نمایی از اتصال لوله مارپیچ به صفحه جاذب

جدول ۱-۳: مشخصات پنل در مطالعه حاضر

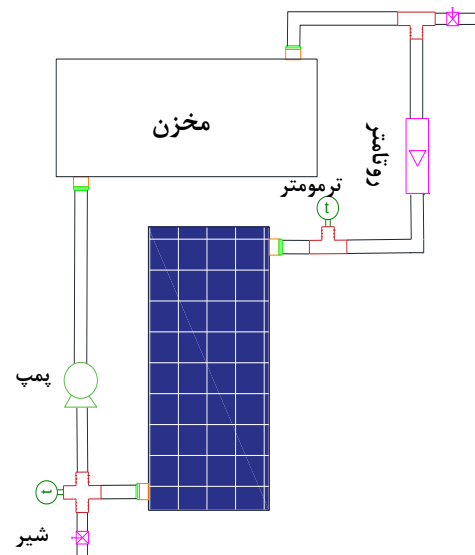
ولتاژ مدار باز	جریان اتصال کوتاه	توان ماکزیمم	ولتاژ ماکزیمم	جریان ماکزیمم	FF ^{۲۳}	بازده الکتریکی
۲۲.۲ V	۵.۵ A	۹۰ W	۱۸.۲ V	۵.۰۹ A	۷۷%	۱۲.۵ %

²³ Fill Factor

پنل فوق مطابق شکل ۳-۴ به یک مخزن متصل شده و امکان ورود مستقیم آب شهری نیز دیده شده است. با نصب تجهیزات اندازه گیری شامل دما سنج و روتامتر، دما و دبی جریان اندازه گیری می شود. با استفاده از دستگاه سولار پاور آنالایزر نیز اطلاعات جریان خروجی پنل و همچنین تابش خورشید اندازه گیری و ثبت می گردد. نقش مخزن تامین دماهای مختلف ورودی آب به پنل و همچنین ذخیره سازی آب ورودی در حالت اتصال به شبکه آب شهری می باشد. جریان آب گردشی از طریق یک پمپ آزمایشگاهی تامین می شود.



(a)



(b)

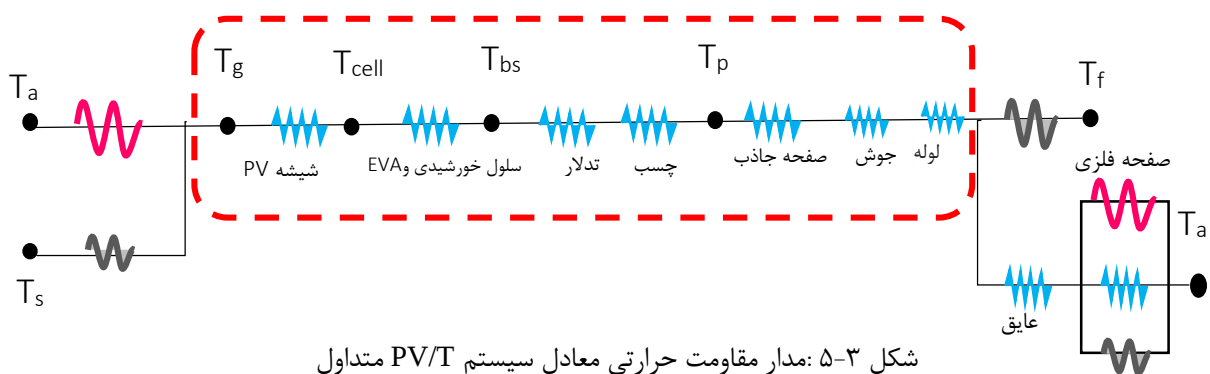
شکل ۳-۴: ستاپ آزمایشگاهی

در ستاپ آزمایشگاهی از دماسنج K Type با دقت ۰,۱ مجهز به نمایشگر دیجیتال در ورودی و خروجی پنل استفاده شده است. همچنین یک روتامتر با بازه ۰,۵-۴ لیتر بر دقیقه برای اندازه گیری دبی جریان در سیستم قرار گرفت. همچنین برای اندازه گیری و محاسبه مشخصات پنل خورشیدی شامل ولتاژ مدار باز V_{oc} , جریان اتصال کوتاه I_{sc} , منحنی $I - V$, تابش خورشید در محل، دمای پنل، محاسبه حداکثر توان پنل خورشیدی و حداکثر ولتاژ و جریان در ماکزیمم توان و در نهایت محاسبه بازدهی

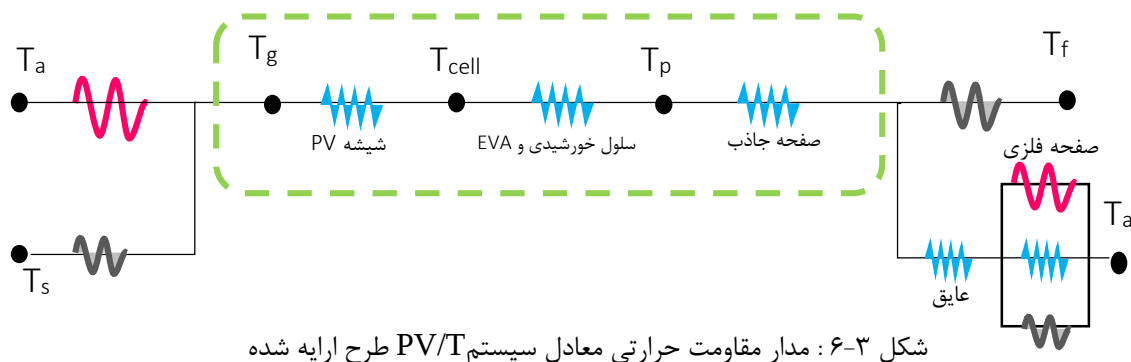
سلول خورشیدی از یک دستگاه آنالایزر سیستم‌های خورشیدی (Solar power Analyzer) مدل PROVA 1011 استفاده گردید.

۳-۳ معادلات حاکم بر سیستم PV/T :

با توجه به اینکه در این پژوهش مقایسه‌ای بین سیستم فتوولتائیک حرارتی با سطح مقطع نیم‌لوله و یک سیستم متداول انجام گرفته است به تفاوت‌های مدل‌سازی این دو مدل اشاره می‌شود. در شکل (۳-۵) مقاومت حرارتی لایه‌های مختلف برای یک سیستم متداول PV/T نشان داده شده است. سه نوع مکانیزم انتقال حرارت رسانش، جابجایی و تابش در شکل برای نقاط مختلف دیده می‌شود. با توجه به توضیحات داده شده در طرح جدید مطابق شکل (۳-۶) مقاومت‌های حرارتی مربوط به تدلار، چسب (اتصال بین تدلار و صفحه جاذب)، رابط فلزی و جداره لوله حذف شده است. بدین ترتیب انتظار می‌رود بهبود قابل ملاحظه‌ای در فرآیند انتقال حرارت از سلول‌ها به سیال رخ دهد.



شکل ۳-۵: مدار مقاومت حرارتی معادل سیستم PV/T متداول



شکل ۳-۶: مدار مقاومت حرارتی معادل سیستم PV/T طرح ارایه شده

۳-۳-۱ معادلات حاکم بر سیستم PV/T متداول:

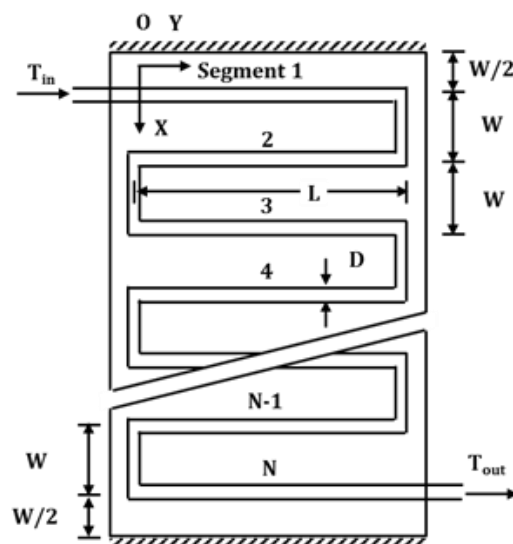
معادلات ریاضی بیان شده در مراجع [۹،۳۰،۶۰،۶۱،۶۲] برای مدل سازی سیستم PV/T آب‌خنک صفحه-لوله استفاده شده است. معادلات ریاضی حاکم به این ترتیب به دست می‌آیند که به روش مقاومت‌بندی گرمایی، تراز انرژی برای لایه‌های مختلف PV/T ارایه می‌شود. به منظور ایجاد تراز انرژی برای اجزای مختلف سیستم، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است [۶۱،۹]:

- تمام فرایندها در حالت جریان-دائم فرض می‌شود؛
- جریان سیال در مجاری جریان، توسعه‌یافته و یکنواخت می‌باشد؛
- دمای متوسط در هر لایه در نظر گرفته شده است؛
- دمای محیط اطراف در مجاورت قسمت تحتانی و فوقانی و جوانب ماژول PV/T یکسان است و اتلاف گرما از قسمت‌های فوقانی و تحتانی و جوانب ماژول PV/T به محیط با دمای یکسان انجام می‌گیرد.

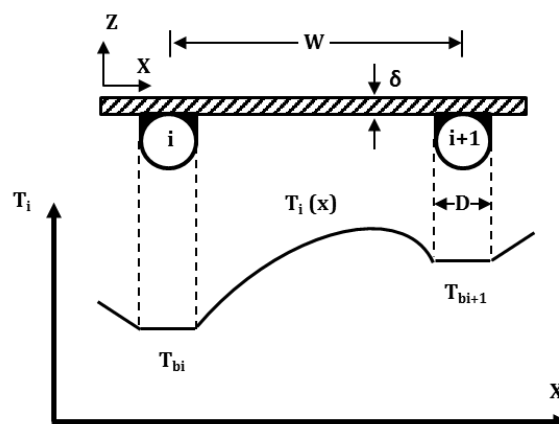
در مدل‌های ریاضی ارایه شده در منابعی که معادلات با توجه به آنها نوشته شده است، مدل در نظر گرفته شده، مدل هدر-رایزر است. در مدل هدر-رایزر توزیع دما در تمامی لوله‌ها یکسان و جریان سیال عبوری از هدر در N لوله رایزر تقسیم می‌گردد. در حالی که در مدل مارپیچ جریان سیال عبوری از هر لوله وارد لوله بعدی می‌گردد و به این ترتیب توزیع دما از لوله‌ای به لوله بعدی تغییر می‌کند که این مورد در شکل‌های ۳-۷ و ۳-۸ نمایان است. برای مدل کردن این بخش از PV/T از مدل عددی ارایه شده توسط خالیک استفاده شده است [۳۸]. خالیک با نوشتن معادله انرژی برای المانی از هر لوله و با استفاده از روش عددی، حرارت مفید دریافتی در کلکتور با لوله‌های مارپیچ را محاسبه نموده است.

سیستم PV/T در نظر گرفته شده متشکل از پنل خورشیدی کریستالی است که توسط چسبی با قابلیت هدایت بالا به صفحه جاذب آلومینیومی متصل شده است. لایه رویی آن پوششی شیشه‌ای است که با فاصله ۲ سانتیمتر از سطح پنل قرار دارد تا تلفات حرارتی سیستم را کاهش دهد. کلکتور

PV/T دارای صفحه جاذب آلومینیومی و لوله‌های مسی است. این کلکتور در مدل در نظر گرفته شده دارای N قسمت است. فاصله بین لوله‌ها W ، قطر خارجی لوله‌ها D_o ، قطر داخلی D_i و طول لوله در هر قسمت L است. دمای آب خروجی از هر قسمت به عنوان دمای آب ورودی قسمت بعدی در نظر گرفته می‌شود. در معادلات نوشته شده فرض بر این است که دمای صفحه جاذب در محل اتصال به لوله در راستای طول لوله یکنواخت و برابر با T_{bi} می‌باشد و از گرادیان دما برای صفحه جاذب در راستای طول لوله صرف نظر شده است. در این معادلات صفحه جاذب متصل به لوله به شکل مسئله پره در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مدل ارائه شده در منابع، معادلات تراز انرژی برای هر لایه از PV/T در ادامه بیان شده است.



شکل ۳-۷: شمایی از صفحه جاذب و لوله PV/T ماریچ [۳۸].



شکل ۳-۸: توزیع دمای صفحه جاذب بین لوله‌های i و $i+1$ [۳۸].

در مدل با پوشش شیشه‌ای، معادله تراز انرژی برای لایه پوشش شیشه‌ای، ماژول PV شیشه-تدلاز و برای سطح زیرین تدلاز به ترتیب در معادلات (۱-۳)، (۲-۳) و (۳-۳) ارایه شده است که $\tau_G \alpha_g G(t)$ میزان تابش رسیده شده به شیشه و h ضریب انتقال حرارت و U تلفات حرارتی و T دمای لایه های مختلف، β ضریب پکینگ^{۲۴} سلول می‌باشد .

$$\tau_G \alpha_g G(t) bdx = [(h_{conv,t} + h_{r,gs})(T_g - T_a)] bdx \quad ۱-۳$$

$$\begin{aligned} (\tau_G)^2 [\alpha_c \beta_c G(t) + (1 - \beta_c) \alpha_T G(t)] bd \\ = [U_t(T_{cell} - T_{amb}) + U_T(T_{cell} - T_{bs})] bdx \\ + \eta_{el} G(t) \beta_c bdx \end{aligned} \quad ۲-۳$$

$$U_T(T_{cell} - T_{bs}) bdx = h_T(T_{bs} - T_f) bdx \quad ۳-۳$$

با استفاده از روابط (۱-۳) و (۲-۳)، معادلاتی برای دماهای T_{bs} و T_{cell} به دست می‌آید که با جای‌گذاری آنها در معادله (۱-۳)، معادله (۴-۳) حاصل می‌شود و h_p به عنوان ضریب پناستی^{۲۵} که روش محاسبه آن در ادامه ذکر شده، بیان می‌شود.

$$h_T(T_{bs} - T_f) = U_T(T_{cell} - T_{bs}) = h_{p1} h_{p2} (\tau \alpha)_{eff} G(t) - U_{tw}(T_f - T_{amb}) \quad ۴-۳$$

به منظور محاسبه تراز انرژی برای صفحه جاذب، از روابط ارایه شده در منبع [۳۸] استفاده شده است. میزان جریان حرارت برای لوله ی نام با طول واحد با استفاده از معادلات (۵-۳) تا (۹-۳) و به روش تفاضل محدود به دست می‌آید.

$$q_i^+ = \kappa[\theta_{i-1} - \theta_i \cosh m] \quad (2 \leq i \leq N) \quad ۵-۳$$

$$q_i^- = \kappa[\theta_{i+1} - \theta_i \cosh m] \quad (1 \leq i \leq N - 1) \quad ۶-۳$$

$$q_1^+ = \kappa \theta_1 [1 - \cosh m] \quad ۷-۳$$

$$q_N^- = \kappa \theta_N [1 - \cosh m] \quad ۸-۳$$

$$q_i = q_i^- + q_i^+ \quad ۹-۳$$

^{۲۴} packing factor

^{۲۵} penalty factor

در معادلات مذکور:

$$\theta_i = T_{bi} - T_{amb} - (S_{abs}/U_L) \quad 10-3$$

در معادله (۱۰-۳) T_{bi} دمای پایه بالای هر لوله است و S_{abs} نرخ حرارت به ازای واحد سطح می باشد که به صفحه جاذب می رسد. انرژی مفید به دست آمده توسط سیال در لوله $\dot{m}$ به طول واحد از رابطه (۱۱-۳) محاسبه می شود، از طرفی انرژی حرارتی مفید که از جاذب به سیال منتقل می شود، از رابطه (۱۲-۳) به دست می آید.

$$q_{ui} = q_i - D_o U_L \theta_i \quad 11-3$$

$$q_{ui} = (T_{bi} - T_{fi})/R \quad 12-3$$

عبارت $-D_o U_L \theta_i$ انرژی جمع آوری شدن در سطح بالایی لوله $\dot{m}$ به طول واحد است. با جای گذاری معادله (۱۳-۳) در معادله (۹-۳) و جای گذاری معادله حاصله در معادله (۱۱-۳)، معادله ای ماتریسی (۱۴-۳) به دست می آید.

$$\theta_i = \theta_{fi} + R q_{ui} \quad 13-3$$

$$q_u = \kappa[\delta - \kappa R \Gamma]^{-1} \Gamma \theta_f \quad 14-3$$

که در رابطه ۱۵-۳ :

$$\Gamma_{ij} = (\gamma + \delta_{i1} + \delta_{iN})\delta_{ij} + \delta_{ij+1} + \delta_{ij-1} \quad 15-3$$

به منظور محاسبه تراز انرژی برای سیال عامل، در مجرای جریان دمای سیال در لوله $\dot{m}$ ، T_{fi} از معادله دیفرانسیل (۱۶-۳) به دست می آید.

$$\dot{m} C_{pw} \frac{dT_{fi}}{dy} + (-1)^i q_{ui} = 0 \quad 16-3$$

با جای گذاری معادله (۱۴-۳) در معادله (۱۶-۳) معادله دیفرانسیل ماتریسی به دست می آید. با حل این معادله با توجه به شرایط مرزی اشاره شده در روابط (۱۷-۳) تا (۲۰-۳) می توان توزیع دما در هر لوله را به دست آورد.

$$\frac{d\Phi}{d\eta} + \frac{\kappa L}{\dot{m}c_p} \epsilon [\delta - \kappa R \Gamma]^{-1} \Gamma \Phi = 0 \quad ۱۷-۳$$

$$at \eta = 0 \quad \Phi_1 = 1 \quad ۱۸-۳$$

$$at \eta = 0 \quad \Phi_{i+1} = \alpha \Phi_i \quad (i = even) \quad ۱۹-۳$$

$$at \eta = 1 \quad \Phi_{i+1} = \alpha \Phi_i \quad (i = odd) \quad ۲۰-۳$$

که در روابط مذکور:

$$\Phi = [1/\theta_{fi}]_{\eta=0} \theta_f \quad ۲۱-۳$$

$$\eta = y/L \quad ۲۲-۳$$

$$\epsilon_{ij} = (-1)^i \delta_{ij} \quad ۲۳-۳$$

$$\alpha = \exp\left[-\frac{D_o U_L W}{\dot{m}c_p(1 + RD U_L)}\right] \quad ۲۴-۳$$

با استفاده از معادلات ذکر شده، نرخ حرارت مفید جذب شده مورد استفاده با رابطه (۲۵-۳) به دست می‌آید. این رابطه مشابه رابطه‌های والایر بلیس برای محاسبه کلکتورهای خورشیدی است.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_u &= \dot{m}C_{pw}(T_{f,out} - T_{f,in}) \\ &= F_R A_c [h_{p1} h_{p2} (\tau\alpha)_{eff} G(t) - U_L (T_{f,in} - T_{amb})] \end{aligned} \quad ۲۵-۳$$

جمله F_R ضریب برداشت گرما نامیده می‌شود که پارامتری مهم در طراحی است. این پارامتر با استفاده از معادلات قبلی با رابطه (۲۶-۳) محاسبه می‌شود. پارامترهای استفاده شده در معادلات بالا در روابط (۲۷-۳) تا (۳۴-۳) بیان شده‌اند.

$$F_R/F_1 = B[1 - \exp[(F_2 - 1)/B]] \quad ۲۶-۳$$

$$F_1 = NKL/F_2 A_c U_L C \quad ۲۷-۳$$

$$B = \dot{m}C_{pw}/F_1 A_c U_L \quad ۲۸-۳$$

$$F_2 = 1/[\kappa R(1 + \gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R] \quad ۲۹-۳$$

$$R = (1/C_{bo}) + (1/\pi D_i h_f) + (\ln(D_o/D_i)/2\pi K_{tube}) \quad ۳۰-۳$$

$$C = [\kappa R(1 + \gamma) - 1]^2 - (\kappa R)^2 \quad ۳۱-۳$$

$$\kappa = K_{abs} L_{abs} m / (W - D_o) \sinh(m) \quad ۳۲-۳$$

$$m^2 = (W - D_o)^2 (U_L / K_{abs} L_{abs}) \quad 33-3$$

$$\gamma = -2 \cosh(m) - (U_L / K_{abs} L_{abs}) \quad 34-3$$

معادلات مربوط به ضرایب اپتیکی، انتقال حرارت و اتلاف حرارت قابل کاربرد در روابط (۳-۳۵) تا (۳-۳۷)

(۴۵) بیان شده است همچنین $(\tau\alpha)_{eff}$ ضریب انتقال- جذب موثر و V_w سرعت باد است.

$$(\tau\alpha)_{eff} = (\tau_G^2) [\alpha_{cell} \beta_c + (1 - \beta_c) \alpha_T - \eta_{cell} \beta_c] \quad 35-3$$

$$h_{conv,t} = 2.8 + 3V_w \quad 36-3$$

$$h_{r,gs} = \varepsilon_G \sigma (T_G^2 + T_s^2) (T_G + T_s) \quad 37-3$$

$$T_s = 0.0552 * T_{amb}^{1.5} \quad 38-3$$

$$U_T = \left[\frac{L_T}{K_T} + \frac{L_{si}}{K_{si}} + \frac{L_{adh}}{K_{adh}} \right]^{-1} \quad 39-3$$

U_{tT} در معادله ۳-۴۰ اتلاف حرارتی از سطح شیشه تا سیال است که در آن لایه‌های شیشه (انتقال

حرارت جابه‌جایی، هدایت)، سلول خورشیدی، تدلار و چسب در نظر گرفته شده است:

$$U_{tT} = \left[\frac{1}{U_T} + \frac{1}{U_t} \right]^{-1} \quad 40-3$$

اتلاف و انتقال حرارت از شیشه با پارامتر U_t نشان داده شده است که به فرم زیر می‌باشد:

$$U_t = \left[\frac{L_g}{K_g} + \frac{1}{h_{r,gs} + h_{conv,t}} \right]^{-1} \quad 41-3$$

$$U_{tw} = \left[\frac{1}{U_{tT}} + \frac{1}{h_T} \right]^{-1} \quad 42-3$$

$$h_{p1} = \frac{U_T}{U_T + U_t} \quad 43-3$$

$$h_{p2} = \frac{h_T}{U_{tT} + h_T} \quad 44-3$$

$$h_T = \left[\frac{L_P}{K_P} + \frac{1}{h_f} \right]^{-1} \quad 45-3$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی درون مجاری جریان با فرض جریان کاملاً توسعه یافته و با توجه به رژیم جریان و عدد ناسلت آن محاسبه می‌شود. عدد ناسلت برای محدوده اعداد رینولدز مختلف در مجاری جریان PV/T به صورت رابطه (۳-۴۶) و (۳-۴۷) تعریف می‌شود [۲، ۱۶، ۱۹].

$$Re_D \leq 2300 \quad Nu_D = 3.657 \quad ۳-۴۶$$

$$Re_D > 2300 \quad Nu_D = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.5} \quad ۳-۴۷$$

خواص سیال در دمای متوسط سیال محاسبه می‌شوند. در نهایت ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون مجرای جریان با استفاده از رابطه (۳-۴۸) محاسبه می‌شود. در این رابطه K قابلیت هدایت سیال می‌باشد.

$$h_f = Nu_D K / D_i \quad ۳-۴۸$$

عملکرد سیستم را می‌توان از جنبه‌های مختلف ترمودینامیکی، اقتصادی، محیط زیستی و ... مورد بررسی قرار داد. در این بخش عملکرد کلی سیستم بر اساس قانون اول ترمودینامیک مورد ارزیابی قرار گرفته است. در قانون اول ترمودینامیک رویکرد اصلی بررسی کمیت انرژی تولید شده است. بر اساس این قانون و با نوشتن تراز انرژی که در قسمت‌های قبل اشاره شده است، می‌توان پارامترهای عملکردی سیستم را محاسبه کرد. این پارامترها شامل بازده حرارتی، بازده الکتریکی و بازده کلی سیستم می‌گردد. بازده حرارتی برای تمامی مدل‌ها مبتنی بر رابطه (۳-۴۹)، به صورت نسبت نرخ حرارت مفید جذب شده توسط سیال عامل به نرخ انرژی تابش خورشیدی رسیده روی سطح PV/T تعریف می‌شود.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{A_c G(t)} = F_R \left[h_{p1} h_{p2} (\tau \alpha)_{eff} - \frac{U_L (T_{f,in} - T_{amb})}{G(t)} \right] \quad ۳-۴۹$$

بازده الکتریکی بر حسب دمای فتوولتاییک با استفاده از رابطه (۳-۵۰) محاسبه می‌شود [9، 30، 60، 63].

$$\eta_{el} = \eta_{el,ref} [1 - \beta (T_{cell} - T_{ref})] \quad ۳-۵۰$$

که در آن $\eta_{el,ref}$ بازده در دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد و برابر با ۰٫۱۲ گزارش شده است. β در این معادله ضریب دمایی بازده سلول خورشیدی است که به صورت تجربی محاسبه می‌شود و برای

سلول‌های کریستالی ۰,۰۰۴۵ گزارش شده است. ظهور پارامتر بازده الکتریکی η_{el} در معادله (۳-۵۰) و سایر معادلات مربوطه، تحلیل حرارتی PV/T را به تحلیل الکتریکی مازول فتوولتائیک وابسته می‌کند. بازده کلی سیستم از رابطه (۳-۵۱) محاسبه می‌شود.

$$\eta_{ov} = \eta_{th} + \eta_{el} \quad ۵۱-۳$$

۲-۳-۳ معادلات حاکم بر سیستم PV/T طرح جدید:

در این قسمت معادلات حاکم بر سیستم PV/T ارایه شده بیان شده و معادلات مشابه مدل متداول حذف و فقط به معادلات تغییر یافته اشاره شده است. به منظور محاسبه دمای شیشه، از بالانس انرژی بین شیشه با محیط و سلول خورشیدی استفاده شده است:

$$\begin{aligned} \tau_G \alpha_g G(t) b dx &= [(h_{conv,t} + h_{r,gs})(T_g - T_{amb})] b dx + \left[\left(\frac{t_g}{k_g} \right) (T_c - T_g) b dx \right] \quad ۵۲-۳ \\ T_g & \quad ۵۳-۳ \\ &= (\tau_G \alpha_g G(t) - \left(\frac{t_g}{k_g} \right) T_c + (h_{conv,t} + h_{r,gs}) T_{amb}) / ((h_{conv,t} + h_{r,gs}) - \left(\frac{t_g}{k_g} \right)) \end{aligned}$$

همانطور که در معادله (۳-۵۳) قابل مشاهده است برای یافتن دمای شیشه به دمای سلول نیاز است که در اینجا به بالانس انرژی در سلول خورشیدی اشاره شده است :

$$\begin{aligned} \tau_G [\alpha_c \beta_c G(t) + (1 - \beta_c) \alpha_T G(t)] b dx & \quad ۵۴-۳ \\ &= [U_t (T_c - T_{amb}) + U_c (T_c - T_p)] b dx + \eta_{el} G(t) \beta_c b dx \\ T_c &= (T_p U_c + (U_t T_{amb} + (\tau \alpha)_{eff} G(t))) / (U_c + U_t) \quad ۵۵-۳ \end{aligned}$$

برای پیدا کردن دمای صفحه جاذب T_p و نیاز محاسبه آن در فرمول (۳-۵۵) به بررسی بالانس انرژی در لایه جاذب پرداخته می‌شود:

$$\begin{aligned} U_c (T_c - T_p) b dx &= h_p (T_p - T_f) b dx = h_{p1} h_{p2} (\tau \alpha)_{eff} G(t) - U_p (T_f - T_{amb}) \quad ۵۶-۳ \\ T_p &= (U_p T_{amb} + h_{p1} h_{p2} (\tau \alpha)_{eff} G(t) - T_f (U_p - h_p)) / h_p \quad ۵۷-۳ \end{aligned}$$

در مدل متداول این جمله به صورت U_T آمده است که در مدل جدید مقاومت‌های مربوط به تدار و چسب حذف شده است و به صورت زیر تعریف شده است:

$$U_c = [t_{si}/K_{si}]^{-1} \quad 58-3$$

$$U_b = \left[\frac{t_i}{K_i} + \frac{1}{h_{r,gs} + h_{conv,t}} + \frac{t_{ip}}{K_{ip}} \right]^{-1} \quad 59-3$$

$$U_L = U_t + U_b \quad 60-3$$

ضریب اتلاف حرارتی از سلول تا سطح شیشه را با U_{tc} نشان داده شده است و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$U_{tc} = \left[\frac{1}{U_c} + \frac{1}{U_t} \right]^{-1} \quad 61-3$$

در مدل جدید h_p جایگزین h_T در فرمول ۴۵-۳ شده است و این ضریب در فرمول ۶۲-۳ برای محاسبه اتلاف حرارتی از صفحه جاذب تا سطح شیشه نیاز است

$$U_p = \left[\frac{1}{U_{tc}} + \frac{1}{h_p} \right]^{-1} \quad 62-3$$

$$U_{tT} = \left[\frac{1}{U_p} + \frac{1}{h_f} + \frac{1}{U_b} \right]^{-1} \quad 63-3$$

$$U_{pt} = \left[\frac{1}{U_c} + \frac{1}{U_t} + \frac{t_p}{K_p} \right]^{-1} \quad 64-3$$

۴-۳ روش حل و تحلیل نتایج

برای حل معادلات ریاضی ذکر شده توسط نرم‌افزار Matlab کدنویسی انجام پذیرفته و پارامترهای عملکردی سیستم محاسبه گردیده است. مبتنی بر الگوریتم برنامه رایانه‌ای، روند حل معادلات به این صورت می‌باشد که در ابتدا مقدار پارامترهای مستقل سیستم به برنامه داده می‌شود. این پارامترها شامل شرایط آب و هوایی، پارامترهای هندسی سیستم، پارامترهای ترموفیزیکی، پارامترهای اپتیکی و پارامترهای عملیاتی می‌شود. پس از دریافت مقادیر پارامترهای ذکر شده، دمای اولیه‌ای برای شیشه فرض می‌شود $T_{g,new} = T_g$. سپس دمای اجزای مختلف از جمله سلول فتوولتاییک، دمای آب خروجی

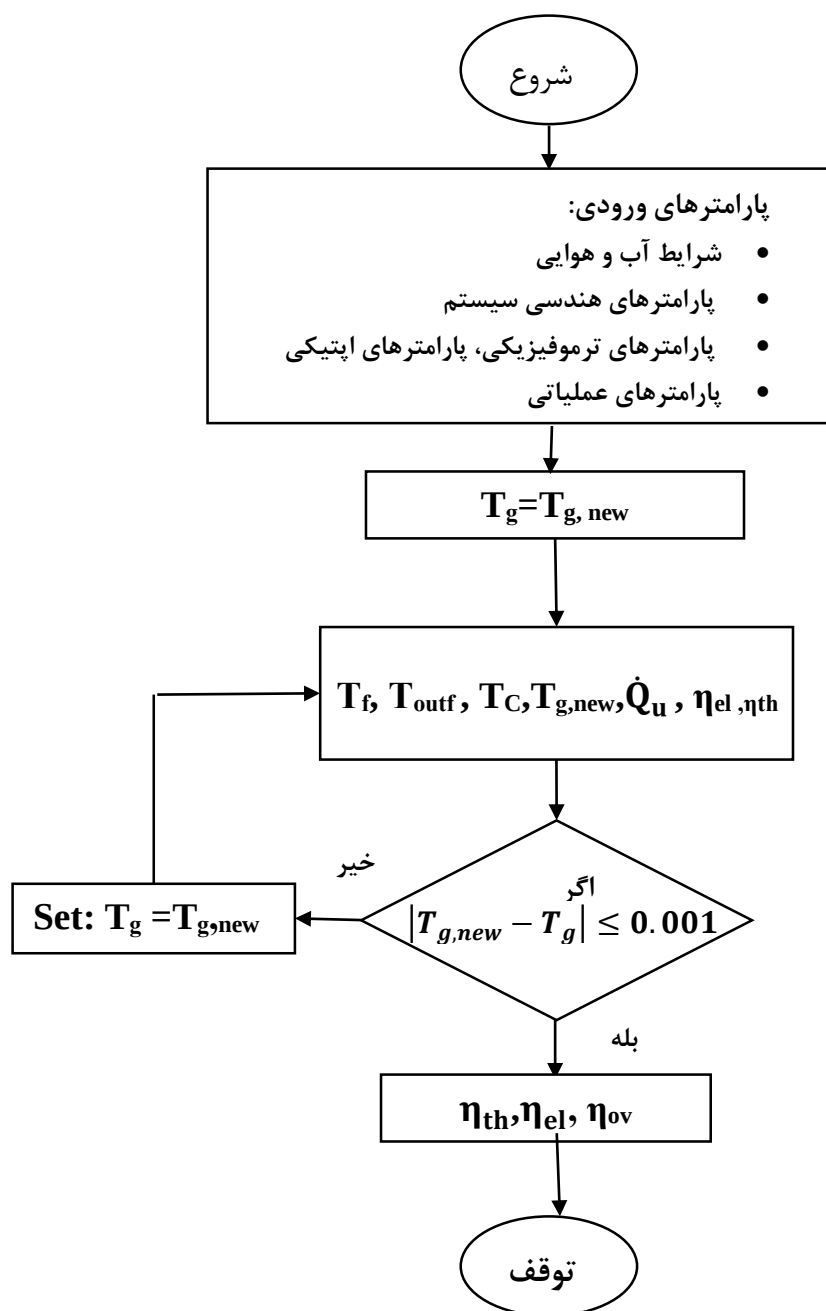
و مقدار متوسط دمای آب محاسبه گردد. سپس دمای شیشه مجدداً محاسبه شده و اختلاف آن با مقدار اولیه محاسبه می‌شود. این روند تکرار می‌شود تا تفاوت مقدار دمای شیشه در طی دو تکرار متوالی از یک مقدار کوچک از پیش تعریف شده کمتر گردد و تکرار متوقف شود. پس از این مرحله، پارامترهای عملکردی محاسبه می‌گردند. این پارامترها شامل حرارت مفید جذب شده، بازده حرارتی، بازده الکتریکی، بازده کلی در سیستم می‌شود. قبل از آنکه به تحلیل پارامتری PV/T پرداخته شود، لازم است از صحت محاسبات و برنامه شبیه‌ساز رایانه‌ای که بر اساس مدل انرژی (حرارتی و الکتریکی) ارایه شده در قسمت قبل نوشته شده است، اطمینان حاصل شود. برای بررسی و اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. در شکل ۳-۹ الگوریتم کد توسعه داده شده و نحوه محاسبات حرارتی و الکتریکی PV/T نشان داده شده است.

به منظور محاسبه خطای مقادیر پارامترهای مدل و مقادیر تجربی از مجذور مربعات متوسط خطا درصدی (RMS^{26}) هر پارامتر توسط رابطه (۳-۷۲) و از قدر مطلق میانگین خطاهای نسبی (Er %) در رابطه (۳-۷۳) قابل محاسبه است. در این معادله، n و X به ترتیب تعداد دفعات انجام آزمایش و مقدار پارامتر تجربی یا شبیه‌سازی می‌باشند.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum [100 \times (X_{sim,i} - X_{exp,i}) / X_{exp,i}]^2}{n}} \quad [9] \quad 68-3$$

$$Er \% = \frac{\sum [(X_{exp,i} - X_{sim,i}) / X_{exp,i}]}{n} \times 100 \quad [60] \quad 69-3$$

²⁶ Root Mean Square of Percentage Error (RMS)



شکل ۳-۹: الگوریتم نحوه انجام محاسبات حرارتی، الکتریکی سیستم PV/T

فصل ۴ : نتایج

۴-۱ مقدمه:

با توجه به مدل تهیه شده از سیستم، ابتدا به بررسی اثر خنک کاری پنل و مقایسه آن با حالت بدون خنک کاری پرداخته شده و به صورت تجربی به کمک دوربین حرارتی نتایج مشاهده شده است. سپس به اعتبارسنجی مدل با حالت تجربی پرداخته شده و نتایج آن آرایه گردیده است. در ادامه مقایسه‌ای بین مدل نیم‌لوله با مدل متداول لوله با سطح مقطع دایره‌ای گردیده و سپس به تحلیل پارامتری بعضی از متغیرها پرداخته شده است. در نهایت نیز بهینه سازی مدل بر اساس توابع هدف بازده الکتریکی و حرارتی انرژی و افت فشار انجام شده است.

۴-۲ بررسی تجربی اثر خنک کاری

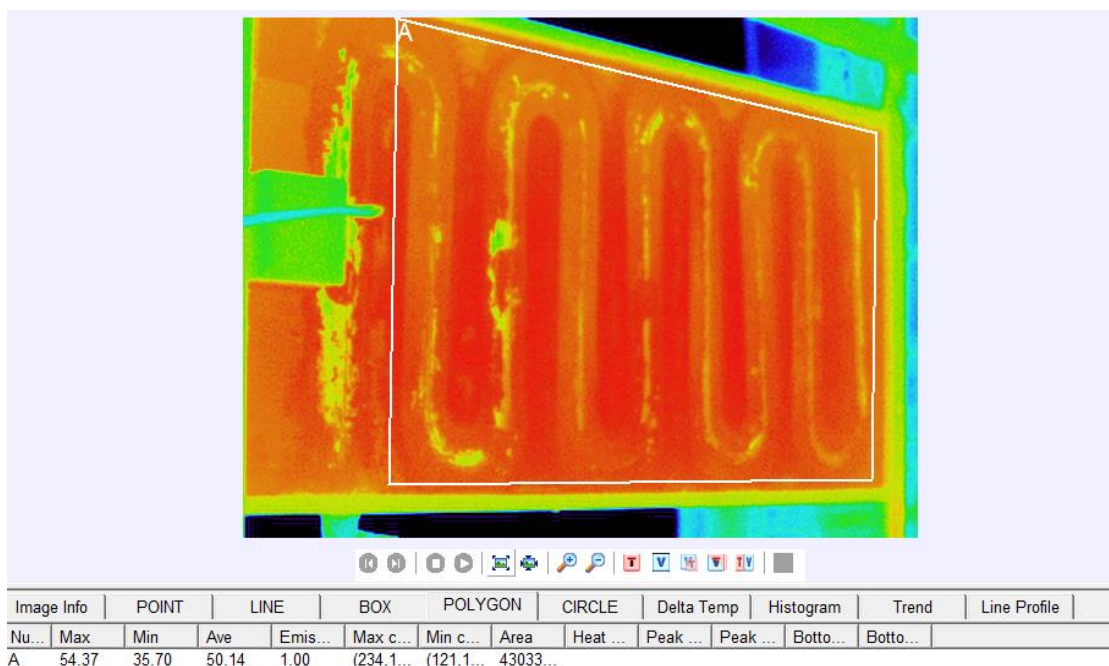
در شرایط عملیاتی و در دماهای معمول برای سلول‌های فتوولتاییک که تا ۷۰ درجه سانتیگراد نیز می‌رسد، بازده سلول‌ها کاهش می‌یابد بنابراین با کاهش دما می‌توان بازده را بهبود بخشید. همانطور که در فصل اول گفته شد به ازای کاهش یک درجه دما، افزایش ۰,۴-۰,۶۵ درصدی بازده ماژول فتوولتاییک گزارش شده است [۵]. با استفاده از این ترکیب، ضمن استفاده بهینه از فضای نصب، افزایش بازدهی ماژول فتوولتاییک محقق می‌شود.

سیستم PV/T با سیال خنک‌کننده آب به جهت کاربرد بیشتر آب گرم به ویژه برای مصارف آب گرم بهداشتی برای ساختمان‌های مسکونی و تجاری مورد توجه می‌باشد. دو نوع سطح مقطع دایره‌ای و غیر دایره‌ای برای سیستم‌های فتوولتاییک حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است وجه تمایز این مطالعه انتخاب متفاوت سطح مقطع جریان و ارتباط مستقیم جاذب با سیال است. در این پژوهش خنک کاری پنل با نیم‌لوله مارپیچ مدنظر می‌باشد.

داده های آزمایشگاهی در روزهای آفتابی اواخر تیرماه و اوایل شهریورماه سال ۱۳۹۶ در آزمایشگاه انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت و زاویه قرارگیری ۴۰ درجه رو به جنوب بوده است. لازم به

ذکر است که در طول آزمایش‌ها میزان تابش تقریباً ثابت است. سیستم در دو حالت با خنک‌کاری و بدون خنک‌کاری به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفت.

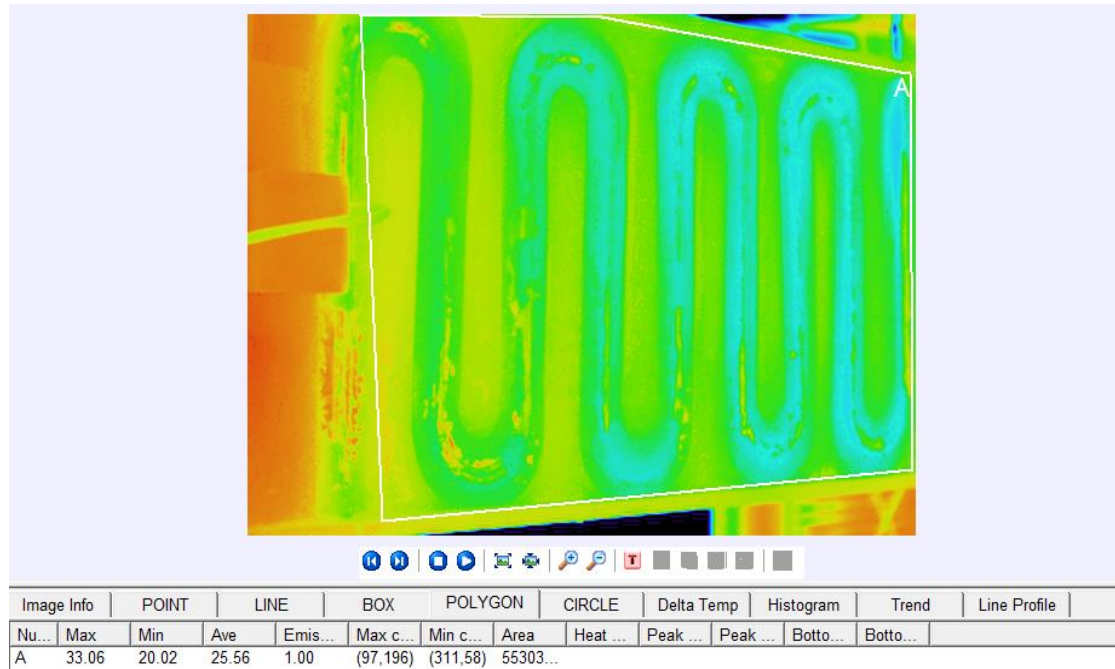
به کمک دوربین حرارتی مدل NEC-AVIO-R300SR-HD موجود در آزمایشگاه دانشگاه صنعتی شاهرود، اثر خنک‌کاری در میزان و توزیع دمای پشت پنل مشاهده و ثبت گردید. در شکل ۱-۴ پنل در حالت بدون خنک‌کاری نشان داده شده است. با تابش خورشید و جذب حرارت خورشید توسط شیشه و سلول و جاذب، سطح پنل رفته رفته گرم می‌شود به طوری که دمای متوسط پشت پنل در لحظه عکس‌برداری به ۵۰,۱۴ درجه سانتی‌گراد رسیده است. داده‌های بیشتر از جمله: ولتاژ و جریان اتصال کوتاه و ولتاژ و جریان بیشینه و بازده الکتریکی و تابش و... به کمک دستگاه سولار پاور آنالایزر موجود در آزمایشگاه در همین لحظه ثبت گردیده است که در ادامه جهت محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۴: تصویر دوربین حرارتی در حالت بدون خنک‌کاری

سپس خنک‌کاری با آب شهر با دبی ۳,۵ لیتر بر دقیقه و دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد انجام شد و بعد از مدت زمان ۲۰ دقیقه به منظور رسیدن به حالت پایدار عکس‌گیری مجدد از پنل انجام گرفته است.

همانطور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است، بعد از خنک کاری دمای پشت پنل به ۲۵,۵ درجه سانتی گراد رسید که حدود ۲۵ درجه کاهش دما را نشان می دهد و باعث افزایش بازده الکتریکی می شود.



شکل ۴-۲: تصویر دوربین حرارتی در حالت با خنک کاری

داده های ثبت شده از عملکرد پنل در طی این آزمایش برای دو نقطه از این نمودار، یکی در حالت با خنک کاری و دیگری در حالت بدون خنک کاری در جدول ۴-۱ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱: داده های خروجی سولار پاور آنالیزر و محاسبه بازده الکتریکی

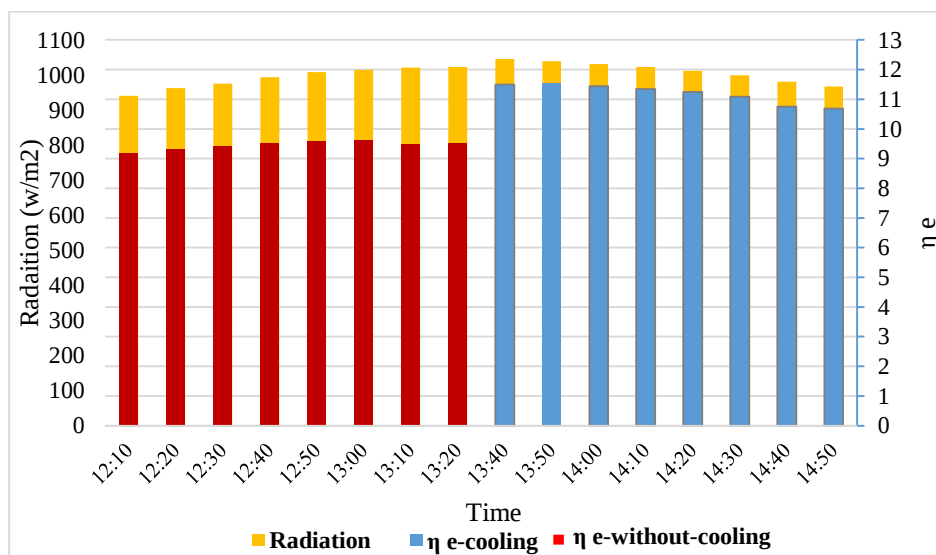
	با خنک کاری	بدون خنک کاری
$A(m^2)$ مساحت	0.6588	0.6588
$IRR(W/m^2)$ تابش	982	969
$V_m(v)$ ولتاژ ماکزیمم	16.38	15.44
$I_m(A)$ جریان ماکزیمم	4.926	4.522
FF	0.666	0.633
$I_{sc}(A)$ جریان اتصال کوتاه	5.485	5.47
$V_{oc}(V)$ ولتاژ مدار باز	22.06	20.13
$P_m(W)$ توان ماکزیمم	80.73	69.86
ETA_{el} بازده الکتریکی	12.47	10.94

محاسبه بازده به کمک رابطه (۱-۴) [۶۵-۶۶] انجام می‌شود.

$$\eta_{el} = \frac{V_{max} * I_{max}}{Irr * A_c} = \frac{V_{oc} * I_{sc} * FF}{I(t) * A_c} \quad ۱-۴$$

همانطور که مشاهده می‌شود در حالت بدون خنک‌کاری ولتاژ مدار باز (V_{oc}) و جریان مدار بسته (I_{sc}) سیستم کمتر از حالت با خنک‌کاری شده است که نتیجه آن افزایش ۱٫۵۴٪ بازده الکتریکی حین خنک‌کاری بوده است. لذا این نتایج افزایش ۰٫۵۶ درصدی بازده را به ازای هر درجه کاهش دما نشان می‌دهد که نزدیک به حد بالای گزارش شده در مطالعات قبلی است.

نتایج بررسی پنل در دو حالت با خنک‌کاری و بدون خنک‌کاری در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با خنک‌کاری بازده الکتریکی نزدیک به ۲٪ افزایش یافته است.

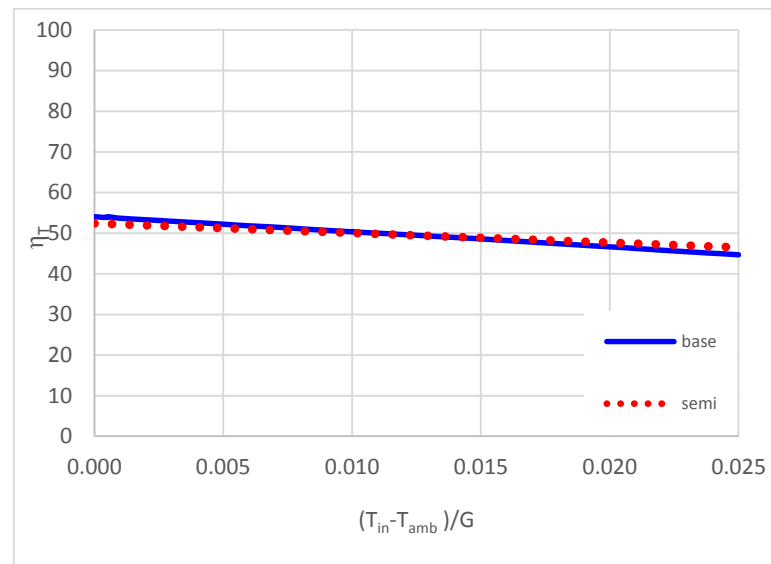


شکل ۳-۴: بررسی بازده الکتریکی پنل در دو حالت با خنک‌کاری و بدون خنک‌کاری با تابش تقریباً ثابت

۳-۴ مقایسه مدل نیم‌لوله جدید با مدل متداول با لوله کامل

در ابتدا به منظور مقایسه طرح جدید با طراحی متداول، مدلی مطابق مرجع [۶۰] در محیط نرم افزار متلب تهیه گردید. این مدل که با لوله کامل بوده، با مقاله مربوطه مطابق شکل ۴-۴ اعتبارسنجی گردید که خطای حدود ۲٪ (به پیوست الف مراجعه شود) مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه این مدل دارای

دو لایه شیشه و یک فاصله هوایی است، یک لایه شیشه و فاصله هوایی را حذف نموده و مدل به صورت یک سیستم فتوولتائیک حرارتی با سیستم آب‌خنک مارپیچ تمام لوله و با یک شیشه تبدیل شده است.



شکل ۴-۴: اعتبارسنجی مدل مقاله [۶۰]

مدل جدید ارایه شده (سطح مقطع نیم‌لوله) با مدل متداول (سطح مقطع لوله کامل) که هر دو دارای یک لایه شیشه هستند، مقایسه شده است. پارامترهای مورد استفاده در هر دو مدل در جدول ۲-۴ نشان داده شده است. همچنین این مقایسه در شرایط محیطی ثابتی صورت گرفته که این مقادیر نیز در جدول ۳-۴ اشاره گردیده است. جهت مقایسه دو مدل با تغییر دبی آب نتایج ارایه و ارزیابی گردیده است.

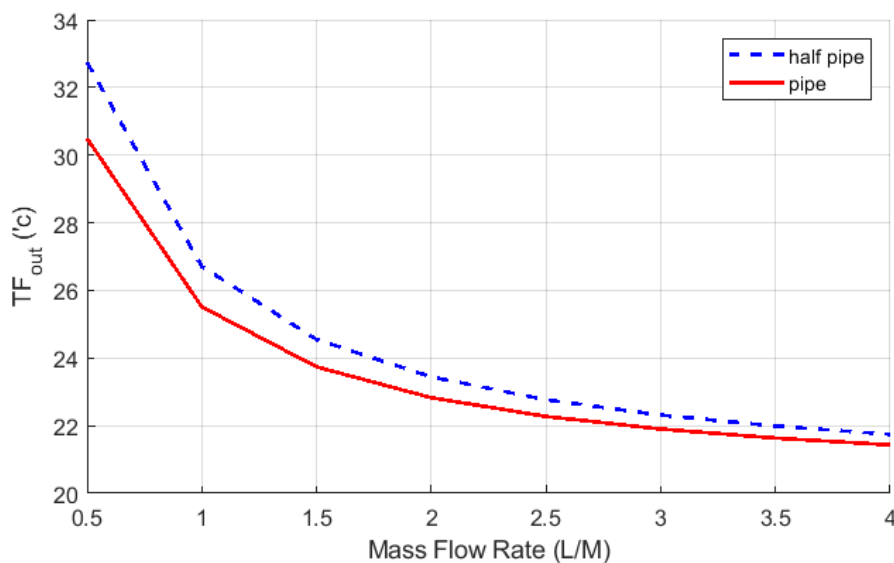
جدول ۴-۲: پارامترهای مورد استفاده در مقایسه دو مدل تمام لوله و نیم لوله

پارامتر	مقدار
سطح جاذب (A)	$0.725 \text{ (m}^2\text{)}$
سطح فتوولتاییک (A_c)	$0.6588 \text{ (m}^2\text{)}$
بازدهی پنل فتوولتاییک در شرایط مرجع ($\eta_{el,ref}$)	۱۲,۵ (%)
طول کلکتور (L_c)	۱,۲۵ (m)
طول مجاری جریان (L)	۰,۵۶۹ (m)
ضریب صدور شیشه (ϵ_g)	۰,۹
ضریب عبور شیشه (τ_g)	۰,۹۶
ضریب هدایت حرارتی شیشه (k_g)	۰,۹ (W/m.K)
ضخامت شیشه فتوولتاییک (t_g)	۰,۰۰۳ (m)
ضخامت سلول سیلیکونی (t_{si})	۰,۰۰۰۳۵ (m)
ضریب هدایت حرارتی سلول سیلیکونی (k_{si})	۱۴۸ (W/m.K)
ضخامت صفحه جاذب (L_p)	۰,۰۰۳ (m)
ضریب هدایت حرارتی صفحه جاذب (k_p)	۲۳۷ (W/m.K)
ضخامت عایق (t_{in})	۰,۰۳۵ (m)
ضریب هدایت حرارتی عایق (k_{in})	۰,۰۳۵ (W/m.K)
قطر هیدرولیکی (D_h)	۰,۰۰۸۲ (m)
فاصله بین لوله‌ها (W)	۰,۱۲۷۵ (m)
تعداد ردیف لوله‌ها (N)	۹
ضریب جذب سلول (α_c)	۰,۹
ضریب جذب جاذب (α_p)	۰,۵

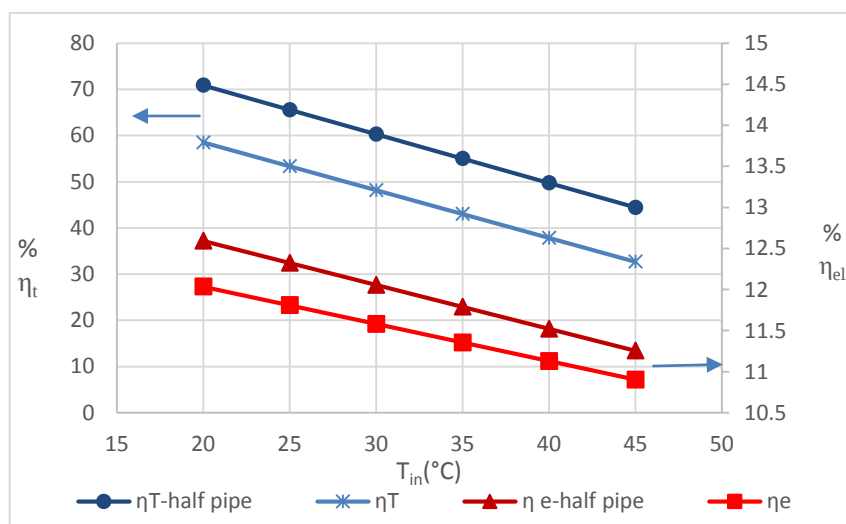
جدول ۴-۳: شرایط محیطی ثابت برای مقایسه دو مدل تمام لوله و نیم لوله

پارامتر	T_{amb}	G	V_w	T_{in}	$\eta_{el,ref}$
مقدار	۲۵ (°C)	۱۰۰۰ (W/m ²)	۱ (m/s)	۲۵ (°C)	۱۲ (%)

در شکل (۴-۵) تغییرات دمای خروجی پنل در دبی‌های مختلف نشان داده شده است. افزایش دبی منجر به کاهش دمای خروجی آب می‌گردد. تغییرات تا دبی ۱ نسبتاً شدید بوده و پس از آن کند می‌گردد که دلیل این تغییرات تبدیل رژیم جریان از حالت آرام به آشسته است. اختلاف دما در دو مدل مشهود بوده و با افزایش دبی کم می‌شود. به طور کلی در دمای آب ورودی مدنظر بین ۲ تا ۶ درصد کاهش دما حاصل شده است. اما برای مقایسه دقیق‌تر باید بازده را مورد بررسی قرار داد.

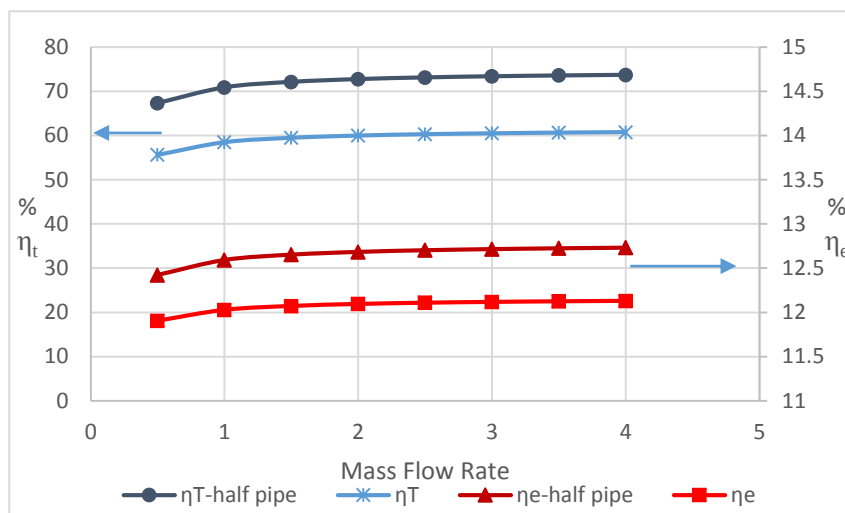


شکل ۴-۵: مقایسه دمای خروجی سیال با تغییر دبی آب در دو حالت تمام لوله و نیم لوله تغییرات بازده با افزایش دمای ورودی در شکل ۴-۶ قابل مشاهده است. افزایش دمای ورودی، کاهش حرارت جذب شده را به دنبال دارد که منجر به کاهش بازده حرارتی شده است. همچنین با توجه به این روند افزایشی، دمای سلول نیز افزایش می یابد به دنبال آن بازده الکتریکی کاهش می یابد. بر همین اساس، ۲۵ درجه افزایش دمای ورودی منجر به کاهش حدود ۲۵٪ بازده حرارتی شده است و حدود ۲٪ از بازده الکتریکی کاسته است.



شکل ۴-۶: بازده های حرارتی و الکتریکی بر حسب دمای ورودی سیال در دو حالت تمام لوله و نیم لوله

با تغییر دبی از ۰,۵ تا ۴ افزایش بازده حرارتی و الکتریکی در هر دو مدل دیده می‌شود که در شکل ۴-۷ نشان داده شده است و افزایش محسوس بازده در مدل جدید نسبت به مدل متداول (به دلیل ارتباط دادن مستقیم جاذب و سیال و حذف چندین لایه مقاوتی که در قسمت های قبل به آن اشاره شده است) قابل مشاهده است.



شکل ۴-۷: بازده‌های حرارتی و الکتریکی بر حسب دبی جریان سیال در دو حالت تمام لوله و نیم‌لوله

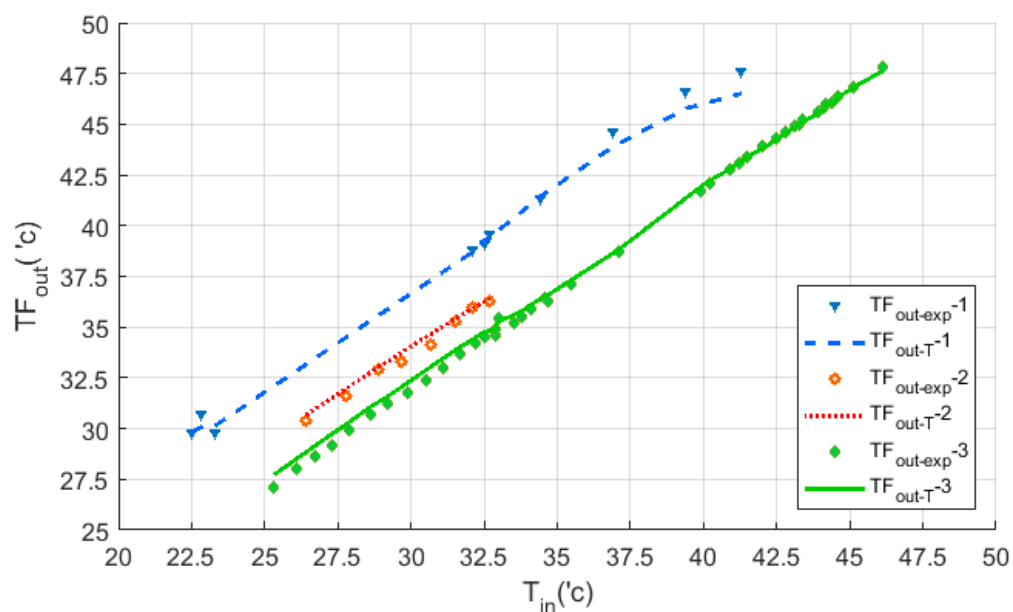
از نتایج دو نمودار فوق می‌توان دریافت که افزایش بیش از ۱۰ درصدی بازده حرارتی و بیشتر از ۰,۵٪ بازده الکتریکی با استفاده از مدل نیم‌لوله قابل دستیابی خواهد بود. این نشان می‌دهد که با تغییرات ذکر شده در طراحی یک پنل PV/T می‌توان علاوه بر ساده‌تر شدن ساختار پنل، بهبود قابل ملاحظه‌ای در بازده انرژی این پنل‌ها بدست آورد.

۴-۴ اعتبارسنجی مدل نیم‌لوله ارایه شده با داده‌های تجربی

در این بخش اعتبارسنجی مدل حالت نیم‌لوله با داده‌های تجربی حاصله از آزمایش‌های انجام شده در روزهای آفتابی اواخر تیرماه و اوایل شهریورماه سال ۱۳۹۶ بدست آمده است. (داده های تجربی در پیوست ب آمده است). تست پنل در شرایط مختلف و با تغییر پارامترهای دما و دبی آب ورودی به پنل صورت گرفته است. کلیه داده‌های موردنیاز از جمله دمای خروجی آب، شدت تابش، دمای هوا، سرعت

باد و پارامترهای الکتریکی سیستم ثبت شده است. سایر پارامترهای موردنیاز مدل مطابق جدول ۴-۲ در بخش قبل ارائه شد.

در شکل ۴-۸ تغییرات دمای خروجی پنل در دبی‌های مختلف در دو حالت تئوری و تجربی نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۴-۴ مشاهده می‌شود، میزان درصد خطا در دبی‌های مختلف در محدوده ۱٪ و کمتر از آن می‌باشد که تطابق بسیار خوب داده‌های تئوری و عملی را نشان می‌دهد. میزان خطا و RMS محاسبه شده برای پارامترهای بازده حرارتی و الکتریکی و دمای خروجی سیال در سه دبی مختلف نشان داده شده است. بازده خطاها برای بازده حرارتی از ۶ تا ۱۵٪ بوده است. حداقل خطا برای بازده الکتریکی ۶٪ و حداکثر خطا ۱۱،۳٪ می‌باشد.



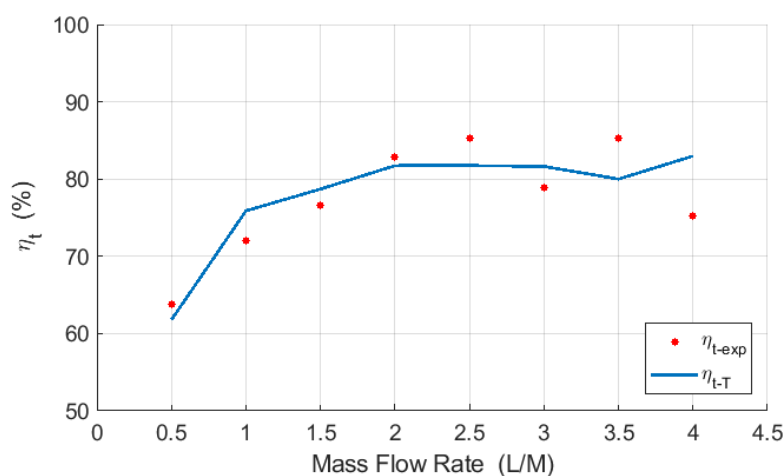
شکل ۴-۸: مقایسه دمای خروجی سیال در حالت آزمایشگاهی با تئوری در سه دبی مختلف

جدول ۴-۴: میزان خطاهای موجود در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری

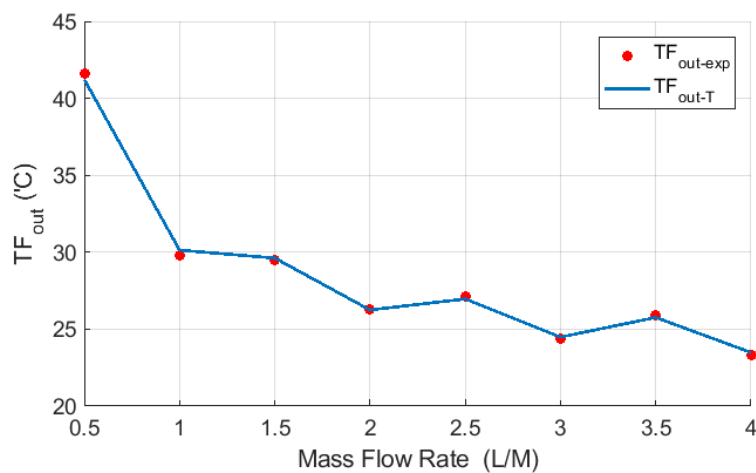
$\dot{m} (L/M)$	TF _{OUT}		η_t		η_e	
	RMS	Er %	RMS	Er %	RMS	Er %
۱	۱,۳	۱,۱	۷,۷	۶,۰	۸,۹	۶,۸
۲	۰,۹	۰,۷	۸,۲	۶,۶	۱۱,۲	۱۰,۴
۳	۰,۹	۰,۶	۱۵,۲	۱۲,۱	۹,۵	۸,۲

برای بررسی بیشتر اعتبارسنجی مدل به تغییرات پارامتر دبی سیال پرداخته شده است. افزایش دبی از ۰,۵ تا ۴ لیتر بر دقیقه منجر به کاهش دمای خروجی آب و افزایش بازده‌های حرارتی و الکتریکی در هر دو حالت آزمایشگاهی و مدل می‌شود که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. همچنین از دبی ۲ به بعد تغییرات بازده حرارتی تقریباً ثابت است. لازم به ذکر است برای بدست آوردن منحنی تئوری محاسبات دقیقاً بر اساس داده‌های تجربی هر آزمایش انجام شده است و نوسانات منحنی تئوری در این شکل‌ها به این دلیل می‌باشد.

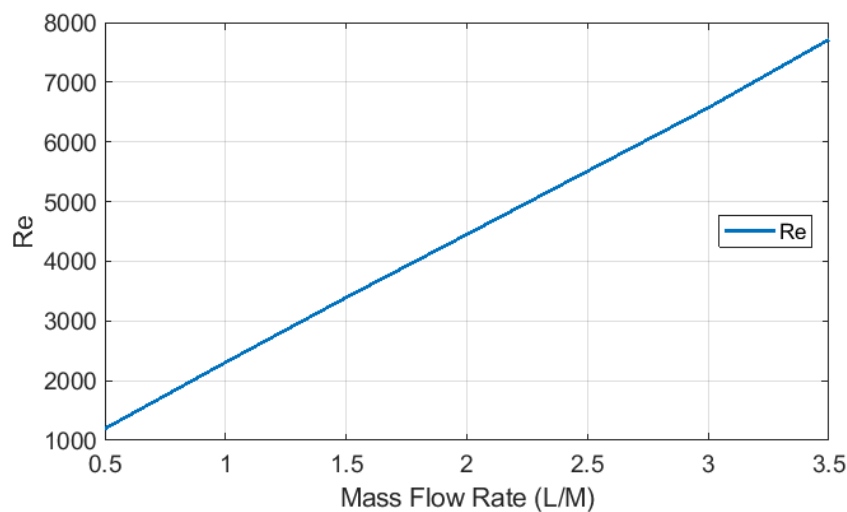
در شکل ۴-۱۰ نیز تغییرات دمای خروجی بر حسب دبی ورودی نشان داده شده است. دو شکل اخیر مشاهده می‌شود که تغییرات تا دبی ۱ نسبتاً شدید بوده و پس از آن کند می‌گردد. با محاسبه قطر هیدرولیکی سطح مقطع جریان آب و بدست آوردن عدد رینولدز مطابق شکل ۴-۱۱ مشخص می‌شود که دلیل این تغییرات تبدیل رژیم جریان از حالت آرام به آشفتنه و رسیدن به رینولدز ۲۳۰۰ می‌باشد.



شکل ۴-۹: اعتبارسنجی بازده حرارتی بر حسب دبی جریان‌های مختلف در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری در حالت نیم‌لوله



شکل ۴-۱۰: اعتبارسنجی دمای خروجی سیال بر حسب دبی جریان‌های مختلف در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری در حالت نیم‌لوله



شکل ۴-۱۱: عدد رینولدز

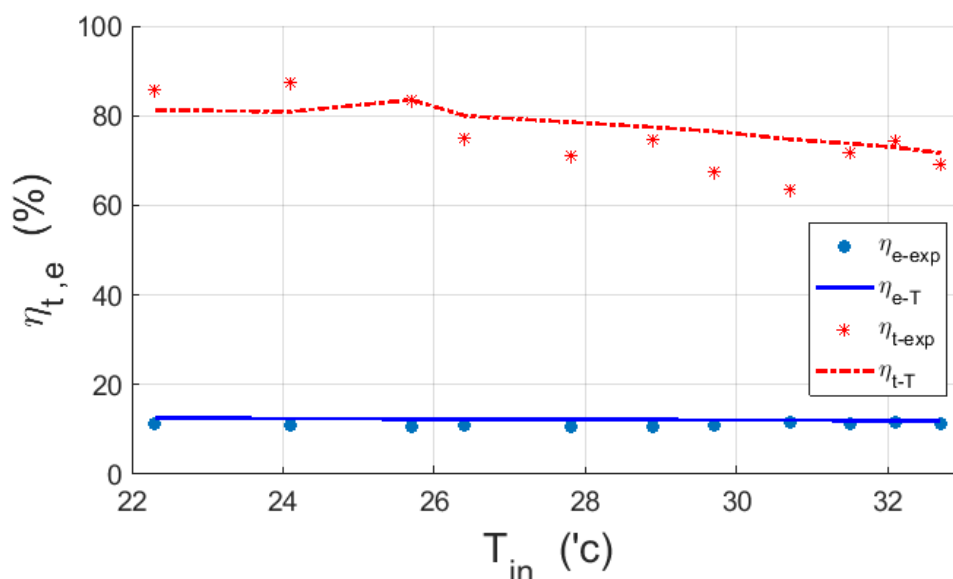
در شکل ۴-۱۲ تغییرات بازده حرارتی و الکتریکی و بازده کلی بر حسب دمای ورودی سیال در دبی

۲ نشان داده شده است. با افزایش دمای ورودی آب، از یک‌سو میزان حرارت جذب شده کاهش یافته

که منجر به کاهش بازده حرارت می‌شود. از سوی دیگر به دلیل افزایش دمای سلول بازده الکتریکی پنل

به مقدار جزئی کاهش پیدا می‌کند. خطای بین داده‌های تئوری و عملی نمودار مذکور در جدول ۴-۴

ارایه شده است.



شکل ۴-۱۲: روند تغییرات بازده‌های سیستم با تغییر دمای ورودی سیال در دو حالت آزمایشگاهی و تئوری در حالت نیم‌لوله

همان‌طور که در جدول ۴-۴ و شکل‌های ۴-۸ تا ۴-۱۲ مشاهده می‌شود بیشترین میزان خطا حدود ۱۵٪ است که نشان دهنده تطابق خوب مدل با داده‌های تجربی دارد.

۴-۵ تحلیل پارامتری مدل ارایه شده

نتایج تئوری بیانگر توانایی پیش‌بینی خوب مدل از شرایط عملکرد پنل است. بر این اساس به تحلیل پارامتری مدل پرداخته شده است. بدین منظور، پارامترهای ثابت مطابق جدول ۴-۵ برای مدل در نظر گرفته شده است. که در آن است $\eta_{el,ref}$ بازده در دمای مرجع ۲۵ درجه سانتی‌گراد و برابر با ۰,۱۲ توسط سازنده گزارش شده است.

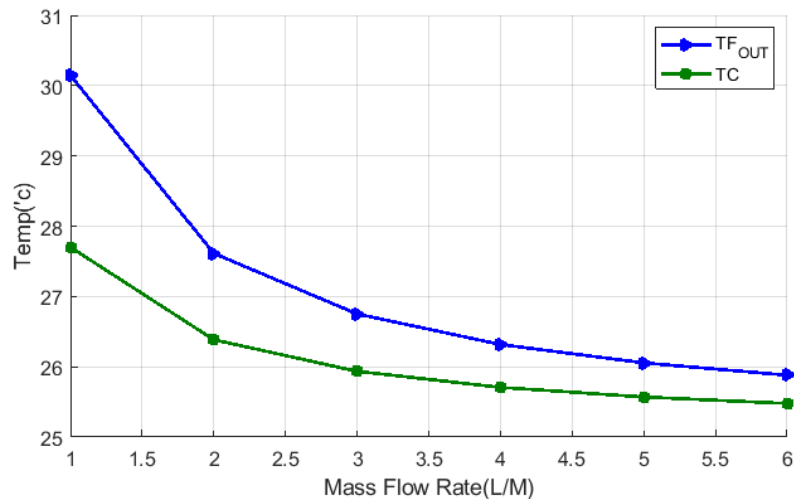
جدول ۴-۵: پارامترهای ثابت برای بررسی تحلیل پارامتری

پارامتر	T_{amb}	G	V_w	$\dot{m}$	T_{in}	A	$\eta_{el,ref}$
مقدار	۲۵(°C)	۸۰۰ (W/m ²)	۱(m/s)	۰,۰۱۶(kg/s)	۲۵(°C)	۰,۶۵۹(m ²) ()	۱۲ (%)

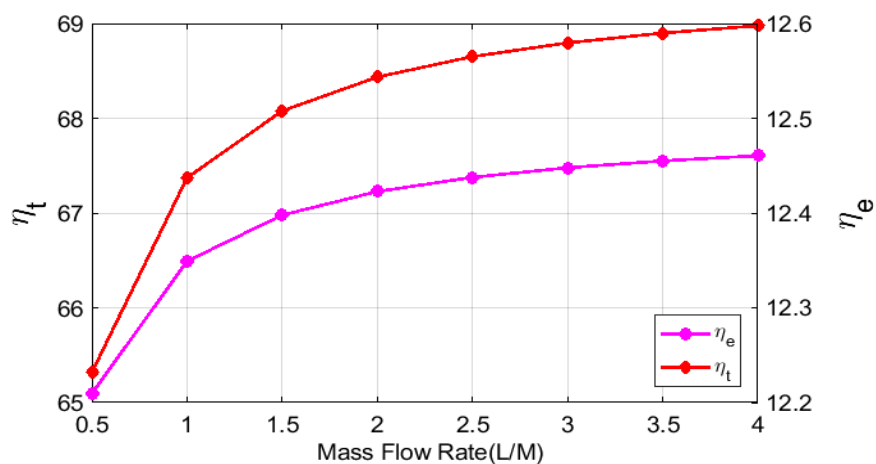
در شکل ۴-۱۲ با افزایش دبی جریان، دمای سلول کاهش می‌یابد که منجر به افزایش بازده الکتریکی می‌شود. همچنین با افزایش دبی جریان، ضریب انتقال حرارت و حرارت جذب شده افزایش می‌یابد که باعث افزایش بازده حرارتی نیز می‌گردد. مطابق نتایج حاصله از قبل در دبی ۱ رژیم جریان تغییر پیدا

می‌کند که در این شکل مشخص است. البته در دبی‌های بالاتر تغییرات بازده کاهش می‌یابد. در بررسی

اثر دبی باید به موارد دیگری از جمله افت فشار و توان مورد نیاز پمپاژ نیز توجه نمود.



(a)



(b)

شکل ۴-۱۳: بررسی اثر دبی جریان بر روی (a) دمای سلول و دمای خروجی آب و (b) بازده الکتریکی و بازده حرارتی

یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی، تعداد ردیف‌های نیم‌لوله مارپیچ پشت پنل است که در شکل

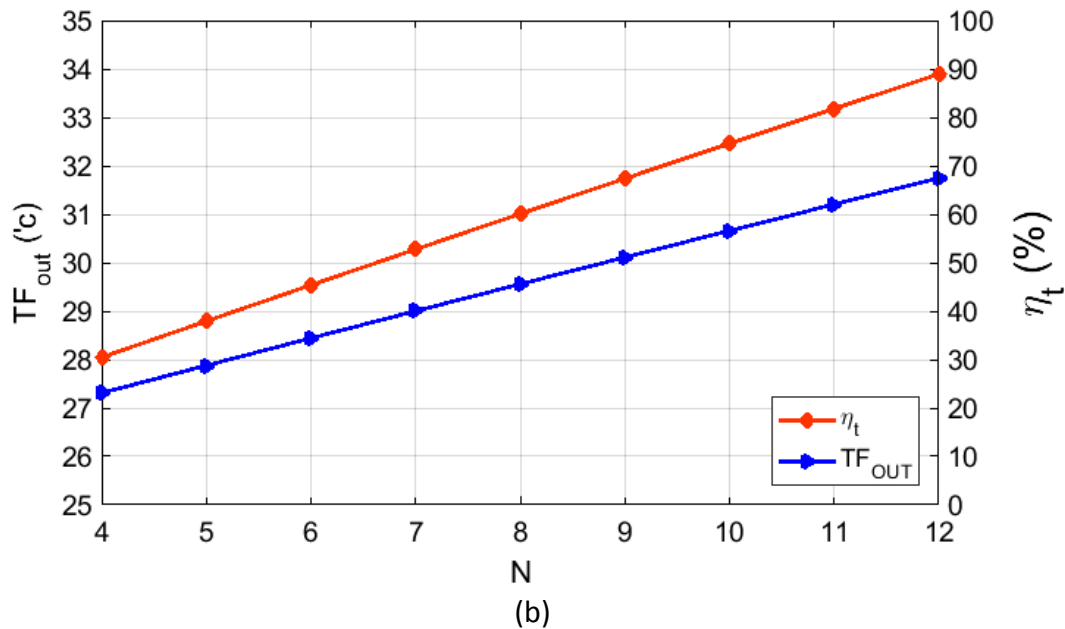
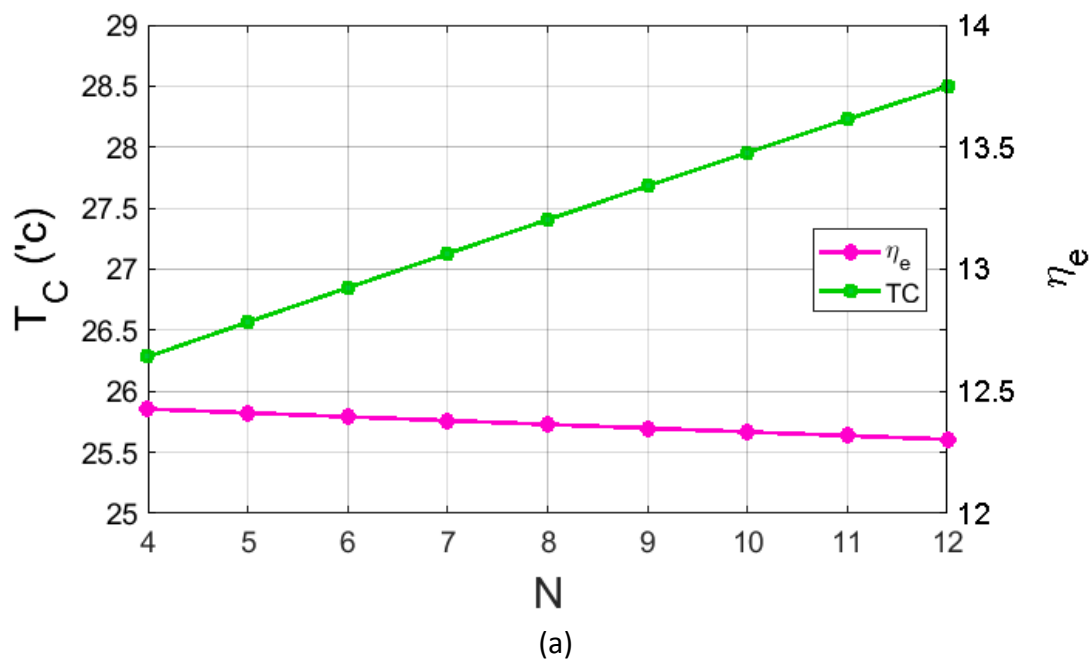
۴-۱۴ نشان داده شده است. با افزایش تعداد ردیف‌ها، دمای خروجی آب بیشتر و باعث کاهش انتقال

حرارت از سلول‌های ردیف‌های انتهایی می‌شود که خود منجر به افزایش دمای متوسط این سلول‌ها و

در نتیجه کاهش بازده الکتریکی می‌شود. از سوی دیگر افزایش دمای خروجی سیال نشان‌دهنده

افزایش جذب انرژی حرارتی از پنل بوده که باعث افزایش بازده حرارتی می‌شود. برای انتخاب تعداد

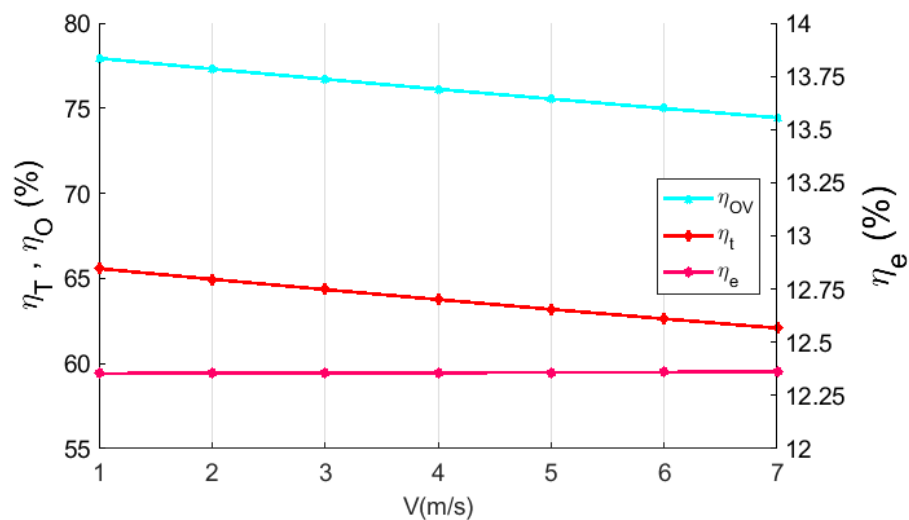
ردیف علاوه بر بررسی صرفه اقتصادی با در نظر گرفتن بازده‌های مورد نیاز و تغییرات افت فشار باید ترد آف^{۲۷} انجام گیرد که این مورد نیاز به بهینه‌سازی دارد که در بخش بعد بررسی خواهد گردید.



شکل ۴-۱: بررسی اثر تعداد ردیف لوله‌ها (a) دمای سلول و بارده الکتریکی (b) دمای خروجی آب و راندمان حرارتی

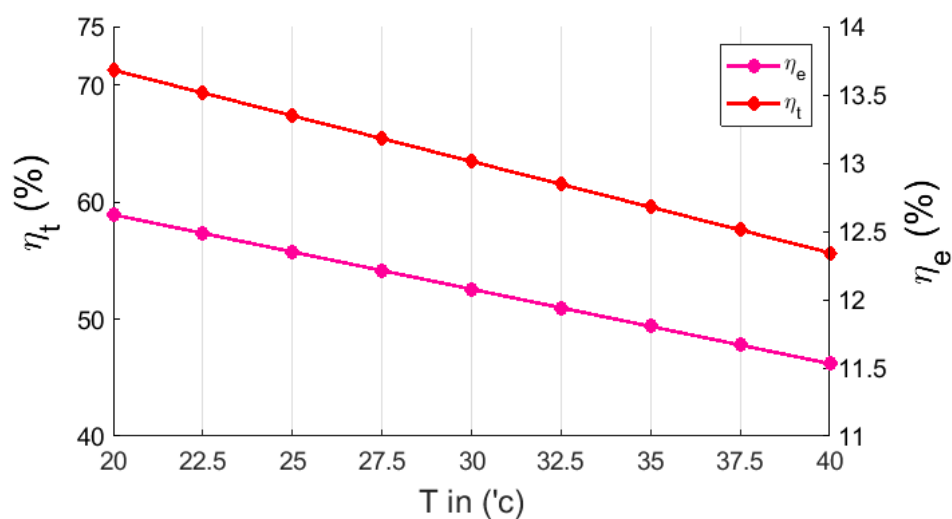
²⁷ Trade Off

عملکرد پنل با تغییر سرعت باد در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. با افزایش سرعت از ۱ تا ۷ متر بر ثانیه منجر به کاهش دمای خروجی سیال شده که کاهش بازده حرارتی را به دنبال دارد. با افزایش سرعت باد به دلیل کاهش مقاومت جابه‌جایی بر روی پنل، دمای سلول کاهش می‌یابد و در نتیجه به بازده الکتریکی افزایش پیدا می‌کند. به طور کلی افزایش سرعت باد اثر مثبت بر بازده الکتریکی و اثر منفی در بازده حرارتی پنل دارد. البته باد پارامتر مستقل بوده که در اختیار مصرف‌کننده نمی‌باشد.

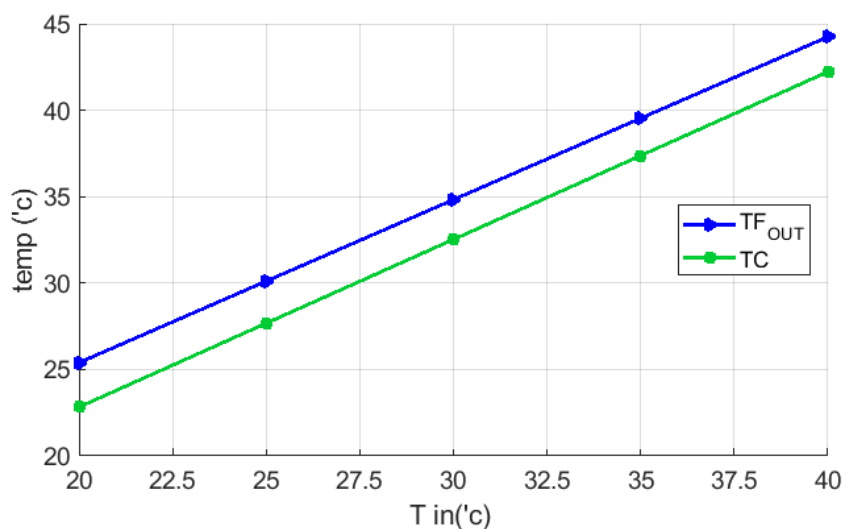


شکل ۴-۱۵: بررسی اثر سرعت باد بر روی بازده‌های سیستم

پارامتر مهم دیگر دمای ورودی آب است که تاثیر آن روی عملکرد پنل در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. با افزایش دمای ورودی سیال، دمای خروجی افزایش می‌یابد. با کاهش اختلاف دمای بین سطح سلول و سیال، حرارت جذب شده کاهش یافته و در نتیجه بازده حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دمای سلول منجر به کاهش بازده الکتریکی می‌شود.



(a)



(b)

شکل ۴-۱۶: بررسی اثر دمای ورودی بر (a) بازده‌های حرارتی و الکتریکی (b) دمای خروجی آب و دمای سلول

به منظور بررسی اثرات دیگر دبی بر روی افت فشار، اثرات دوگانه تعداد ردیف‌های لوله بر روی بازده بهینه‌سازی مساله پرداخته شده است. علاوه بر بهینه‌سازی این پارامترها، قطر لوله‌ها و دمای ورودی سیال پارامترهای دیگری هستند که به منظور ترید آف صرفه اقتصادی و بازده‌های مورد نیاز لزوم به بهینه‌سازی احساس می‌شود.

۴-۶ بهینه‌سازی

مدل‌های چندهدفه به منظور طراحی در یک مجموعه پیوسته از جواب‌ها به کار می‌روند و در نهایت، یک مدل ریاضی را در اختیار می‌گذارند که حل مدل می‌تواند گزینه‌های طراحی را در اختیار برنامه‌ریز قرار دهد. در این مدل‌ها، مسئله ابتدا با بیان ریاضی، مدل‌سازی و آنگاه حل می‌شود [۶۷-۶۸]. با توجه به این که در اینگونه مدل‌ها همزمان چند هدف را باید بهینه کرد، می‌توان ابتدا یکی از روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی یا برنامه‌ریزی سازشی^{۲۸} را برای تبدیل آن به مدل تک‌هدفه به کار گرفت و سپس مسئله را با استفاده از تکنیک‌های موجود حل کرد [۶۹]. در این نوع مدل‌های تصمیم‌گیری با توجه به این که مدل ریاضی مسئله با افزایش تعداد شاخص‌ها و ابعاد زمین به صورت نمایی بزرگ می‌شود، به نظر می‌رسد روشی برای حل دقیق مسئله در زمان معقول وجود نخواهد داشت. این نوع مسائل که به مسائل با مرتبه زمانی غیر چندجمله‌ای مشهورند، به طور کلی با استفاده از روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری حل می‌شوند. این فرآیندها حل جواب بهینه را تضمین نمی‌کنند، اما تنها روش‌های موجود برای حل اینگونه مسائل‌اند.

- روش‌های تصمیم‌گیری چندهدفه شامل الگوریتم ژنتیک
- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات
- الگوریتم شبکه‌های عصبی مصنوعی
- الگوریتم شبیه‌سازی تبرید
- الگوریتم کلونی مورچگان
- الگوریتم جستجوی ممنوع
- جستجوی همسایگی متغیر
- و... می‌باشند [۷۰].

²⁸ Compromise programming

۴-۶-۱ روش‌های حل یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه

روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه به دو دسته کلی روش‌های تجزیه و مستقیم تقسیم می‌شوند.

الف) روش تجزیه

این روش‌ها مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را به مسئله تک هدفه تبدیل می‌کنند، خود شامل چهار دسته کلی به شرح ذیل می‌باشند:

- روش مجموع وزن‌دار: این روش ساده‌ترین و ابتدایی‌ترین روش تجزیه می‌باشد و برای هر یک از توابع هدف بر اساس اهمیت شان یک وزن تعریف می‌کند.
- برنامه‌ریزی آرمانی: در این روش ابتدا یک نقطه ایده‌آل (آرمانی) تعریف می‌شود و سپس سایر نقاط بر اساس نزدیکی به این نقطه مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.
- رسیدن به هدف: این روش بسیار شیه به روش برنامه‌ریزی آرمانی است. در این روش ابتدا یک نقطه ایده‌آل (آرمانی) تعریف می‌شود. سپس نقاط بر اساس بیشترین فاصله‌شان از نقطه ایده‌آل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و نقطه‌ای که بیشترین فاصله‌اش از نقطه آرمانی نسبت به فاصله سایر نقاط کمتر باشد، به عنوان بهترین نقطه انتخاب می‌شود.
- روش تبدیل به قید: در این روش با تعیین قید یا قیدهایی یک سری از فضای مسئله حذف و از پیچیدگی آن کاسته می‌شود و به فضای قید اضافه می‌شود [۷۱].

ب) روش مستقیم:

این روش‌ها که بر خلاف روش‌های تجزیه، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را به همان صورت چندهدفه حل می‌کنند، شامل الگوریتم‌های تکاملی^{۲۹} مانند NSGA-II^{۳۰}، MOPSO^{۳۱} و ... می‌باشند.

۴-۶-۲ الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب (NSGA-II)

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های اکتشافی حل مسئله است که از مدل‌سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است [۷۲]. به عبارت دیگر این الگوریتم از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول یا جواب بهینه به منظور پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کند [۷۳]. روش کار و الگوریتم کلی NSGA-II که یکی از حالت‌های چندهدفه الگوریتم ژنتیک می‌باشد، به شرح ذیل است:

۱. ایجاد جمعیت اولیه
۲. محاسبه معیارهای برازندگی
۳. مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن
۴. محاسبه فاصله ازدحامی^{۳۲}

²⁹ Evolutionary algorithms

³⁰ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

³¹ Multi-Objective Particle Swarm Optimization

³² Crowding Distance

۵. انتخاب: به محض این که جمعیت اولیه بر اساس شرط‌های غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می‌شود. این انتخاب بر اساس دو المان صورت می‌پذیرد:

- رتبه جمعیت: جمعیت‌ها در رتبه‌های پایین‌تر انتخاب می‌شوند.
- محاسبه فاصله: با فرض این که p و q دو عضو از یک رتبه باشند، عضوی انتخاب می‌شود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. گفتنی است که اولویت انتخاب، ابتدا با رتبه و سپس بر اساس فاصله ازدحامی است.

۶. انجام تقاطع^{۳۳} و جهش^{۳۴} برای تولید فرزندان جدید

۷. تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش.

۸. جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل. در مرحله

نخست، اعضای رتبه‌های پایین‌تر جایگزین والدهای قبلی می‌شوند و سپس بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع و جهش، ابتدا برحسب رتبه دسته‌بندی می‌شوند و قسمتی از آنها که دارای رتبه پایین‌تری هستند، حذف می‌گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقیمانده بر اساس فاصله ازدحامی مرتب می‌شوند. در اینجا مرتب‌سازی داخل یک جبهه انجام می‌شود.

۹. تمامی مراحل تا نسل (و یا شرایط بهینگی) مورد نظر تکرار می‌شوند [۷۰].

۴-۶-۳ دلایل انتخاب الگوریتم NSGA-II نسبت به سایر الگوریتم‌های تکاملی

این الگوریتم برخی از مشکلات الگوریتم‌های پیشین را حل کرده است. برخی از تفاوت‌های این الگوریتم با سایر الگوریتم‌ها به شرح ذیل است:

³³ Crossover

³⁴ Mutation

- راه حل سریع‌تری در مقایسه با سایر روش‌ها در رتبه‌بندی دارد و پیچیدگی‌های محاسباتی الگوریتم‌های قبلی در آن از بین رفته است. با فرض این که M تعداد توابع هدف و N اندازه جمعیت باشد، پیچیدگی محاسباتی در الگوریتم‌های قبلی $O(MN^3)$ بوده است، در صورتی که در این روش این میزان $O(MN^2)$ است [۷۴].

- از فاصله ازدحامی برای به دست آوردن جبهه جواب یکنواخت‌تری از سایر الگوریتم‌ها و تخمین دانسیته نقاط حول جواب‌ها استفاده می‌کند. گفتنی است که فاصله ازدحامی، فاکتوری است که برای انتخاب بهتر جواب‌ها از نظر پراکندگی بر روی یک جبهه استفاده می‌گردد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

- برای نقاط ابتدا و انتهای یک جبهه مقدار آن بی‌نهایت فرض می‌شود.

- برای سایر نقاط جبهه، از ۲ تا $k-1$ به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$CD[i] = (f_m^{i+1} - f_m^{i-1}) / (f_m^{\max} - f_m^{\min}) \quad ۲-۴$$

که در آن $CD[i]$ فاصله ازدحامی فرد i ام بر روی جبهه F ، f_m^i مقدار تابع هدف m ام در i امین فرد در جبهه f و $f_m^{\max}$ و $f_m^{\min}$ به ترتیب بیشترین مقدار و کمترین مقدار تابع هدف m در جبهه F است. جوابی بهتر است که فاصله ازدحامی بیشتری داشته باشد [۷۵].

برای تعیین نقاط بهینه علاوه بر روش فاصله ازدحامی می‌توان از روش‌های تاپسیس و لینمپ و فازی استفاده کرد. تکنیک تاپسیس اولویت‌بندی بر اساس شباهت به راه حل ایده آل است. از این تکنیک می‌توان برای رتبه‌بندی و مقایسه گزینه‌های مختلف و انتخاب بهترین گزینه و تعیین فواصل بین گزینه‌ها و گروه‌بندی آنها استفاده نمود. از جمله مزیت‌های این روش آن است که معیارها یا شاخص‌های به کار رفته برای مقایسه می‌توانند دارای واحدهای سنجش متفاوتی بوده و طبیعت منفی و مثبت داشته باشند. به عبارات دیگر می‌توان از شاخص‌های منفی و مثبت به شکل ترکیبی در این تکنیک استفاده نمود.

بر اساس این روش، بهترین گزینه یا راه حل، نزدیک ترین راه حل به راه حل یا گزینه ایده آل و دورترین از راه حل غیر ایده آل است. راه حل ایده آل، راه حلی است که بیشترین سود و کمترین هزینه را داشته باشد، در حالی که راه حل غیر ایده آل، راه حلی است که بالاترین هزینه و کمترین سود را داشته باشد. به طور خلاصه، راه حل ایده آل از مجموع مقادیر حداکثر هر یک از معیارها به دست می آید، در حالی که راه حل غیر ایده آل از مجموع پایین ترین مقادیر هر یک از معیارها حاصل می گردد. همچنین روش لینمپ از روش های تصمیم گیری چندمعیاره می باشد برای تعیین وزن معیارها و زیرمعیارها و رتبه بندی گزینه ها به کار می رود. در روش لینمپ تعداد m گزینه با n شاخص به وسیله m نقطه برداری در یک فضای n بعدی نشان داده شده و فرض بر آن است که گزینه هایی با کمترین فاصله به نقطه ایده آل را در این فضا انتخاب خواهد کرد. در این روش با حل یک مدل بهینه سازی ریاضی و تبدیل آن به مدل بهینه سازی خطی به اوزان عوامل پژوهش دست پیدا خواهیم کرد.

۴-۶-۴ نتایج بهینه سازی مدل

طبق آنچه در قسمت قبل مشاهده شد، رسیدن به طرح نهایی سیستم فتوولتاییک حرارتی به انتخاب هندسه و شرایط ورودی مناسبی نیاز دارد. بدین منظور در این قسمت به قیدها و دامنه مربوط به بهینه سازی اشاره شده است. متغیرهای تصمیم شامل دمای ورودی سیال، نرخ دبی جریان، تعداد ردیف لوله ها، و قطر خارجی لوله است. همچنین مشخصات پنل در این قسمت مطابق جدول ۳-۱ می باشد. هدف از بهینه سازی، دستیابی به مقادیر بهینه متغیرها برای حالتی که بیشینه بازده کلی سیستم و کمینه کردن توان پمپ می باشد. همچنین توابع هدف و بازه برخی از متغیرهای تصمیم مشابه مقاله [۷۶] در نظر گرفته شده است.

بازه متغیرهای تصمیم:

$$15 \leq T_{in} \leq 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$0.06 \leq \dot{m} \leq 0.6 \text{ L/min}$$

$$3 \leq N \leq 10$$

$$0.005 \leq D_o \leq 0.02 \text{ m}$$

توابع هدف:

$$\max \eta_{el,net} \text{ \& } \max \eta_{th}$$

که در آن :

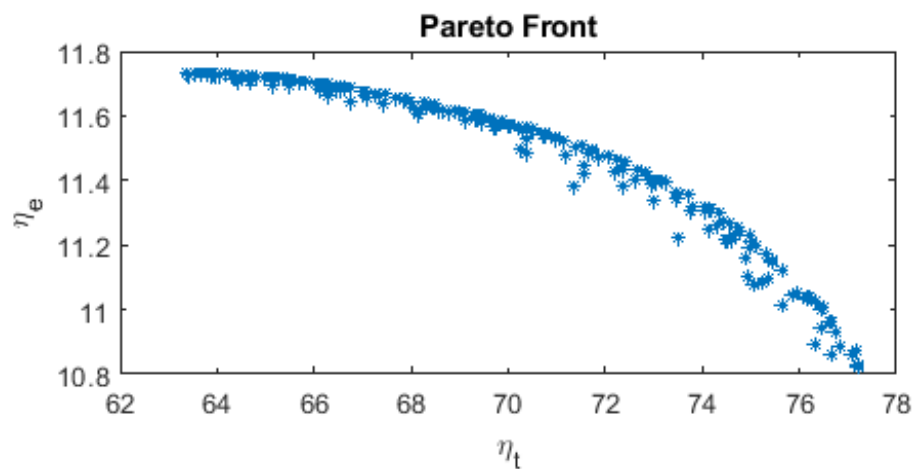
$$P_{in} = \frac{0.01 \rho g \dot{m} H}{1000 \eta_p} \quad 3-4$$

$$P_{gen} = \eta_{el} G(t) A_c \quad 4-4$$

$$P_{Net} = P_{gen} - P_{in} \quad 5-4$$

$$\eta_{eL,net} = \frac{P_{Net}}{G(t) A_c} \quad 6-4$$

P_{in} میزان توان مصرفی پمپ و P_{gen} توان تولیدی حاصل از پنل فتوولتاییک است. همچنین η_{el} بازده الکتریکی تولیدی و $\eta_{eL,net}$ بازده خالص (کم کردن میزان الکتریسته مصرفی از تولیدی) می باشد. با توجه به اینک مدل در محیط نرم افزار Matlab تهیه شده است، لذا از جعبه ابزار الگوریتم ژنتیک چندهدفه این نرم افزار به منظور بهینه نمودن تابع هدف استفاده شده است. همان گونه که در بالا مشخص است متغیرهای مسئله دمای ورودی سیال، دبی جریان، تعداد ردیف لوله ها و قطر خارجی است. در شکل ۴-۱۷ مقادیری بهینه ای از بازده حرارتی و بازده الکتریکی خالص به ازای مقادیر مختلف متغیرهای تصمیم نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷: جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص

با توجه به رابطه ۴-۶ مقادیر بهینه متغیرها برای بازده حرارتی و الکتریکی خالص که هر دو دارای بیشترین فاصله ازدحامی باشند، دمای ورودی سیال ۱۵,۰۱ درجه سانتی‌گراد و دبی جریان ۰,۴۲ لیتر بر دقیقه و ۵ ردیف لوله با قطر خارجی ۰,۰۱۷ متر است که مقادیر خود توابع هدف به ترتیب برابر تقریباً ۰,۷۳۰٪ و ۰,۱۱۴٪ است.

در جدول ۴-۶ سه نقطه از نمودار پارتو آمده است نقطه ۱ دارای بیشترین بازده حرارتی و نقطه ۲ دارای بیشینه مقدار بازده الکتریکی است و در نقطه ۳ هر دو بازده حرارتی و الکتریکی بیشینه و همچنین فاصله ازدحامی بیشینه است.

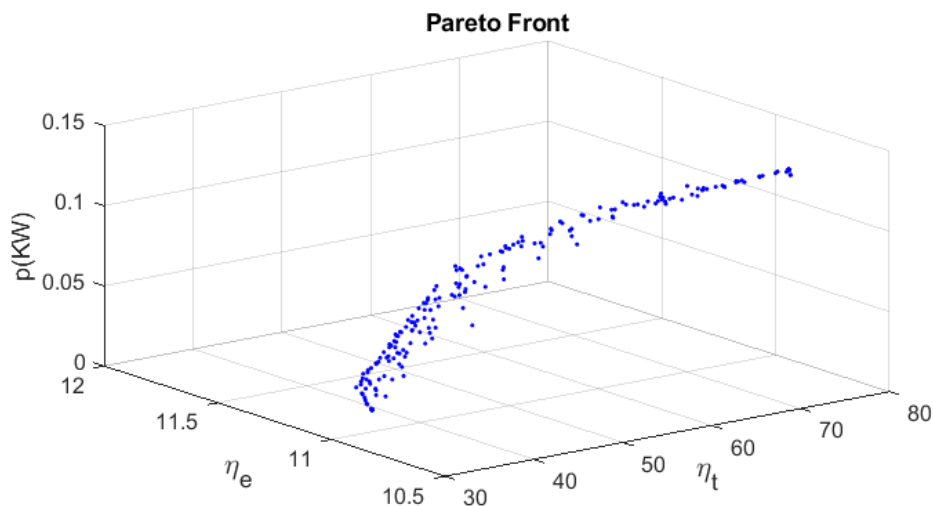
جدول ۴-۶: مقادیر جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص

	η_t	$\eta_{el net}$	$T_{in}(^{\circ}C)$	$\dot{m} (L/M)$	N	$D_o(m)$
۱	۰,۷۷۲	۰,۱۰۸	۱۵,۰۰	۰,۶	۳,۷	۰,۰۱۹
۲	۰,۶۳۶	۰,۱۱۷	۱۵,۰۱	۰,۲۴	۸,۸	۰,۰۰۶
۳	۰,۷۳۰	۰,۱۱۴	۱۵,۰۱	۰,۴۲	۵,۱	۰,۰۱۷

برای در نظر گرفتن اختلاف فشار برای مساله بهینه‌سازی از تابع توان پمپ استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \frac{\dot{M}\Delta P}{\eta p} \quad ۱۲-۴$$

با متغیرهای تصمیم و اضافه کردن تابع p به توابع هدفی که در بالا گفته شد نمودار پارتو به شکل زیر ایجاد شده است:



شکل ۴-۱۸: جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص و توان مصرفی پمپ

بیشترین فاصله ازدحامی برای توابع هدف با دمای ورودی سیال ۱۵,۲۹ درجه سانتی‌گراد و دبی جریان ۰,۶ لیتر بر دقیقه و ۷ ردیف لوله با قطر خارجی ۰,۰۱۶ متر است که مقادیر بازده حرارتی، الکتریکی و توان مصرفی پمپ به ترتیب برابر تقریباً ۰,۷۳۳۵٪ و ۰,۱۱۱۳٪ و ۰,۱۰۶ کیلووات است.

در جدول ۴-۷ نقطه ۱ دارای بیشترین مقدار بهینه بازده حرارتی و نقطه ۲ شامل حداکثر مقدار بهینه بازده الکتریکی و نقطه ۳ دارای کمترین مقدار توان مصرفی پمپ است. همچنین در نقطه ۴ مقادیر متغیرهای تصمیم به ازای بیشترین فاصله ازدحامی، نقطه ۵ جواب بهینه از روش تصمیم‌گیری لینمپ و تاپسیس نشان داده است.

جدول ۴-۷: مقادیر جبهه پارتو بازده حرارتی و الکتریکی خالص و توان مصرفی پمپ

	η_t	$\eta_{el\ net}$	p	T_{in}	$\dot{m}$	N	D_o
۱	۰,۷۷۱۵	۰,۱۰۸۳	۰,۱۲۶	۱۵,۰۳	۰,۵۹	۳,۷	۰,۰۱۹
۲	۰,۶۲۹۱	۰,۱۱۷۴	۰,۰۳۹	۱۵,۰۸	۰,۲۳	۹,۸	۰,۰۰۱
۳	۰,۳۵۳۷	۰,۱۱۰۳	۰,۰۱۱	۲۲,۵۳	۰,۰۶	۹,۹	۰,۰۱۳
۴	۰,۷۳۳۵	۰,۱۱۱۳	۰,۱۰۶	۱۵,۲۹	۰,۵۹۴	۷,۲	۰,۰۱۶
۵	۰,۵۶۱۹	۰,۱۱۶۴	۰,۰۲۴	۱۵,۱۳	۰,۱۴۳	۸,۷	۰,۰۱۷

فصل ۵ : نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ مقدمه:

در این پژوهش مدل سازی یک نوع پنل فتوولتاییک حرارتی (PV/T) آب خنک انجام شده است. آرایش سیستم انتخابی مبتنی بر کلکتور ورق-لوله مارپیچ است که در به جای استفاده از یک لوله متصل شده به ورق پشت پنل، خنک کاری از طریق یک نیم لوله انجام شده است. از سوی دیگر سلول ها به جای قرار گرفتن بر روی بستر پلیمری (تدلار) روی یک بستر فلزی قرار گرفته اند. برای جلوگیری از اتصال کوتاه سطح این صفحه پوشش دهی شده است. نیم لوله با استفاده از چسب های مخصوص به صفحه جاذب متصل شده است. با استفاده از این روش مقاومت های حرارتی مربوط به تدلار، چسب (اتصال بین تدلار و صفحه جاذب)، رابط فلزی و جداره لوله حذف شده است و به حداقل رسیده است. مدل سازی این سیستم در محیط نرم افزار متلب انجام شده و مدل ارایه شده با داده های تجربی به دست آمده از نمونه آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه انرژی دانشگاه صنعتی شاهرود اعتبارسنجی شده است. مشخصات این پنل در جدول ۳-۱ بررسی شده است. سپس تحلیل پارامتری مدل انجام شده و برای رسیدن به طراحی مناسب تر، بهینه سازی چندهدفه با توجه به بازده حرارتی و الکتریکی و میزان افت فشار صورت گرفته است. بنابراین با تغییر جزیی در ساختار می توان بازده ها را افزایش داد و لذا پس از رفع مشکلات فنی آن، تولید صنعتی این محصول می تواند منجر به تجاری سازی مناسب آن شود.

۵-۲ نتیجه گیری:

- در آزمایش صورت گرفته مقایسه خنک کاری پنل با حالت بدون خنک کاری انجام گرفت. نتیجه نشان داد دمای متوسط پشت پنل در حالت بدون خنک کاری ۵۰,۱۴ درجه سانتی گراد است. سپس خنک کاری با آب شهر دمای پشت پنل به ۲۵,۵۶ درجه سانتی گراد رسید که این کار باعث کاهش دمای سلول و در نتیجه افزایش بازده الکتریکی به اندازه ۱,۵-۲٪ شد و بازده را از ۱۰,۹۴ به ۱۲,۴۷٪ رسید.

- مدل جدید ارایه شده (سطح مقطع نیم لوله) با مدل متداول (سطح مقطع لوله کامل) که هر دو دارای یک لایه شیشه هستند، در شرایط محیطی ثابت مقایسه شدند. مدل ارایه شده افزایش تا حدود ۱۰٪ برای بازده حرارتی و بیشتر از ۰٫۵٪ برای بازده الکتریکی را نسبت به مدل متداول به همراه دارد.
- تغییرات دمای خروجی پنل در دبی‌های مختلف در دو حالت تئوری و تجربی اعتبارسنجی شده است. میزان درصد خطا برای دمای خروجی در محدوده ۱٪ و کمتر از آن می‌باشد و مقدار خطاها برای بازده حرارتی از ۶-۱۵٫۲٪ است. حداقل خطا برای بازده الکتریکی ۶٪ و حداکثر خطا ۱۱٫۲٪ است.
- با تغییر پارامتر دبی جریان، در دبی ۱ تغییر رژیم جریان رخ داد و از دبی ۲ به بعد اثر تغییر دبی کمتر است. همچنین با تغییر دبی از ۰٫۵ تا ۴ l/min، دمای خروجی سیال ۹ درجه و دمای سلول ۴ درجه کاهش یافته که منجر به افزایش ۴٪ بازده حرارتی و ۰٫۲۵٪ بازده الکتریکی شده است.
- در بررسی پارامتری تعداد ردیف لوله‌ها، افزایش ۴ تا ۱۲ ردیف لوله، دمای خروجی سیال را تا ۶ درجه بالا برده که منجر به افزایش بازده حرارتی از ۳۰٪ به ۹۰٪ شده است.
- در شرایط ثابت سرعت باد با افزایش ۱ تا ۷ متر بر ثانیه، منجر به افزایش ۳٫۵٪ بازده کلی سیستم شده است. همچنین این پارامتر اثر دوگانه‌ای بر روی بازده حرارتی و الکتریکی دارد به گونه‌ای که با افزایش سرعت باد، بازده حرارتی کاهش و بازده الکتریکی افزایش می‌یابد.
- یکی از پارامترهای مهم دمای ورودی سیال است که با افزایش ۲۰ درجه سانتی‌گراد آن از ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، بازده حرارتی بیش از ۱۰٪ و بازده الکتریکی حدود ۱٪ کاهش یافته است.
- مقادیر بهینه بنا به معیار ازدحام جمعیت و انتخاب بازده حرارتی و بازده الکتریکی خالص به عنوان تابع هدف برای سیستم مورد نظر، دمای ورودی سیال ۱۵٫۰۱ درجه سانتی‌گراد و دبی

جریان ۰,۴۲ لیتر بر دقیقه و ۵ ردیف لوله با قطر خارجی ۰,۰۱۷ متر است که مقادیر خود توابع هدف به ترتیب برابر تقریباً ۰,۷۳۰٪ و ۰,۱۱۴٪ است.

- مقادیر بهینه با انتخاب بازده حرارتی و الکتریکی خالص و توان به عنوان تابع هدف برای سیستم مورد نظر، دمای ورودی سیال ۱۵,۲۹ درجه سانتی گراد و دبی جریان ۰,۶ لیتر بر دقیقه و ۷ ردیف لوله با قطر خارجی ۰,۰۱۶ متر است که مقادیر خود توابع هدف به ترتیب برابر تقریباً ۰,۷۳۳۵٪ و ۰,۱۱۱۳٪ و ۰,۱۰۶ کیلووات است.

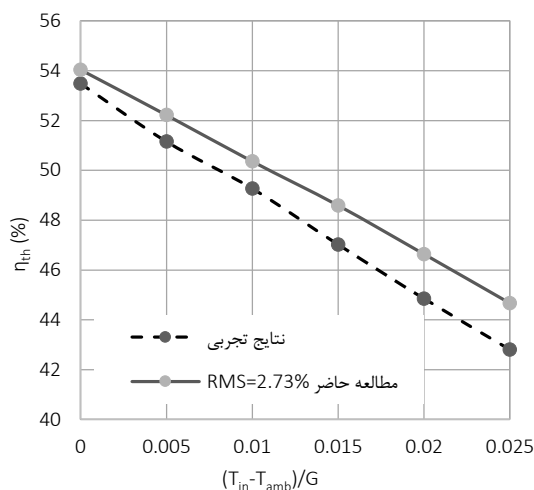
۳-۵ پیشنهادات:

- (۱) بررسی سیال عامل های مختلف مثل نانوسیال ها با درصد وزنی های متفاوت به عنوان سیال خنک کن
- (۲) ارزیابی اقتصادی سیستم مورد نظر و برآورد هزینه تمام شده آن
- (۳) انتخاب مقطع نیم لوله و آرایش حلزونی برای یک سیستم فتوولتائیک حرارتی آب خنک با توجه به اینکه بازده سیستم با آرایش حلزونی بالاتر از سیستم با آرایش مارپیچ است.

پوست

الف) اعتبارسنجی مدل مقاله [۶۰]

در شکل ۷ مقاله [۶۰] بازده حرارتی بر حسب دمای کاهیده آمده است و داده‌های موجود در جدول زیر به کمک نرم‌افزار استخراج شده است :



شکل ۷ مقاله [۶۰]: بازده حرارتی بر حسب دمای کاهیده

مقادیر خروجی از نمودار ۷ مقاله [۶۰] به کمک نرم‌افزار

η_T	$(T_{in}-T_{amb})/G$	η_T	$(T_{in}-T_{amb})/G$
0.00E+00	5.40E+01	1.18E-02	4.97E+01
5.00E-04	5.40E+01	1.33E-02	4.92E+01
5.15E-04	5.39E+01	1.37E-02	4.90E+01
8.74E-04	5.38E+01	1.47E-02	4.87E+01
1.33E-03	5.36E+01	1.50E-02	4.86E+01
1.41E-03	5.35E+01	1.52E-02	4.85E+01
1.89E-03	5.34E+01	1.56E-02	4.83E+01
2.37E-03	5.32E+01	1.61E-02	4.82E+01
3.79E-03	5.27E+01	1.75E-02	4.76E+01
4.97E-03	5.22E+01	1.89E-02	4.71E+01
5.67E-03	5.19E+01	1.98E-02	4.67E+01
6.14E-03	5.18E+01	2.00E-02	4.66E+01
6.62E-03	5.16E+01	2.03E-02	4.65E+01
7.10E-03	5.15E+01	2.08E-02	4.63E+01
8.96E-03	5.07E+01	2.26E-02	4.56E+01
9.43E-03	5.05E+01	2.31E-02	4.54E+01
9.90E-03	5.04E+01	2.35E-02	4.52E+01
1.00E-02	5.04E+01	2.40E-02	4.50E+01
1.00E-02	5.04E+01	2.43E-02	4.50E+01
1.04E-02	5.02E+01	2.47E-02	4.48E+01
1.09E-02	5.01E+01	2.50E-02	4.47E+01

سپس از طریق توسعه کد مدل با این نمودار اعتبارسنجی شد و خطای حدود ۲٪ دارد.
مقایسه بازده حرارتی در دمای کاهیده‌های متفاوت

$(T_{in}-T_{amb})/G$	η_{T-base}	η_{T-semi}
0	54	52.35
0.005	52.1	51.19
0.01	50.4	50.02
0.015	48.6	48.84
0.02	46.6	47.67
0.025	44.7	46.49
%خطا	2.058433943	

ب) مقایسه مدل نیم‌لوله طرح جدید با مدل متداول لوله کامل

مقایسه اثر دمای خروجی مدل نیم‌لوله طرح جدید با مدل متداول لوله کامل در دبی جریان متغیر

$\dot{m}$	$\eta_{T-half\ pipe}$	$\eta_{e-half\ pipe}$	η_T	η_e
0.5	67.33697	12.422	55.63012	11.90429
1	70.8809	12.59185	58.47712	12.028
1.5	72.11799	12.65257	59.46971	12.07233
2	72.74741	12.68374	59.9745	12.09515
2.5	73.1286	12.7027	60.28014	12.10906
3	73.38422	12.71546	60.48506	12.11843
3.5	73.56753	12.72462	60.632	12.12518
4	73.70542	12.73153	60.74252	12.13027

مقایسه اثر دمای خروجی مدل نیم‌لوله با لوله کامل در دمای ورودی سیال متغیر

T_{in}	$T_{out-half\ pipe}$	T_{out}
20	26.70657	25.53663
25	31.21864	30.05803
30	35.72843	34.57727
35	40.23611	39.09449
40	44.7418	43.60979
45	49.24559	48.12326

بازده‌های حرارتی و الکتریکی در حالت دمای ورودی سیال متغیر

T_{IN}	$\eta_{T-half\ pipe}$	$\eta_{e-half\ pipe}$	η_T	η_e
20	70.88064	12.59188	58.51567	12.03452
25	65.58946	12.32441	53.34825	11.80789
30	60.29957	12.05699	48.18204	11.58131
35	55.01091	11.78964	43.01696	11.35478
40	49.7234	11.52234	37.85297	11.12829
45	44.43698	11.2551	32.69	10.90184

بازده‌های حرارتی و الکتریکی در حالت دبی جریان متغیر

$\dot{m}$	$T_{OUT-half\ pipe}$	T_{OUT}
0.5	32.74256	30.49028
1	26.7066	25.51357
1.5	24.5491	23.7381
2	23.4416	22.82738
2.5	22.76771	22.27343
3	22.31449	21.90096
3.5	21.9888	21.63336
4	21.74346	21.43179

مراجع

- [۱] نگین ناصح, محمد کامرانی فر, علیرضا بیرامی, "مروری بر مهم ترین فناوری های مدیریت تولید برق و انرژی خورشیدی و ارزیابی اقتصادی آنها با تاکید بر سیستم های فتوولتاپیک و اهداف توسعه پایدار "فصل نامه علمی-ترویجی/انرژی های تجدید پذیر و نو, ص 18-9, زمستان 1396
- [۲] علیرضا اکبری, " مکان یابی بهینه نیروگاه های خورشیدی (فتوولتائیک) و توسعه تکنولوژی انرژی های تجدید پذیر در ایران " دومین همایش ملی رویکردی بر حسابداری, مدیریت و اقتصاد, فومن 23, مرداد سال 1393.
- [3] S. E. Africa-EU Renewable Energy Cooperation Programme (RECP) , 2018, "Global Market Outlook For Solar Power / 2018 - 2022" , Michael Schmela, James Watson.
- [۴] دفتر برنامه ریزی و اقتصاد کلان برق و انرژی, ترازنامه انرژی سال ۱۳۹۴, تهران, پاییز 1396
- [5] Taoufik Brahim, Abdelmajid Jemni. , 2017, "*Economical assessment and applications of photovoltaic/thermal hybrid solar technology: A review*" , *Solar Energy*, vol. 153, pp. 540-561.
- [6] Zhang, X., et al. , 2012, " *Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies*". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16(1): p. 599-617.
- [7] Aste, N., G. Chiesa, and F. Verri, 2008, "*Design, development and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PV/T) air collector*". *Renewable Energy*. 33(5): p. 914-927.
- [8] Affolter, P., et al. , 2004, " *PV/T Roadmap A European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology*". *Energy Research Centre of the Netherlands*.
- [9] Tiwari, A. and M. Sodha, 2006, " *Performance evaluation of solar PV/T system: an experimental validation*". *Solar Energy*. 80(7): p. 751-759.
- [10] Othman, M., et al. , 2006, " *Development of advanced solar assisted drying systems* ". *Renewable Energy*. 31(5): p. 703-709.
- [11] Bhaskar B Gardas, M V Tendolkar., 2012, " *Design of Cooling System for Photovoltaic Panel for Increasing Its Electrical Efficiency*" *International Conference on Mechanical and Industrial Engineering*, ISBN: 978-93-81693-89-6
- [12] Fudholi, A., et al., 2010, " *Review of solar dryers for agricultural and marine products*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14(1): p. 1-30.
- [13] Janjai, S. and P. Tung, 2005, " *Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices* ". *Renewable Energy*. 30(14): p. 2085-2095.

- [14] Sopian, K., et al., 1996, "*Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters*". Energy Conversion and Management. 37(11): p. 1657-1670.
- [15] Goh Li Jin, Adnan Ibrahim, Yee Kim Chead, Roonak Daghigh, Hafidz Ruslan, Sohif Mat, Mohd. Yusof Othman and Kamaruzzaman Sopian, , 2010," *Evaluation of Single-Pass Photovoltaic-Thermal Air Collector with Rectangle Tunnel Absorber*", Am. J. Applied Sci., 7 (2): 277-282
- [16] Tonui, J. and Y. Tripanagnostopoulos, 2007,"*Air-cooled PV/T solar collectors with low cost performance improvements*". Solar Energy. 81(4): p. 498-511.
- [17] Kalogirou, Soteris,2009," *Solar energy engineering : processes and systems*", 1st ed.. Elsevier Inc, USA,p128
- [18] Ibrahim, A., Othman, M.Y., Ruslan, M.H., Alghoul, M.A., Yahya, M., Zaharim, A., Sopian, K., 2009. "*Performance of photovoltaic thermal collector (PV/T) with different absorbers design*". WSEAS Transactions on Environment and Development, 5, pp. 321-330.
- [19] Lovedeep Sahota., G.N. Tiwari , 2017, "*Review on series connected photovoltaic thermal (PVT) systems: Analytical and experimental studies*," Solar Energy 150, pp. 96-127.
- [20] A. H. A. Al-waeli, K. Sopian, H. A. Kazem, M. T. Chaichan, , 2017 "*Photovoltaic/Thermal (PV/T) systems : Status and future prospects*," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 77, no. March, pp. 109–130.
- [21] R. Daghigh, A. Ibrahim, G. Li, M. Hafidz, K. Sopian, 2011,"*Predicting the performance of amorphous and crystalline silicon based photovoltaic solar thermal collectors*," Energy Convers. Manag., vol. 52, no. 3, pp. 1741–1747.
- [22] M. Zohri, L. D. Bakti, A. Fudholi, 2018, "*Exergy Assessment of Photovoltaic Thermal with V-groove Collector Using Theoretical study*," Telkomnika, vol. 16, no. 2, pp. 550–557.
- [23] M. Zohri, A. Fudholi, 2017, "*Photovoltaic-Thermal (PVT) System with and Without Fins Collector : Theoretical Approach*," International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), vol. 8, no. 4, pp. 1756–1763.
- [24] A. Fudholi, K. Sopian, , 2018 "*Review on Solar Collector for Agricultural Produce*," International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), vol. 9, no. 1, pp. 414–419.
- [25] H. A. Zondag, D. W. D. E. Vries, W. G. J. V. A. N. Helden, R. J. C. V. A. N. Zolingen, A. A. V. A. N. Steenhoven, , 2002 ,"*The thermal and electrical yield of a pv-thermal collector*" , Solar Energy, vol. 72, no. 2, pp. 113–128.
- [26] B. Agrawal, d G. N. Tiwari, 2010, "*Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions*" ,Appl. Energy, vol. 87, no. 2, pp. 417–426.

- [27] M. N. Abu Bakar, M. Othman, M. Hj Din, N. A. Manaf, H. Jarimi, 2014, "*Design concept and mathematical model of a bi-fluid photovoltaic/thermal (PV/T) solar collector*," *Renew. Energy*, vol. 67, pp. 153–164.
- [28] S. Dubey, G. N. Tiwari, 2008, "*Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV / T) solar water heater*," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 602–612.
- [29] A. A. Hegazy, 2000. "*Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors*", *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 8, pp. 861–881.
- [30] Abdel-Khalik, S., 1976. "*Heat removal factor for a flat-plate solar collector with a serpentine tube*". *Solar Energy*, 18, pp. 59-64.
- [31] Wolf M, 1976, "*Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences*". *Energy Convers*;16:79–90.
- [32] Kern, E.C., Russell, M.C., 1978. "*Combined photovoltaic and thermal hybrid collectorsystems*". In: *Photovoltaic Specialists Conference*. Washington, DC, USA, pp.1153-1157.
- [33] Florschuetz, L.W, 1979. "*Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of the combined photovoltaic/thermal flat plate collectors*". *Sol. Energy* 22, 361–366.
- [34] Prakash J. 1994, "*Transient analysis of a photovoltaic-thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air/water*", *Energy convers. Mgmt.* 35, ():967-972.
- [35] Nahar, A., Hasanuzzaman, M., Rahim, N.A., 2017. "*Numerical and experimental investigation on the performance of a photovoltaic thermal collector with parallel plate flow channel under different operating conditions in Malaysia*". *Sol. Energy* 144, 517–528.
- [36] Moreno, D., Fernández, M., Esquivias, P.M., 2017. "*A comparison of closed-form and finite- element solutions for heat transfer in a nearly horizontal, unglazed flat plate PVT water collector: performance assessment*". *Sol. Energy* 141, 11–24.
- [37] Zhou, J., Yi, Q., Wang, Y., Ye, Z., 2015. "*Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation*". *Sol. Energy* 111, 97–103.
- [38] Zhou, J.-C., Zhang, Z., Liu, H.-J., Yi, Q., 2017. "*Temperature distribution and back sheet role of polycrystalline silicon photovoltaic modules*". *Appl. Therm. Eng.* 111, 1296–1303.
- [39] Bahaidarah, H.M.S., Baloch, A.A.B., Gandhidasan, P., 2016. "*Uniform cooling of photovoltaic panels: a review*". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57, 1520–1544.
- [40] Hendrie SD. 1979, "*Evaluation of combined photovoltaic thermal collectors*". In: *ISES international congress and silver jubilee*;. p. 1865–1869

- [41] Huang B.J., 2001 "Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal system". Solar Energy Vol. 70, No. 5, pp. 443–448.
- [42] Ji, J., Lu, J.P., Chow, T.T., He, W., Pei, G., 2007. "A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation". Applied Energy, 84, pp. 222-237.
- [43] M. Boubekri, A. Chaker, A. Cheknane, 2008, "Numerical approach for performance study of hybrid PV/Thermal collector", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, pp. 388-315.
- [44] S. Dubey, A.A. Tay, 2013, "Testing of two different types of photovoltaic–thermal (PV/T) modules with heat flow pattern under tropical climatic conditions", Energy for Sustainable Development, Vol. 17, pp. 1-12.
- [45] Javad Yazdanpanahi, Faramarz Sarhaddi, 2015, "Mohsen Mahdavi Adeli, Experimental investigation of exergy efficiency of a solar photovoltaic thermal (PVT) water collector based on exergy losses", Solar Energy 118, 197–208.
- [46] Zondag, H.A., Vries, D.W. de, Helden, W.G.J. van, Zolingen, R.J.C. van, Steenhoven, A.A. van, 2003. "The yield of different combined PV-thermal collector designs", solar energy, 74, pp. 253-269.
- [47] Sopian, K., Othman, Y., Zaidi, S. H., Ruslan, Mohd H., 2005. "Advanced Absorber Design for Photovoltaic Thermal (PV/T) Collectors". Recent Researches in Energy, Environment and Landscape Architecture.
- [48] R. Santbergen, et al., 2010, "Detailed analysis of the energy yield of systems with covered sheet-and-tube PV/T collectors", Solar Energy, Vol. 54, pp. 517-575.
- [49] P. Charalambous, et al., 2011, "Optimization of the photovoltaic thermal (pv/t) collector absorber", Solar Energy, Vol. 58, pp. 571-550.
- [50] N. S. Nazri, A. Fudholi, M. H. Ruslan, K. Sopian, "Mathematical Modeling of Photovoltaic Thermal-Thermoelectric (PVT-TE) air collector", International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), vol. 9, no. 2, pp. 795–802, 2018.
- [51] M. Rosli, et al., 2014, "Parametric Analysis on Heat Removal Factor for a Flat Plate Solar Collector of Serpentine Tube", World Applied Sciences Journal, Vol. 28, pp. 154-157.
- [52] Niccolo Aste, Claudio Del Pero, Fabrizio Leonforte., Massimiliano Manfren, 2016, "Performance monitoring and modeling of an uncovered photovoltaic-thermal (PV/T) water collector", Solar Energy 135, 551–568
- [53] Muhammad O. Lari, Ahmet Z. Sahin. 2017, "Design, performance and economic analysis of a nanofluid-based photovoltaic/thermal system for residential applications", Energy Conversion and Management 149, 467–484

- [54] N.Aste, C. Del Pero, F. Leonforte, 2017, "Water PV/T collectors performance comparison", The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016, Energy Procedia 105 , 961 – 966
- [55] Guilherme Zanlorenzi, Anderson L. Szejka, Osiris Canciglieri Junior, 2018, "Hybrid photovoltaic module for efficiency improvement through an automatic water cooling system: A prototype case study" , urnal of Cleaner Production 196 , 535e546
- [56] Ruobing Liang, Qiangguang Pan, Peng Wang, Jili Zhang , 2018, "Experiment research of solar PV/T cogeneration system on the building façade driven by a refrigerant pump" , Energy , Volume 161, Pages 744-752
- [57] Subhadeep Bhattacharjee , Shantanu Acharya , Anil Potar , Anurag Meena , Dhara Singh Bairwa , Dinesh Meena , Manish Bhagora , Pukhraj Meena , Prashant Kumar Gautam 2018 , "An investigational back surface cooling approach with different designs of heat-absorbing pipe for PV/T system" . Int J Energy Res; 1–13.
- [58] Mohammad Hosseinzadeh, Ali Salari, Mohammad Sardarabadi, Mohammad Passandideh-Fard. 2018, "Optimization and parametric analysis of a nanofluid based photovoltaic thermal system: 3D numerical model with experimental validation" . Energy Conversion and Management 160 , 93–108
- [59] Mohammad Sardarabadi , Mohammad Hosseinzadeh , Arash Kazemian , Mohammad Passandideh-Fard, 2017, " Experimental investigation of the effects of using metal-oxides/water nanofluids on a photovoltaic thermal system (PV/T) from energy and exergy viewpoints" , Energy, Volume 138, Pages 682-695
- [۶۰] علیرضا نورپور، مهدی شکوری، سودابه گلزاری، محمد ضامن. " شبیه سازی انرژی و تحلیل پارامتری سیستم فتوولتائیک حرارتی (PV/T) آب خنک" ، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۲۰ شهریور سال ۱۳۹۶
- [61] A. Tiwari, et al., 2009, "Exergy analysis of integrated photovoltaic thermal solar water heater under constant flow rate and constant collection temperature modes" , Applied Energy, Vol. 86, pp. 2592-2597.
- [62] J. Duffie, and W. Beckman, 1980, "Solar engineering of thermal Processes", JohWiley, New York.
- [63] T. Chow, 2003, " Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model" , Solar Energy, Vol. 75, pp. 143-152.
- [64] J. Ji, et al., 2009, " Distributed dynamic modeling and experimental study of PV evaporator in a PV/T solar-assisted heat pump, International Journal of Heat and Mass Transfer" , Vol. 52, pp. 1365-1373.
- [65] Matin Ghadiri a, Mohammad Sardarabadi b, Mohammad Pasandideh-fard b, Ali Jabari Moghadam, 2015, "Experimental investigation of a PVT system performance using nano ferrofluids". Energy Conversion and Management 103 , 468–476

- [66] Sajjan Preet, 2018, "Water and phase change material based photovoltaic thermal management systems: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 791–807
- [67] Cao, Kai, Batty, Michael, Huang, Bo, Liu, Yan, Yu, Le. & Chen, Jiongfeng. 2011, "Spatial Multi- Objective Land-use Optimization: Extensions to the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II". International Journal of Geographic Information Science, No. 25 (12), Pp. 1949-1969.
- [68] Huy, Man Quang, Kappas, Martin., 2010, "Developing multi objective linear programming (MOLP) to improve the decision making of land use planning". 31st Asian Conference on Remote Sensing (ACRS) 2010, Hanoi, Vietnam, November 1-5, pp. 647-652.
- [69] Qian, Min., Pu, Lijie, Zhu, Ming. & Weng, Lingyan., 2010, "Spatial Optimization Method for Sustainable Multi-objective Land Use Allocation". 18th International Conference on Geoinformatics, Beijing, China, June 18-20, Pp. 1-6.
- [۷۰] بهرام امین زاده گوهرریزی, سعید توحیدی راد, روشنگر اسدی, ۱۳۹۵, "به کارگیری الگوریتم NSGA-II برای حل مسائل مکانیابی چندهدفه", فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات شهری, شماره ۱۹, تابستان, صفحه ۱۵-۲۶
- [71] Coello Coello, Carlos A., Lamont, Gary B. & Van Veldhuizen, David A. 2007, "Evolutionary Algorithms for Solving Multi-objective Problems", 2th edn, New York, Springer.
- [72] Bennett, David A., Wade, Greg A., Armstrong, Marc P., 1999, "Exploring the Solution Space of Semi-structured Geographical Problems Using Genetic Algorithms". Transactions in GIS, No. 3(1), Pp. 51-71.
- [73] Alborzi, M., 2009, "Genetic Algorithm", Tehran, Sharif university.
- [74] Bui, Lam Thu, Alam, Sameer. 2008, "Multi-Objective Optimization in Computational Intelligence: Theory and Practice (Premier Reference Source)", New York, Information Science Reference.
- [75] Masumi, Z., Mansourian, A. & Mesgari, M., 2010, "Application of Multi-Objective Genetic Algorithm in the industrial locating studies". Journal of Iranian RS & GIS society, No. 4(2), Pp. 1-22.
- [76] J. Tamayo Vera, T. Laukkanen, K. Siren, 2017, "Performance evaluation and multi-objective optimization of hybrid photovoltaic-thermal collectors", Solar Energy 102, 223–233

Abstract

The use of photovoltaic panels for the production of electricity in the world is rapidly expanding and is one of the most important sources of renewable energy for the future energy supply of the world. The efficiency of photovoltaic cells in the world is usually below 20%, so researchers are always looking for ways to increase this efficiency. Since the efficiency of photovoltaic cells decreases with increasing temperature, one of these methods is the cooling of the cells. If absorbed heat can also be used, panels are called PhotoVoltaic Thermal or PV/T. This cooling can be done by water, air or other fluids that use the water and air is the most commonly used option.

In this research, a photovoltaic thermal (PV/T) panel has been modeled. A selective system arrangement is based on a serpentine sheet and tube collector assembly, which was cooled through a half-pipe instead of using a pipe connected to the back panel plate. On the other hand, instead of the cells on polymer substrate (Tedlar) have been on a metal substrate.

Using these methods of thermal resistance is reduced and minimized. The modeling of this system is carried out in MATLAB software environment and the proposed model is validated with experimental data from a laboratory sample made at Shahrood University of Technology Energy Lab.

Then, the parametric analysis of the model has been done and to achieve a more suitable design, multi-objective optimization has been made regarding the thermal and electrical efficiency and the pressure drop. The overall results show that the efficiency of panels with this cooling method increased from 10% to 12%. On the other hand, based on the absorbed heat, the overall efficiency of the panel (total thermal and electrical) at peak hours of up to 80% can be achieved.

Keywords: Photovoltaic thermal panel water cooling, serpentine sheet-tube structure, Modeling, Electrical and Thermal efficiency, Optimization



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy System Engineering

Optimization and Modeling and validation of Plate and Spiral Tube Water Cooled Photovoltaic/Thermal (PV/T) System

By: Samaneh Kiani Fard

Supervisors:

Dr. Ali Abbas Nejad

Dr. Mohammad Zamen

January 2019