

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



موسسه آموزش عالی انرژی

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی

عنوان

**بهینه سازی عددی پارامترهای فیزیکی لوله جاذب
در سیستم های متمرکز کننده سهموی خطی در
راستای افزایش راندمان**

استاد راهنما:

دکتر علی شامل

اساتید مشاور:

دکتر رضا علایی

دکتر اسکندر جمالی

پژوهشگر:

سید محمد جواد تهامی

۱۳۹۶/۰۳

تشکر و قدردانی :

با سپاس فراوان از راهنمائی‌ها و زحمات استاد محترم و گرانقدر جناب آقای دکتر علی شامل

که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمائی‌های خود مرا در نگارش این اثر یاری

نمودند و همچنین قدردانی و تقدیر از اساتید بزرگوار، جناب آقای دکتر رضا علائی و دکتر

اسکندر جمالی اساتید محترم مشاور که با هدایت و حمایت‌های بی دریغشان یاری‌ام نمودند.

تقدیم به:

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام
است

به استوارترین تکیه گاهم ، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم ، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره ای از دریای بی کران
مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم .

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم ، باشد که حاصل تلاشم نسیم
گونه، غبار خستگیان را بزدايد .

بوسه بر دستان پرمهرتان

چکیده:

در این تحقیق ، به بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای فیزیکی لوله جاذب یک کلکتور سهموی خطی پرداخته شده است که ابتدا انواع کلکتورهای خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته و سپس به بررسی جامع کلکتور سهموی خطی پرداخته شده و مدل ریاضی انتقال حرارت در لوله جاذب کلکتور براساس مراجع معتبر ارائه گردیده است.

در ادامه با کمک نرم افزار متلب حل عددی معادلات مربوط به لوله جاذب انجام شده و تاثیر پارامترهای فیزیکی لوله جاذب بر روی بازده آن بررسی شده است. نهایتا با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پارامترهای فیزیکی لوله جاذب برای رسیدن به راندمان ماکزیمم براساس قیدهای موجود بهینه گردیده است و از نتایج می توان به این مورد اشاره نمود که افزایش طول لوله جاذب اثر نامطلوب بر روی راندمان لوله جاذب داشته و با افزایش آن، راندمان کاهش می‌یابد که این کاهش به صورت غیر خطی خواهد بود.

کلمات کلیدی : لوله جاذب ، کلکتور سهموی خطی ، راندمان اگزرژی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	
۱-۱ : مقدمه	۱
۲-۱: مزایای نیروگاههای حرارتی خورشیدی	۴
۳-۱: انواع نیروگاههای خورشیدی بر اساس متمرکز کننده ها:	۶
۳-۱-۱: نیروگاههای خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده سهموی خطی (Parabolic Trough)	۷
۳-۱-۱-۱: اجزاء اصلی نیروگاههای سهموی خطی	۱۳
۳-۱-۱-۲: مزایای نیروگاه سهموی خطی	۱۴
۳-۱-۱-۳: معایب نیروگاه سهموی خطی	۱۵
۳-۱-۱-۴: نمونه هایی از نیروگاههای سهموی خطی	۱۵
۳-۱-۲: نیروگاههای خورشیدی با استفاده از دریافت کننده مرکزی (CRS)	۱۹
۳-۱-۲-۱: انواع سیالات مورد استفاده در دریافت کننده مرکزی :	۲۱
۳-۱-۲-۲: اجزاء اصلی نیروگاههای دریافت کننده مرکزی	۲۲
۳-۱-۲-۳: مزایا و معایب نیروگاه دریافت کننده مرکزی	۲۶
۳-۱-۳: نیروگاههای خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده دیش استرلینگ (Sterling Dish)	۲۷
۳-۱-۳-۱: اجزاء اصلی نیروگاههای دیش استرلینگ	۲۹
۳-۱-۳-۲: مزایای نیروگاه دیش استرلینگ	۳۰
۳-۱-۳-۳: معایب نیروگاه دیش استرلینگ	۳۰
۳-۱-۳-۴: نمونه هایی از نیروگاه های دیش استرلینگ	۳۰
۳-۱-۴: نیروگاههای خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده دودکش خورشیدی	۳۲
۳-۱-۴-۱: نیروگاه های خورشیدی با سیستم برج های نیرو با هوای گرم	۳۲
۳-۱-۴-۱-۱: مزایای نیروگاههای خورشیدی سیستم برج های نیرو با هوای گرم :	۳۴
۳-۱-۴-۱-۲: معایب نیروگاههای خورشیدی سیستم برج های نیرو با هوای گرم :	۳۵

- ۳-۴-۳-۱: نیروگاه خورشیدی با سیستم برج های نیرو با هوای سرد ۳۵
- ۳-۴-۳-۱: مزایا نیروگاه های خورشیدی با سیستم برج های نیرو با هوای سرد : ۳۶
- ۳-۴-۳-۱: معایب نیروگاه های خورشیدی با سیستم برج های نیرو با هوای سرد : ۳۶
- ۳-۴-۳-۱: اجزاء اصلی یک دودکش خورشیدی ۳۷
- ۳-۴-۳-۱: نمونه هایی از نیروگاههای برج خورشیدی ۳۹
- ۳-۴-۱: نیروگاه های خورشیدی با استفاده از کلکتورهای فرنل (Fresnel Collector) ۴۲
- ۳-۴-۱: مزایای نیروگاه کلکتورهای فرنل ۴۳
- ۳-۴-۱: ایراد اصلی نیروگاه کلکتورهای فرنل ۴۴
- ۴-۱: بررسی تلفات متمرکز کننده ها ۴۴

فصل دوم : سیستم های سهموی خطی

- ۱-۲ روابط عملکرد حرارتی کلکتور ۴۸
- ۱-۱-۲ نسبت ها و پارامترهای هندسی کلکتور ۴۸
- ۲-۱-۲ شار تشعشعی جذب شده توسط لوله جاذب ۵۱
- ۳-۱-۲ محاسبه حرارت مفید جذب شده ۵۴
- ۲-۲ تحلیل اپتیکی متمرکز کننده ۵۷
- ۱-۲-۲ منشا خطاهای اپتیکی ۵۷
- ۲-۲-۲ بدست آوردن ضریب دریافت (γ) ۶۰
- ۳-۲-۲ بررسی تغییرات ضریب دریافت γ ۶۲
- ۴-۲-۲ محاسبه ضرایب انتقال حرارت و افت فشار ۶۶
- ۵-۲-۲ محاسبه ضریب افت حرارت ۶۷
- ۶-۲-۲ محاسبه ضریب جمع آوری حرارت ۷۳
- ۷-۲-۲ محاسبه افت فشار ۷۶
- ۳-۲ تعادل انرژی برای کلکتور خورشیدی ۷۷
- ۱-۳-۲ انرژی ورودی ۷۷
- ۱-۳-۲ انرژی ورودی تشعشعی : ۷۸
- ۲-۱-۳-۲ انرژی جریان سیال ورودی : ۷۸
- ۲-۳-۲ انرژی ذخیره شده : ۷۹

۷۹	.....اگرژی خروجی: ۳-۳-۲
۷۹	.....اگرژی نشتی: ۴-۳-۲
۸۰	.....اگرژی تخریب شده: ۵-۳-۲
۸۰	.....اگرژی تخریب شده توسط افت فشار: ۱-۵-۳-۲
۸۱	.....اگرژی تخریب شده به سبب جذب تشعشع خورشید: ۲-۵-۳-۲
۸۲	.....اگرژی تخریب شده به سبب هدایت حرارتی: ۳-۵-۳-۲
۸۵	.....۴-۲ معادلات نهایی عملکرد کلکتور
۸۹	.....۵-۲ تحلیل حرارتی و اگرژی متمرکزکننده و نتایج
۹۵	.....۱-۵-۲ بررسی تغییرات راندمان اگرژی
۱۰۰	.....۲-۵-۲ بررسی اثرشدت تابش و دمای محیط بر جابجایی نقطه بهینه
۱۰۶	.....۳-۵-۲ بررسی مقدار و تغییرات افت های اگرژی
۱۱۲	.....۴-۵-۲ بررسی تاثیر استفاده از روشهای بهبود انتقال حرارت در راندمان اگرژی
	فصل سوم : پیشینه پژوهش.
	فصل چهارم: روش تحقیق
۱۳۲	.....۱-۴ مقدمه
۱۳۲	.....۲-۴ طراحی کلکتور خورشیدی
۱۳۴	.....۳-۴ قسمتهای اصلی کلکتورهای سهموی:
۱۳۴	.....۱-۳-۴ آینه ها (پانل های بازتابش نور خورشید)
۱۳۴	.....۲-۳-۴ گیرنده (لوله جاذب نور خورشید)
۱۳۵	.....۳-۳-۴ سیستم ردیابی خورشید
۱۳۶	.....۴-۴ مفهوم اگرژی و راندمان اگرژی کلکتور
۱۳۷	.....۵-۴ تحلیل حرارتی
۱۴۱	.....۶-۴ تحلیل اپتیکی
۱۴۱	.....۷-۴ تحلیل اگرژی
۱۴۵	.....۸-۴ مدل ترمو-ریاضی کلکتور خورشیدی سهموی خطی

۱۴۵	..... ۱-۸-۴ توضیح سیستم
۱۴۶	..... ۲-۸-۴ مدل تابش خورشیدی بر روی سیستم رهگیر
۱۴۷	..... ۳-۸-۴ آنالیز اپتیکی
۱۴۸	..... ۴-۸-۴ آنالیز حرارتی دستگاه گیرنده
۱۴۸	..... ۵-۸-۴ تحلیل اتلاف حرارتی
۱۵۰	..... ۶-۸-۴ آنالیز انتقال حرارت در سیال کاری
۱۵۳	..... ۷-۸-۴ رسانش حرارتی از داخل جاذب
۱۵۳	..... ۸-۸-۴ انتقال حرارت در لوله جاذب
	فصل پنجم: نتایج
۱۵۸	..... ۱-۵ نتایج شبیه سازی
۱۶۲	..... ۲-۵ نتایج مربوط به تحلیل اگزرژی
۱۶۴	..... ۳-۵ فرایند بهینه سازی
۱۶۴	..... ۱-۳-۵ کروموزوم
۱۶۴	..... ۲-۳-۵ جمعیت
۱۶۵	..... ۳-۳-۵ تابع برازندگی
۱۶۵	..... ۴-۳-۵ روند کلی الگوریتم های ژنتیکی
۱۶۶	..... ۵-۳-۵ روند کلی بهینه سازی و حل مسائل در الگوریتم ژنتیک
۱۶۸	..... ۶-۳-۵ شرط پایان الگوریتم
۱۷۳	..... ۴-۵ نتیجه گیری
۱۷۵	..... فهرست منابع و مآخذ
۱۷۹	..... Abstract

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۱): جزئیات اطلاعات بزرگترین نیروگاه های سهموی خطی.....	۱۷
جدول (۲-۱): جزئیات اطلاعات بزرگترین نیروگاه های دریافت کننده مرکزی.....	۲۶
جدول (۱-۲): مقادیر متوسط پارامتر های خطای اپتیکی.....	۶۲
جدول (۲-۲): ثابت های معادله (۵۳-۲).....	۷۱
جدول (۱-۴): مشخصات ماژول کلکتور سهموی خطی.....	۱۴۶
جدول (۲-۴) مشخصات فنی سیال Renolin Therm 320.....	۱۵۱
جدول (۱-۵) مقادیر بهینه به دست آمده از الگوریتم ژنتیک.....	۱۷۳

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۱): نیروگاه سهموی خطی.....	۷
شکل (۲-۱): کلکتورهای نیروگاه خورشیدی شیراز.....	۸
شکل (۳-۱): طرحواره ی کلکتورهای سهموی خطی.....	۸
شکل (۴-۱): شماتیکی از سیکل هیبرید سازی نیروگاه خورشیدی.....	۱۳
شکل (۵-۱): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی سولانا.....	۱۷
شکل (۶-۱): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی سولابن.....	۱۸
شکل (۷-۱): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی یزد.....	۱۸
شکل (۸-۱): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی شمس ۱.....	۱۸
شکل (۹-۱): نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از دریافت کننده مرکزی.....	۱۹
شکل (۱۰-۱): طرحواره بشقاب خورشیدی.....	۲۹
تصویر (۱۱-۱): نیروگاه دودکش خورشیدی.....	۳۲
شکل (۱۲-۱): شماتیک عملکرد نیروگاههای حرارتی دودکش خورشیدی.....	۳۳
شکل (۱۳-۱): برج و هلیوستاتهای مورد استفاده در نیروگاه های سولار ۱ و ۲.....	۴۰
شکل (۱۴-۱): طرحواره نیروگاه برج خورشیدی و اجزای آن.....	۴۰
شکل (۱۵-۱): نیروگاه های برج خورشیدی ۱۰PS (جلو) و ۲۰PS (عقب) در اسپانیا.....	۴۱
شکل (۱۶-۱): نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از کلکتورهای فرنل.....	۴۲
شکل (۱-۲): مقطع عمود بر محور متمرکز کننده در مختصات $x-y$	۴۹
شکل (۲-۲): سطح مقطع ورود شار تشعشعی خورشید در متمرکز کننده.....	۵۱

- شکل (۳-۲): المان حجم کنترل برای لوله گیرنده کلکتور..... ۵۲
- شکل (۴-۲): نحوه ی انحراف مسیر توزیع شار تشعشی خورشید..... ۵۸
- شکل (۵-۲): نحوه ی تاثیرپذیری پهنای خورشید در وجود خطاهای اپتیکی..... ۵۹
- شکل (۶-۲): نمایش خطاهای اپتیکی بر روی متمرکزکننده سهموی..... ۵۹
- شکل (۷-۲): منحنی های تغییرات γ برای φr های مختلف..... ۶۴
- شکل (۸-۲): متمرکزکننده سهموی با یک کانون ثابت و با زوایای دور مختلف..... ۶۵
- شکل (۹-۲): نمودار تغییرات γ برای تغییرات β^* , d^* ۶۶
- شکل (۱۰-۲): اجزای مقاومتهای حرارتی در مسیرهای افت و جمع آوری انتقال حرارت..... ۶۶
- شکل (۱۱-۲): مقاومت های معادل حرارتی در مسیرهای انتقال حرارت..... ۶۷
- شکل (۱۲-۲): تغییرات UI بر حسب فاصله بین لوله فلزی و پوشش شیشه ای..... ۷۳
- شکل (۱۳-۲): نمای شماتیک از جریان های اگزرژی در کلکتور خورشیدی..... ۷۷
- شکل (۱۴-۲): پارامترهای ورودی جهت حل دستگاه معادلات عملکردی کلکتور..... ۸۸
- شکل (۱۵-۲): رویه تغییرات راندمان قانون اول بر حسب دمای ورودی..... ۹۲
- شکل (۱۶-۲): منحنی های تغییرات راندمان قانون اول بر حسب نسبت تمرکز و دمای ورودی..... ۹۲
- شکل (۱۷-۲): رویه تغییرات راندمان قانون اول بر حسب دبی جرمی و پوشش شیشه ای..... ۹۴
- شکل (۱۸-۲): منحنی های تغییرات راندمان قانون اول بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای..... ۹۵
- شکل (۱۹-۲): رویه تغییرات راندمان اگزرژی بر حسب دمای ورودی و نسبت تمرکز..... ۹۷
- شکل (۲۰-۲): منحنی های تغییرات راندمان اگزرژی بر حسب دمای ورودی و نسبت تمرکز..... ۹۷
- شکل (۲۱-۲): رویه تغییرات راندمان اگزرژی بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای..... ۹۹
- شکل (۲۲-۲): منحنی های تغییرات راندمان اگزرژی بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای..... ۹۹
- شکل (۲۳-۲): تغییرات راندمان ها بر حسب دمای ورودی کلکتور..... ۱۰۰
- شکل (۲۴-۲): تغییرات راندمان اگزرژی بهینه بر حسب شدت تابش..... ۱۰۱

- شکل (۲-۲۵): تغییرات دمای ورودی بهینه بر حسب شدت تابش..... ۱۰۲
- شکل (۲-۲۶): تغییرات دبی جرمی بهینه بر حسب شدت تابش..... ۱۰۲
- شکل (۲-۲۷): تغییرات نسبت تمرکز بهینه بر حسب شدت تابش..... ۱۰۲
- شکل (۲-۲۸): تغییرات قطر پوشش بهینه بر حسب شدت تابش..... ۱۰۳
- شکل (۲-۲۹): تغییرات راندمان ها بر حسب تغییرات دمای محیط..... ۱۰۴
- شکل (۲-۳۰): تغییرات دمای ورودی و نسبت تمرکز بر حسب تغییرات دمای محیط..... ۱۰۴
- شکل (۲-۳۱): تغییرات دبی جرمی و قطر پوشش بهینه بر حسب تغییرات دمای محیط..... ۱۰۵
- شکل (۲-۳۲): تغییرات راندمان و افت های اگزرژی بر حسب دمای ورودی..... ۱۰۹
- شکل (۲-۳۳): تغییرات راندمان و افت های اگزرژی بر حسب نسبت تمرکز..... ۱۱۰
- شکل (۲-۳۴): تغییرات راندمان و افت های اگزرژی بر حسب دبی جرمی..... ۱۱۱
- شکل (۲-۳۵): تغییرات راندمان و افت های اگزرژی بر حسب قطر پوشش شیشه ای..... ۱۱۲
- شکل (۴-۱): تصویر تابش خورشید و انعکاس آن..... ۱۳۳
- شکل (۴-۲): کلکتور خورشیدی..... ۱۳۳
- شکل (۴-۳): شماتیک کلکتور سهموی خطی با سامانه رهگیر خورشیدی..... ۱۴۵
- شکل (۴-۴): آنالیز انتقال حرارت برای یک حجم کنترل در گیرنده..... ۱۴۹
- شکل (۴-۵): سطح مقطع لوله گیرنده و شبکه مقاومتی آن..... ۱۵۲
- شکل (۴-۶): شمای لوله جاذب..... ۱۵۴
- شکل (۵-۱): تغییرات بازده لوله جاذب بر حسب قطر خارجی..... ۱۵۹
- شکل (۵-۲): تغییرات بازده لوله جاذب بر حسب دمای رسیور لوله جاذب..... ۱۶۰
- شکل (۵-۳): تغییرات بازده لوله جاذب بر حسب ضریب گسیل پذیری لوله جاذب..... ۱۶۱
- شکل (۵-۴): تغییرات بازده لوله جاذب بر حسب طول لوله جاذب..... ۱۶۱

- شکل (۵-۵) تغییرات بازده لوله جاذب برحسب شدت تابش..... ۱۶۲
- شکل (۶-۵) تغییرات آگزرژی اتلاف بهینه برحسب طول لوله جاذب..... ۱۶۳
- شکل (۷-۵) تغییرات آگزرژی اتلاف بهینه برحسب دمای رسیور لوله جاذب..... ۱۶۳
- شکل (۸-۵) کد برنامه مجازی الگوریتم ژنتیک ساده و فلوچارت آن..... ۱۶۶
- شکل (۹-۵) نحوه ارزیابی تابع شایستگی در چرخ رولت..... ۱۶۷

فهرست علائم و اختصارات (abbreviations)

\dot{Q}_u	حرارت مفید جذب شده توسط سیال در کلکتور	HTF	سیال انتقال حرارت
F'	ضریب راندمان کلکتور	C	نسبت تمرکز
\dot{m}	دبی جرمی سیال	D	قطر خارجی لوله جذب کننده
C_p	گرمای ویژه سیال	T_p	دمای متوسط سطح خارجی لوله جذب کننده
F_R	ضریب برداشت حرارت	T_c	دمای متوسط پوشش شیشه ای
γ	ضریب دریافت متمرکز کننده	T_a	دمای محیط
U_l	ضریب افت حرارت	T_p	دمای محلی سیال
U_o	ضریب جمع آوری حرارت	Ib	شار تشعشعی خورشید
D_c	قطر پوشش شیشه ای	H	راندمان اپتیکی کلکتور
k_{eff}	ضریب هدایت حرارتی موثر	h_w	ضریب جابجایی انتقال حرارت
$E_{i,th}$	اگررژی تشعشعی خورشید	F	ضریب اصطکاک
$E_{i,f}$	اگررژی جریان سیال ورودی	η_p	راندمان پتلا
h_f	ضریب انتقال حرارت جابجایی درون مجاری	$I_b(t)$	شدت تابش متغیر با زمان
δ_a	چسب متصل کننده مجاری به صفحه جذب کننده	δ_p	ضخامت متوسط صفحه جذب کننده

k_a	چسب متصل کننده مجاری به صفحه جذب کننده	k_p	ضریب هدایت گرمایی صفحه جذب کننده
U_l	ضریب افت حرارت کلی	A_p	مساحت سطح کلکتور
δ_e	ضخامت عایق جانبی کلکتور	δ_b	ضخامت عایق پایین کلکتور
ΔP_{in}	اختلاف فشار سیال عامل با محیط در ورود به کلکتور	I_T	دمای متوسط سطح خارجی لوله جذب کننده
θ_z	زاویه زنیت	ΔP_{out}	اختلاف فشار سیال عامل با محیط در خروج از کلکتور
Φ_r	زاویه دور سهمی	A	فاصله کانونی سهمی
L	طول دهانه متمرکز کننده سهموی خطی	W	عرض دهانه متمرکز کننده سهموی خطی
ρ	ضریب انعکاس آینه	A_c	مساحت کل متمرکز کننده سهموی خطی
a	ضریب جذب سطح خارجی لوله	$T\tau$	ضریب عبور تشعشع از پوشش شیشه ای
C_p	گرمای ویژه سیال	S	شار تشعشعی جذب شده توسط گیرنده
$E_{i,th}$	اگررژی تشعشعی خورشید	U_c	ضریب کلی انتقال حرارت بین سطح خارجی لوله و سیال
$T_{(x)}$	دمای سیال بر حسب طول	T_{in}	دمای سیال در ورود به کلکتور
σ_{sun}	انحراف معیار خطای پهنای خورشید	\dot{Q}_u	کل حرارت مفید جذب شده
σ_{stop}	خطای شیب های آینه	σ_{mir}	خطای پخش آینه

فصل اول

مقدمه

۱-۱: مقدمه

شناخت انرژی خورشیدی و استفاده از آن برای منظوره‌های مختلف به زمان ماقبل تاریخ باز می‌گردد. شاید به دوران سفالگری، در آن هنگام روحانیون معابد با استفاده از جامه‌های بزرگ طلایی صیقل داده شده و اشعه خورشید، آتشدان‌های محرابها را روشن می‌کردند. یکی از فراغنه مصر معبدی ساخته بود که با طلوع خورشید درب آن باز و با غروب خورشید درب بسته می‌شد ولی مهمترین روایتی که درباره استفاده از خورشید بیان شده داستان ارشمیدس دانشمند و مخترع بزرگ یونان قدیم می‌باشد که ناوگان روم را با استفاده از انرژی حرارتی خورشید به آتش کشید، گفته می‌شود که ارشمیدس با نصب تعداد زیادی آئینه‌های کوچک مربعی شکل در کنار یکدیگر که روی یک پایه متحرک قرار داشته است اشعه خورشید را از راه دور روی کشتیهای رومیان متمرکز ساخته و به این ترتیب آنها را به آتش کشیده است. در ایران نیز معماری سنتی ایرانیان باستان، نشان دهنده توجه خاص آنان در استفاده صحیح و مؤثر از انرژی خورشید در زمان‌های قدیم بوده است. (۳)

حدود ۱۸۰۰ سال پس از ارشمیدس شخصی به نام کیرشهف^۱ شاهکار ارشمیدس را تکرار کرد و با استفاده از تعدادی آئینه، یک لنگرگاه چوبی را از فاصله دور آتش زد. در سال ۱۶۱۵ سالمون^۲ اهل فرانسه بیانیه ای راجع به موتور خورشیدی منتشر کرد. دستگاههای خوراک پز خورشیدی اولین بار توسط شخصی به نام (Saucer ۱۷۴۰-۱۷۹۹DE nichelas) ساخته شد. آنتونی لاواتزیه^۳ (۱۷۴۳-۱۷۴۹) خالق شیمی نوین برای کسب بیشترین انرژی از خالص ترین منبع حرارتی، تحقیقاتی در کوره های خورشیدی انجام داد. بسمر^۴ (۱۸۱۳-۱۸۹۸) پدر فولاد جهان، حرارت مورد نیاز کوره خود را با استفاده از انرژی خورشیدی تامین کرد. در سال ۱۸۷۸ موشو^۵ اولین کلکتور خورشیدی با متمرکز کننده مخروطی شکل را طراحی کرد که قدرت داشت ۷۸ درصد از انرژی خورشیدی تابیده شده را جذب کند. در سال ۱۸۸۸ کلکتور تخت خورشیدی به وسیله چارلز تلی^۶ ساخته شد، و ستر^۷ پیشنهاد استفاده از انرژی خورشیدی در ترموکوپلها را ارائه داد. در قرن نوزدهم دستگاههای آب شیرین کن خورشیدی رواج پیدا کردند. در قرن بیستم استفاده از کلکتورها جهت تولید بخار در نیروگاههای برقی مورد توجه زیاد قرار گرفت. گرم کردن ساختمان ها با استفاده از انرژی خورشید، ایده تازه ای بود که در سالهای ۱۹۳۰ مطرح و در یک دهه به پیشرفتهای قابل توجهی نائل آمد. اولین خانه خورشیدی در انستیتو تکنولوژی ماساچوست آمریکا در سال ۱۹۳۸ ساخته شد.

¹ Gustav Robert Kirchhoff

² salmon

³ Antoine Lavoisier

⁴ Henry Bessemer

⁵ moshou

⁶ Charles Telier

⁷ Travis Wester

با وجود آنکه انرژی خورشید و مزایای آن در قرون گذشته به خوبی شناخته شده بود ولی بالا بودن هزینه اولیه چنین سیستمهایی از یک طرف و عرضه نفت و گاز ارزان از طرف دیگر سد راه پیشرفت این سیستم ها شده بود تا اینکه پس از افزایش قیمت نفت در سال ۱۹۷۳ به بعد کشورهای پیشرفته صنعتی مجبور شدند به مسئله انرژی جدی تر بنگرند. (۳)

دراین تحقیق ابتدایه انرژی خورشیدی پرداخته و سپس کاربردهای نیروگاهی آن رامورد بررسی قرار می دهیم .

برای تبدیل پرتوهای خورشیدی به الکتریسیته دو گزینه اصلی وجود دارد استفاده از سامانه های فتوولتائیک واستفاده از سامانه های جذب گرمایش خورشیدی.

بر خلاف تولید برق فتوولتائیک که براساس تولید الکتریسیته توسط انرژی فوتون های خورشیدی عمل می کند، فناوری متمرکزکننده گرمایش خورشیدی بر مبنای استفاده از حرارت خورشید و تبدیل آن به انرژی مکانیکی و سپس، انرژی الکتریکی کار می کند . از این منظر، تولید برق گرمایش خورشیدی تا حدی شبیه به شیوه های رایج تولید انرژی از احتراق سوخت های فسیلی است که برای تبدیل گرما به الکتریسیته به موتورهای گرمایی وابسته هستند.

روش های گرمایشی معمولاً به دودسته متمرکزکننده و غیر متمرکز کننده گرمای خورشید تقسیم می شوند که دسته دوم هنوز در مراحل تحقیق و توسعه قرار دارد . تأسیساتی که با استفاده از آنها انرژی جذب شده حرارتی خورشید به الکتریسیته تبدیل می شود، نیروگاه حرارتی خورشیدی نامیده می شود. (۳)

۱-۲: مزایای نیروگاههای حرارتی خورشیدی

۱ - تولید برق بدون مصرف سوخت : نیروگاههای خورشیدی نیاز به سوخت ندارند و برخلاف نیروگاههای فسیلی که قیمت برق تولیدی آنها تابع قیمت نفت بوده و همیشه در حال تغییر می باشد، در نیروگاههای خورشیدی این نوسان وجود نداشته و می توان بهای برق مصرفی را برای مدت طولانی ثابت نگهداشت.

۲ - عدم احتیاج به آب زیاد : نیروگاههای خورشیدی بخصوص دودکشهای خورشیدی با هوای گرم، احتیاج به آب ندارند لذا برای مناطق خشک مثل ایران بسیار حائز اهمیت می باشند. (نیروگاههای حرارتی سنتی هنگام فعالیت نیاز به آب مصرفی زیادی دارند.)

۳ - عدم آلودگی محیط زیست : نیروگاههای خورشیدی ضمن تولید برق هیچگونه آلودگی در هوا نداشته و مواد سمی و مضر تولید نمی کنند در صورتیکه نیروگاههای فسیلی، هوا و محیط اطراف خود را با مصرف نفت، گاز و یا ذغال سنگ آلوده کرده و نیروگاههای اتمی با تولید زباله های هسته ای خود که بسیار خطرناک و رادیواکتیو هستند محیط زندگی را آلوده و مشکلات عظیمی را برای ساکنین کره زمین بوجود می آورند.

۴ - امکان تأمین شبکه های کوچک و ناحیه ای : نیروگاههای خورشیدی می توانند با تولید برق به شبکه سراسری برق نیرو برسانند و در عین حال امکان تأمین شبکه های کوچک و ناحیه ای را نیز به ما بدهند. در حالی که نیاز به تأسیس خطوط فشار قوی طولانی جهت انتقال برق ندارند چون انتقال از نیروگاههای ظرفیت بالای توأم با شبکه انتقال سراسری، پرهزینه باشد.

۵- استهلاک کم و عمر زیاد: نیروگاههای خورشیدی بدلیل فنی و نداشتن استهلاک زیاد دارای عمر طولانی می باشند در حالی که حداکثر عمر نیروگاههای فسیلی بین ۱۵ تا ۳۰ سال محاسبه شده است.

۶- عدم احتیاج به متخصص: نیروگاههای خورشیدی احتیاج به متخصص عالی ندارند و می توان آنها را بطور اتوماتیک بکار انداخت، در صورتیکه در نیروگاههای اتمی وجود متخصصین عالی مقام ضروری بوده و این دستگاهها احتیاج به مراقبتهای دائمی و ویژه دارند. (۳)

در تمام تجهیزات مربوط به جذب انرژی تشعشعی خورشید، اصول کار عبارتست از قرار دادن یک سطح تیره در مقابل تشعشع مستقیم خورشید آنگونه که تشعشع خورشید جذب سطح تیره گردد، این سطح تیره را جاذب یا گیرنده می نامند. قسمتی از انرژی جذب شده به گیرنده به سیال در حال حرکت که در تماس با طرف دیگر گیرنده می باشد منتقل شده که این انرژی منتقل شده انرژی مفید جمع آوری شده توسط گیرنده می باشد قسمت دیگری از انرژی جذب شده توسط گیرنده بوسیله تشعشع و جابجایی و هدایت حرارتی به محیط اطراف منتقل می گردد که جزو تلفات حرارتی محسوب می شود. این وسایل جذب انرژی خورشید را کلکتور یا گردآورنده می نامند.

در یک کاربرد از کلکتورها فقط در جهت جمع آوری حرارت و افزایش دمای سیال استفاده می شود و هدف بهینه سازی این کاربرد حداکثر شدن انرژی جمع آوری شده می باشد که قانون اول کلکتور معیاری برای ارزشی جمع آوری شده در واحد سطح کلکتور جهت افزایش راندمان می باشد

در کاربرد دیگر از کلکتور جهت تبدیل انرژی و تولید قدرت استفاده می شود و حداکثر شدن انرژی جمع آوری شده همانند کاربرد اول هدف بهینه سازی می باشد که در اینجا قانون دوم معیاری برای ارزشی جمع آوری شده در واحد سطح جهت افزایش راندمان می باشد. (۳)

انواعی از کلکتورهای خورشیدی که شدت شار تابیده شده به گیرنده را نسبت به شدت شار تابیده شده به دهانه کلکتور افزایش می دهند را متمرکزکننده می نامند. (۱)

۱-۳: انواع نیروگاههای خورشیدی بر اساس متمرکز کننده ها:

- نیروگاههای سهموی خطی
- نیروگاههای دریافت کننده مرکزی
- نیروگاههای دیش استرلینگ
- نیروگاههای برج خورشیدی
- نیروگاه کلکتورهای فرنل .

دسته بندی متمرکزکننده های خورشیدی از طریق فاکتور اصلی و مهم، ضریب تمرکز، نیز به سه دسته $LCPVT^8$, $MCPVT^9$, $HCPVT^{10}$ تقسیم می شوند. متمرکزکننده های با ضریب تمرکز ۱ تا ۱۰ در زیر مجموعه دسته $LCPVT$ و متمرکزکننده های با ضریب تمرکز ۱۰ تا ۱۰۰ در زیر مجموعه دسته $MCPVT$ و نهایتاً متمرکزکننده با ضریب تمرکز ۱۰۰ به بالا در زیر مجموعه دسته $HCPVT$ قرار می گیرند. (۴)

8. Low Concentration Photovoltaic Thermal
 9. Medium Concentration Photovoltaic Thermal
 10. High Concentration Photovoltaic Thermal

۱-۳-۱: نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده سهموی خطی

(Parabolic Trough)

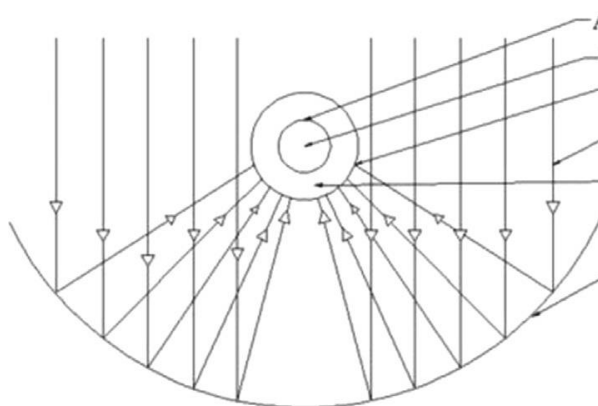


شکل (۱-۱) : نیروگاه سهموی خطی (۲)

در حال حاضر تکنولوژی نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده سهموی خطی، قابل توجه‌ترین روش در بین روش‌های حرارتی-برقی برای تولید انرژی تجدید پذیر می‌باشد. در شکل (۱-۱) تصویری از نیروگاه سهموی خطی نشان داده شده است که این تکنولوژی برای اولین بار از سال ۱۹۸۴ در صحرای مجاو کالیفرنای آمریکا به کار گرفته شد ولی بعدها- هم به صورت خورشیدی و هم به صورت هیبرید- در کشورهایی مانند اسپانیا، مصر، مراکش و امارات به کار گرفته شد. این نیروگاه‌ها که بر اساس ویژگی‌های آب و هوای روزانه کار می‌کنند، حدود ۱۴ تا ۸۰ مگاوات برق تولید می‌کنند. در ایران نیز تحقیقات و مطالعاتی در زمینه این نیروگاه‌ها انجام شده و پروژه یک نیروگاه تحقیقاتی با ظرفیت ۳۵۰ کیلووات توسط سازمان انرژی‌های نو ایران در شیراز ساخته شده است. (۲)



شکل (۱-۲): کلکتورهای نیروگاه خورشیدی شیراز (۳)



شکل (۱-۳): طرحواره ی کلکتورهای سهموی خطی (۳)

بدیهی است که با افزایش ظرفیت فنی و علمی که در اثر اجرای پروژه نیروگاه خورشیدی شیراز عاید محققین مجرب ایرانی شد ایران در زمره محدود کشورهای سازنده نیروگاه‌های خورشید از نوع متمرکز کننده‌های سهموی خطی قرار گرفت. شکل (۱-۲) تصویری از کلکتورهای نیروگاه خورشیدی شیراز را نشان می دهد و در شکل (۱-۳) طرحواره ای از کلکتورها آورده شده است.

این نیروگاهها شامل ردیفهای موازی و طولانی از کلکتورها می باشند. با توجه به ساختار هندسی کلکتورهای این نیروگاه می بایست تابش مستقیم خورشید در کانون خطی آن منعکس

شود و با ضریب تمرکز تابش خورشیدی بین ۲ تا ۴۰ می توان به درجه حرارت تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد در کانون کلکتورها رسید. هر مجموعه از کلکتورهای سهموی خطی ممکن است ۵ تا ۶ متر عرض، یک تا دو متر ارتفاع و بیش از ۱۵۰ متر طول داشته باشند، برای تأمین انرژی نیروگاه به تعداد زیادی از این مجموعه ها نیاز است. برای مثال، در یکی از نیروگاههای کالیفرنیا به ظرفیت تولید ۳۰ مگاوات برق، ۴۹۰ کلکتور استفاده شده است. این کلکتورها بخش عمده ای از فضای نیروگاه را اشغال می کنند و هزینه های تأمین و تعمیر و نگهداری آنها تأثیر زیادی بر جنبه های اقتصادی نیروگاه دارد. (۲)

بخش عمده ی متمرکز کننده ها شامل سطوح انعکاسی سهموی است که از جنس آینه های شیشه ای تشکیل شده و روی یک سازه نگهدارنده قرار می گیرند و در راستای شمالی جنوبی تراز می شوند. این سطوح نور خورشید را در خط کانونی خود بازتابانده و متمرکز می کنند. اولین سطوح سهموی خطی، از شیشه های ۴ میلیمتری با وزن و قیمت بسیار زیاد ساخته می شدند ولی در سالهای اخیر پیشرفتهای جدیدی با هدف کاهش هزینه و وزن صورت گرفته است و از روشها و مواد جدید مانند آلومینیوم جلا یافته به جای آینه های شیشه ای استفاده شده است.

دریافت کننده به کار رفته در این نیروگاه، از لوله های جاذب که معمولاً از فلز با روکش سیاهرنگ و یک لایه محافظ شیشه ای ساخته می شود و در طول خط کانونی قرار می گیرند تا توانایی جذب بیشترین انرژی و تحمل دمای بالا را داشته باشد. برای بهره گیری بیشتر و افزایش بازدهی لوله دریافت کننده سطح آن را با اکسید فلزی که ضریب بالایی دارد پوشش

می دهند و همچنین در محیط اطراف آن، لوله شیشه‌ای به صورت لفاف، پوشیده می شود تا از

تلفات گرمایی و افت تشعشعی جلوگیری گردد. (۲)

بلک کروم، بلک نیکل، و سرمت ها پوششهای متداول هستند. پوششهای سرمت در دماهای

بالا پایداری خوبی دارند. بلک نیکل به نسبت سرمت ضریب جذب بالاتر و قیمت پایبتری

دارد، اما به دمای عملکرد کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد محدود می شود.

پوشش شیشه ای با دو عمل از اتلاف بیش از حد گرما به محیط جلوگیری می کند:

۱- قسمتی از نور مستقیم خورشید پس از عبور از پوشش به لوله جاذب برخورد می کند و

مجدداً بازتابیده می شود. این امواج که مقداری از انرژی خود را از دست داده اند، طول

موجشان افزایش پیدا می کند لذا هنگام بازتابش از لوله فلزی، امواج با طول موج بلند صادر

می شود که شیشه مانند یک جسم سیاه عمل می کند و امواج جذب شیشه شده و حرارت

شیشه افزایش می یابد و گرما پشت آن گیر می افتد. (اثر گلخانه ای^{۱۱})

۲- شیشه مانع انتقال حرارت جانبی محیط می شود و سرعت انتقال کاهش می یابد و اگر

وسط آن خلاء باشد باعث انتقال حرارت کمتر می شود. (۲)

بیشترین بازدهی موقعی است که بین لوله جاذب و پوشش شیشه ای خلا باشد. همچنین

هر چقدر فشار بیشتر شود اثر آن بر بازدهی بیشتر می شود و با افزایش فشار بازدهی کاهش می

یابد. گازهای بی اثر مانند آرگون که ضریب هدایت حرارتی کمتری دارند، در رتبه بعدی گاز

انتخابی درون محفظه قرار می گیرند. اگرچه نسبت به هوا از نظر بازدهی تفاوت چندانی ندارد.

¹¹ The greenhouse effect

پُر کردن فضای بین لوله جاذب و پوشش شیشه ای با گاز بی اثر باعث پایداری بیشتر و کمک به کاهش مشکل نشت هیدروژن از سیال عامل می شود.

هیدروژن به این دلیل مورد مطالعه قرار گرفته است که، به طور طبیعی از سیال عامل به محفظه حلقوی نشت می کند و اثر گاز هیدروژن بر بازدهی بیشتر است. (۹)

بخش دریافت کننده در قسمتهای انتهایی روی دو تکیه گاه قرار گرفته اند که این مجموعه روی تیرکهای اصلی سازه سوار است.

ردیاب باعث می شود که سطح ورود تشعشع خورشیدی به متمرکز کننده مستقیم باشد تا بازتابش به کانون، صحیح صورت پذیرد.

متمرکز کننده می تواند در وضعیت های مختلفی خورشید را رهگیری کند که دو نوع آن بیشتر متداول است:

در نوع اول رهگیری، محور کانون سهمی را در امتداد شرقی غربی قرار می دهند. در این وضعیت در هنگام ظهر دهانه متمرکز کننده کاملاً عمود بر تشعشع خورشید قرار می گیرد و مقدار شار تشعشعی وارد شده بسیار زیاد می باشد اما در هنگام صبح و عصر شار خیلی کمی عمود بر دهانه متمرکز کننده وارد می گردد. در نوع دوم رهگیری، شمالی جنوبی قرار می دهند و بنابراین می تواند در طول روز یک شار نسبتاً یکنواختی را عمود بر سطح دهانه متمرکز کننده فراهم آورد.

سیستم ردیابی خورشید در این دستگاهها از فولاد یا آلومینیوم ساخته می شوند و تک محوره می باشند و تغییرات تابش خورشید در این نیروگاهها توسط منبع ذخیره و گرمکن سوخت فسیلی جبران می شوند. (۹)

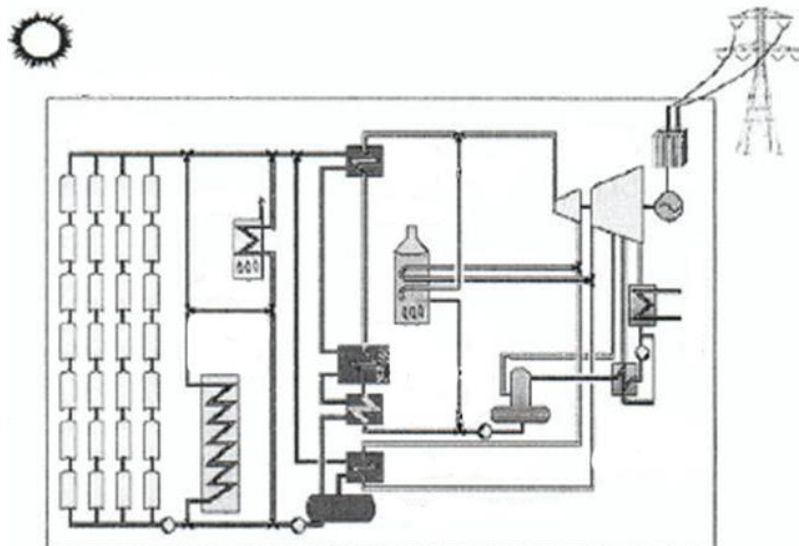
سیال انتقال حرارت در لوله های جاذب، روغن (HTF^{12}) با دمای حدود ۴۰۰ درجه سانتیگراد می باشد و روغن داغ در مبدل های حرارتی آب را به بخار تبدیل و بخار سوپر هیت طی عبور از توربین ژنراتور، انرژی الکتریکی تولید می کند. در ادامه، سیال بار دیگر برای جذب گرمای بیشتر به کلکتورها باز می گردد و این چرخه به طور پیوسته تکرار می شود. (۹)

نکات مثبت این تکنولوژی واضح است، مثلاً می توان در مواقعی که نور خورشید در دسترس نیست، از انرژی ذخیره شده بهره جست. در روزهای گرم و طولانی تابستان، یک نیروگاه های خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده سهموی می تواند حدود ۱۰ تا ۱۲ ساعت با توان نامی خود کار می کند. البته سعی بر این است که نیروگاه های جدید به صورت هیبرید ساخته شوند تا از یک میدان فسیلی به عنوان منبع پشتیبان در زمان های عدم تابش نور خورشید کافی، استفاده کنند. (۹)

در شکل (۱-۴)، شماتیکی از سیکل مربوط به هیبرید سازی نیروگاه خورشیدی آورده شده است. مطالعات نشان می دهد هزینه برق تولیدی از نیروگاه های خورشیدی باید در حدود 5 €/KWh باشد تا این گونه نیروگاه ها با نیروگاه های سوخت فسیلی قابل رقابت باشند، این در حالیست که تحقیقات انجام شده بر روی نیروگاه SEGS VI با ظرفیت 30 MW نشان می دهد که هزینه برق تولیدی برای آن 17 €/KWh است در صورتیکه تنها از

12 Heat-transfer fluid

انرژی خورشیدی استفاده کند و برابر $14,1 \text{ €/KWh}$ می شود در صورتیکه از سیستم هیبرید نیز استفاده شود. (۲)



شکل (۱-۴): شماتیکی از سیکل هیبرید سازی نیروگاه خورشیدی (۱)

در صورتیکه آینه های بازتابنده به خوبی شکل داده شده و در محل دقیقی نصب شوند و سامانه ردیابی خورشید وضعیت هر طرف را در طول روز در بهترین محل تنظیم کند و همچنین ، لوله های جاذب گرما در بالاترین بازده ممکن کار کنند، بازده این نیروگاه در تبدیل انرژی خورشید به الکتریسیته در بالاترین حد خود (۱۴ درصد) خواهد بود. (۱)

۱-۳-۱: اجزاء اصلی نیروگاههای سهموی خطی

منعکس کننده از نوع آینه های سهموی که می تواند از جنس های نقره ، آلومینیوم ، استیل براق ، جام شیشه با اکسید کم آهن باشد.

- دریافت کننده تابش خورشیدی که پرتوهای منعکس شده را جذب کرده و موجب گرمایش سیال انتقال دهنده گرما می شود و شامل لوله استیل، حباب شیشه ای، نمایشگر شیمیایی وجود خلا و لوله انبساطی می باشد.

- مکانیزم حرکت دهنده (تک محوری) کلکتورهای سهموی به منظور ردیابی خورشید و کنترل کننده ها

- اسکلت فلزی نگهدارنده و فونداسیون
- سیستمهای مربوط به تولید قدرت الکتریکی
- تجهیزات مربوط به انتقال گرما
- تجهیزات مربوط به تولید الکتریسیته و دفع گرمای تلف شده به محیط خارج (۹)

۱-۳-۲: مزایای نیروگاه سهموی خطی

- پیوند ساده با سیستم پشتیبان با سوخت نفت یا گاز طبیعی و تولید مستمر الکتریسیته در طول روز
- زمان کوتاه نصب و عدم نیاز به احداث ساختمان های متعدد کنترل و تولید
- قابلیت تولید توان های بالا که بر خلاف نیروگاههای هیلوستانی، با تکنولوژی کلکتور های سهموی خطی تا توان چند ده مگاوات را می توان تولید کرد
- امکان تولید گرما و برق همزمان
- تولید بخار برای مصارف سیستم های غیرنیروگاهی (صنایع نفت و...)
- تولید آب شیرین (۹)

۳-۱-۳: معایب نیروگاه سهموی خطی

- ساختار پیچیده سازه های فلزی کلکتور ها
- پیچیدگی و هزینه بر بودن سیستم های ردیاب خورشیدی
- نیاز به آب در پروسه تولید نیروگاهی برای تمیزکاری و سرمایش
- اتلافهای قابل ملاحظه ای در زاویه تابش به دلیل دنبال کننده های تک محوری
- دمای بخار تولید شده محدود با انرژی خورشید که باعث پایین آمدن راندمان خروجی نیروگاه می شود (۹)

۳-۱-۴: نمونه هایی از نیروگاههای سهموی خطی

اولین نیروگاه سهموی خطی در سال ۱۹۸۴ با ظرفیتی معادل ۱۴ مگاوات در صحرای موجاو ایالت کالیفرنیا به بهره برداری رسید و در سال ۱۹۹۰ فاز نهایی آن تکمیل شد. در این طرح ۹ واحدی بیش از ۹۳۶ هزار دریافت کننده سهموی خطی در مساحتی بالغ بر ۶۴۷ هکتار نصب شده است که سالانه ۶۶۲ گیگاوات ساعت برق تولید می کند. شانزده سال پس از تکمیل اولین پروژه نیروگاه سهموی خطی، در ماه ژوئن سال ۲۰۰۷ نیروگاه دیگری با ظرفیت ۶۴ مگاوات در ایالت نوادا به بهره برداری رسید که از آن به عنوان رنسانسی در تولید برق به شیوه گرمایش خورشیدی یاد می شود. این نیروگاه تحت قانون ایالتی نوادا در منطقه ای به مساحت ۱۶۰ هکتار در ۶۵ کیلومتری جنوب غربی لاس وگاس واقع شده است. مطابق این قانون ۲۰ درصد از الکتریسیته مصرفی ایالت نوادا تا سال ۲۰۱۳ باید از طریق منابع تجدیدپذیر و ۵ درصد آن از طریق انرژی خورشیدی تأمین شود. در سال ۲۰۱۳ نیروگاه

دیگری با ظرفیت ۲۸۰ مگاوات در ایالت آریزونا به بهره برداری رسید که تصویری از آن در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.

با وجود پیشتازی آمریکا در ساخت نخستین نیروگاه سهموی خطی، اسپانیا گوی سبقت را از این کشور ربوده و از سال ۲۰۰۸ تاکنون نزدیک به ۲۵ طرح بالای ۵۰ مگاوات را به بهره برداری رسانده است. در شکل (۶-۱) یکی از بزرگترین این طرح ها با نام سولابن با ظرفیت ۲۰۰ مگاوات آورده شده است که در چهار فاز در سالهای ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ به بهره برداری رسید. این نیروگاه می تواند برق مورد نیاز ۱۰۴ هزار خانه را تأمین کند. در اروپا غیر از اسپانیا، طرحی ۵ مگاواتی نیز در ایتالیا اجرا شده است. علاوه بر نیروگاههای احداث شده، بیش از ۲۰ طرح دیگر با ظرفیت های بیش از ۵۰ مگاوات در نقاط مختلف، از جمله آمریکا، اسپانیا، مراکش، آفریقای جنوبی و هند در حال پیگیری است.

ایران نیز اولین کشور آسیایی بود که در سال ۲۰۰۸ یک طرح آزمایشی به ظرفیت ۲۵۰ کیلووات را در شهر شیراز و به دنبال آن، طرح ۱۷ مگاواتی را در نیروگاه سیکل ترکیبی شهر یزد به بهره برداری رساند. که شکل (۷-۱) نمایی از آن را نشان می دهد اما طرحهای دیگر این قاره به سه کشور تایلند، امارات متحده عربی و هند اختصاص دارد. تایلند در سال ۲۰۱۱ نیروگاهی به ظرفیت ۵ مگاوات راه اندازی کرد و در سال ۲۰۱۳ دو کشور امارت و هند نیروگاههایی به ظرفیت ۱۰۰ مگاوات و ۵۰ مگاوات را به بهره برداری رساندند در شکل (۸-۱) نیروگاه شمس ۱ در کشور امارات نشان داده شده است. مشخصات ۱۰ نیروگاه بزرگ خورشیدی با فناوری سهموی خطی در جدول (۱-۱) آورده شده است. (۳)

جدول (۱-۱): جزئیات اطلاعات بزرگترین نیروگاه های سهموی خطی (۳)

ردیف	نام پروژه	کشور	ظرفیت (MW)	تولید سالانه (GWh)	هزینه احداث (M\$)	تعداد مجموعه سهموی ³⁸	سطح هر مجموعه سهموی (m ²)	مساحت زمین (هکتار)	تاریخ بهره برداری
1	Solar Energy Generating Systems	آمریکا	354	662	1,060	نامشخص	نامشخص	648	1984-1990
2	Solana	آمریکا	280	944	2,000	3,232	680	1,275	2013
3	Solaben	اسپانیا	200	400	800	1,440	833	450	2013
4	Solnova	اسپانیا	150	340	نامشخص	1,080	833	345	2009
5	Andasol	اسپانیا	150	491	1,275	1,872	817	600	2008-2011
6	Extresol	اسپانیا	150	474	≈ 1,215	1,872	817	600	2010 و 2012
7	Palma del Rio	اسپانیا	100	229	نامشخص	1,592	470	270	2010 و 2011
8	Manchasol	اسپانیا	100	316	نامشخص	1,248	817	400	2011
9	Valle Solar	اسپانیا	100	350	864	1,248	817	460	2011
10	Helioenergy	اسپانیا	100	190	نامشخص	720	833	220	2011 و 2012



شکل (۱-۵): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی

سولانا در آریزونا، آمریکا با ظرفیت ۲۸۰ مگاوات (۳)



شکل (۱-۶): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی
سولابن در اسپانیا با ظرفیت ۲۰۰ مگاوات (۳)



شکل (۱-۷): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی
یزد با ظرفیت ۱۷ مگاوات (۳)



شکل (۱-۸): نیروگاه خورشیدی سهموی خطی
شمس ۱ در امارات با ظرفیت ۱۰۰ مگاوات (۳)

۱-۳-۲: نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از دریافت کننده مرکزی (CRS^{۱۳})

در این نیروگاه‌ها پرتوهای خورشیدی توسط مزرعه‌ای متشکل از تعداد زیادی آینه منعکس کننده بنام هلیوستات که به صورت دایره ای با شعاع های مختلف و یا به صورت قطاعی از یک دایره در مقابل برج دریافت کننده مرکزی چینش شده اند، بر روی دریافت کننده که در بالای برج نسبتاً بلندی استقرار یافته است متمرکز می گردد، در نتیجه روی محل تمرکز پرتوها انرژی گرمایی زیادی بدست می آید که این انرژی بوسیله سیال عامل که داخل دریافت کننده در حرکت است، جذب می شود و بوسیله مبدل حرارتی به سیستم آب و بخار مرسوم در نیروگاه های سستی منتقل شده و بخار فوق گرم در فشار و دمای طراحی شده برای استفاده در توربین ژنراتور تولید می گردد. سیال پس از دریافت گرما یا خود تبدیل به بخار می گردد و در یک سیکل رانکین تولید برق می نماید و یا با انتقال حرارت خود در یک مبدل حرارتی به سیال دیگری، آن سیال را بخار می نماید و برای تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می دهد. در شکل (۱-۹) تصویری از نیروگاه دریافت کننده مرکزی آورده شده است. (۵)



شکل (۱-۹): نیروگاه های خورشیدی با استفاده از دریافت کننده مرکزی (۵)

¹³ Central receiver system

این نیروگاه ها، تنها در زمان تابش مستقیم خورشید قابل استفاده می باشند، زیرا قابلیت متمرکز نمودن تابش های پراکنده را ندارند. بدین دلیل احداث چنین نیروگاههایی در مکانهایی که دارای سهم بسیاری از تابش خورشید دارند، پیشنهاد می گردد.

ضریب تمرکز خورشیدی در این نیروگاهها بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ می باشد و درجه حرارتهایی تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در دریافت کننده مرکزی حاصل می گردد. برای افزایش میزان انرژی الکتریکی تولیدی در این نیروگاهها معمولاً یک سیستم ذخیره گرمایی مورد استفاده قرار می گیرد. برای استفاده دائمی از این نوع نیروگاه در زمانی که تابش خورشید وجود ندارد مثلاً ساعات ابری یا شبها از سیستمهای ذخیره کننده حرارت و یا احیاناً از تجهیزات پشتیبانی که ممکن است از سوخت فسیلی استفاده کنند جهت ایجاد بخار برای تولید برق کمک گرفته می شود (۴)

مطالعات ساخت اولین نیروگاه خورشیدی ایران از نوع دریافت کننده مرکزی توسط سازمان انرژیهای نو ایران و با کمک شرکتهای مشاور و سازنده داخلی با ظرفیت یک مگاوات و سیال عامل آب و بخار در طالقان جریان دارد. کلیه مطالعات اولیه و پتانسیل سنجی و طراحی نیروگاه به انجام رسیده و یک نمونه هلیوستات نیز ساخته شده است. بدلیل تغییرات تکنولوژی در سطح جهانی و هماهنگی با پیشرفت های جاری، عملیات اجرایی این نیروگاه فعلاً متوقف گردیده و مطالعه در زمینه اجزاء نیروگاه ادامه دارد. (۳)

۱-۳-۲-۱: انواع سیالات مورد استفاده در دریافت کننده مرکزی :

هوا: در این سیستم هوا پس از دریافت گرما در دریافت کننده مرکزی، می تواند به عنوان شارژ کارکن مورد استفاده قرار گیرد و با ورود پر فشار خود به توربین گازی و انبساط در آن، موجب به گردش درآوردن توربین و تولید برق توسط ژنراتور کوپل شده به توربین شود، همچنین می توان با بازیافت حرارت گاز خروجی از اگزوز توربین گازی، اقدام به تولید بخار و در نهایت تولید برق در یک واحد نیروگاه بخاری نمود. در ضمن می توان با انتقال حرارت هوای گرم در یک مبدل حرارتی به شارژ کارکن آب در یک چرخه رانکین نیز، تولید برق نمود.

آب: در این سیستم، آب تحت فشار حدود ۱۰۰ بار و ۵۰۰ درجه سانتیگراد در دریافت کننده مرکزی تبدیل به بخار داغ می گردد. بخار داغ یا به صورت مستقیم به توربین، که پایین برج نصب شده، وارد می شود و یا در سیستم ذخیره حرارت برای مصارف بعدی ذخیره می گردد، بدین ترتیب که حرارت بخار در تانکی پر از شن و سنگ به لوله های روغن مخصوص حرارتی انتقال و در آنها ذخیره می شود، تا نیروگاه بتواند در ساعت ابری و شب ها به کار خود ادامه دهد. در ضمن سیستم ذخیره حرارت می تواند مقداری حرارت برای قسمتهای داخلی نیروگاه فراهم کند، تا راه اندازی مجدد دستگاهها سریعتر انجام شود.

سدیم: در این سیستم، سدیم مایع تا حدود ۶۲۰ درجه سانتیگراد در دریافت کننده مرکزی گرم می شود و گرمای آن در یک مبدل حرارتی به شارژ کارکن آب انتقال می یابد و شارژ کارکن در یک چرخه رانکین تولید برق می نماید. قسمتی از انرژی حرارتی سدیم مایع می تواند در یک سیستم ذخیره حرارت برای مصارف بعدی ذخیره شود.

نمک نیترات: نمک نیترات دارای نقطه ذوب در حدود ۳۲۰ درجه سانتیگراد می باشد و نسبت به مایعات، نظیر آب و روغن، حرارت بیشتری را در خود نگه می دارد. در این نوع نیروگاهها که به عنوان مثال می توان از نیروگاه Solar-۲ نام برد، نمک تا حدود ۵۶۶ درجه سانتیگراد داغ می گردد. پس از اینکه حرارت نمک برای فوق گرم کردن بخار در مبدل حرارتی گرفته شد، نمک با دمای حدود ۲۸۸ درجه سانتی گراد در یک مخزن ذخیره می گردد تا در مواقع مناسب به برج مرکزی فرستاده شود. استفاده از نمک نیترات دارای این مزیت می باشد، که نمک را می توان به صورت داغ در یک مخزن ذخیره کرد و در مواقع نیاز از حرارت آن استفاده نمود. نمک داغ می تواند حرارت خود را تا ۱۳ ساعت حفظ نماید.(۳)

۱-۳-۲: اجزاء اصلی نیروگاههای دریافت کننده مرکزی

- **هلیوستات ها:** هلیوستاتها، آینه های قابل کترلی هستند که می توانند در تمام ساعات روز خورشید را دنبال کنند و با زاویه خاصی که هر کدام از آنها با امتداد جهت اشعه خورشید پیدا می کنند، تشعشع خورشیدی را به سمت دریافت کننده ثابت مرکزی در بالای برج، منعکس کنند. این زاویه بستگی به زمان روز، طرز قرار گرفتن، فاصله و موقعیت هر هلیوستات نسبت به دریافت کننده مرکزی دارد.

هلیوستاتها بطور کلی از پنج قسمت عمده که شامل آینه ها، سازه، فونداسیون، سیستم محرک و سیستم کنترل کننده خورشیدی می باشد، تشکیل می گردند.

آینه ها: آینه ها مهمترین بخش هلیوستاتها می باشند، که وظیفه انعکاس پرتوهای خورشید بر روی دریافت کننده مرکزی را بر عهده دارند و برای ساخت آینه باید سطحی در نظر گرفته شود، که بتوان پوشش دهی به وسیله فلزات را بر پشت و یا روی آن انجام داد. جنس این

سطح آینه هایی که فلز پشت آنها پاشیده می شود شیشه یا پلیمرهای شفاف و برای آینه هایی که فلز روی آنها پاشیده می شود، پلیمرهای کدر می باشد. آینه های یک هلیوستات به وسیله قاب فلزی روی سازه نگهداری کننده نصب می شوند و در قاب خود تا حدودی قابل تنظیم می باشند، تا بتوان تععر کمی به سطح هلیوستات داد.

سازه: وظیفه سازه ها نگهداری آینه ها می باشد. در ساخت هلیوستاتهای کوچک و متوسط از سازه هایی که از یک ستون و چند تیر متقاطع تشکیل می شوند، استفاده می شود. این مدل سازه ها دارای قابلیت بسیار زیاد به منظور ردیابی خورشید توسط آینه ها می باشد. در هلیوستاتهای بزرگ برای نگهداری مجموعه آینه ها از یک ستون اصلی و خرپاهای فضایی استفاده می شود.

فونداسیون: فونداسیون واسطه نصب هلیوستات به زمین می باشد، که معمولاً از نوع بتونی است و حفره هایی دارد که ستون سازه درون آن قرار می گیرد.

سیستم محرک: به دلیل ضرورت تمرکز نور خورشید بر روی یک نقطه (دریافت کننده مرکزی) می بایست حرکت هلیوستاتها در دوجت افقی و عمودی امکان پذیر باشد. این امر توسط سیستم محرک هلیواستات صورت می پذیرد.

سیستم کنترل کننده نور خورشید: برای بدست آوردن بازدهی بهتر در استفاده از انرژی خورشیدی باید هلیوستاتها تا حد امکان با ردیابی صحیح خورشید، بیشترین تشعشعات خورشید را به نیروگاههای دریافت کننده مرکزی منعکس نمایند. در نیروگاههای هلیوستاتی که در آنها حرارتهای معادل نیروگاههای حرارتی متداول برای تولید الکتریسیته نیاز می باشد، می بایست بدلیل حرکت دورانی زمین به دور خود و به دور خورشید سیستمی ایجاد گردد، تا

ردیابی خورشید توسط هلیوستاتها در طول روز امکان پذیر باشد. سیستمهای کنترل کننده خورشید دارای انواع گوناگون می باشند، که در ذیل برخی از آنها معرفی می گردند:

کنترل مکانیکی: در این سیستم، یک دینامو موتور متصل به گیربکس، متناسب با سرعت حرکت خورشید که موجب حرکت هلیوستاتها در جهت تعقیب خورشید می گردد، محاسبه شده است. در هنگام شروع حرکت در صبح و پایان فعالیت در عصر، یک دستگاه کنترل الکترونیکی نیز در نظر گرفته می شود.

کنترل هیدرولیکی: در این روش کنترلی، حرکت هلیوستاتها توسط یک سیلندر هیدرولیکی انجام می پذیرد. در طول روز، مقداری روغن که میزان آن محاسبه شده است به داخل سیلندر پمپ می گردد و با فشاری که پمپ در سیلندر ایجاد می کند، هلیوستات در طول روز به آرامی به دنبال خورشید می گردد.

کنترل مرکزی توسط سیستم کامپیوتری: از این سیستم پرخرج ولی مطمئن، در اغلب نیروگاههای خورشیدی استفاده می شود. در این روش کنترلی برای هر آینه یک برنامه جداگانه به کامپیوتر داده می شود. بدین صورت که موقعیت جغرافیایی آینه (فاصله آن تا برج)، نسبت سایه اندازی هلیوستاتها روی یکدیگر و بعضی اطلاعات در اختیار کامپیوتر قرار می گیرد و سپس سیستم کنترل مرکزی برای هر هلیوستات یک برنامه گردش سالیانه طرح ریزی کند.

- **دریافت کننده مرکزی :** دریافت کننده مرکزی برای جمع کردن، جذب کردن و انتقال بیشترین مقدار انرژی دریافتی، به سیال انتقال دهنده حرارت طراحی می شود. دریافت کننده های مرکزی در بالای برجهای بلند قرار می گیرند و در معرض حداکثر جریانات انرژی تشعشعی که حدوداً بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ کیلو وات بر متر مربع می باشد، قرار دارند. دیواره این

دریافت کننده ها از یک سری لوله های موازی که در کنارهم قرار گرفته اند و در داخل آنها سیالی جریان دارد، تشکیل می شوند. انرژی خورشید به سطح خارجی لوله تابیده و انرژی جذب شده توسط لوله ها، به سیال داخل آنها منتقل می شود. لوله ها از قسمت فوقانی مسدود شده اند و در نتیجه انبساط حرارتی در قسمت پایین آنها اتفاق می افتد

با تعیین ظرفیت حرارتی دریافت کننده می توان پارامترهای دیگر نیروگاه از قبیل مساحت سطح دریافت کننده، ارتفاع برج و مساحت هلیوستاتها را نیز بدست آورد. جهت تعیین ظرفیت حرارتی دریافت کننده، نیاز به اطلاعات مربوط به توان نامی نیروگاه P ، بازدهی پروسه نیروگاهی، بازدهی سیستم انتقالی سیال از دریافت کننده به توربین، ضریب خورشیدی و ضریب اطمینان k و نیز طول لوله های دریافت کننده، سطح هلیوستاتها، نوع سیال، ساختار دریافت کننده و بازده حرارتی می باشیم. با در نظر گرفتن ضریب خورشیدی بالا در هنگام طراحی نیروگاه قابلیت ذخیره انرژی گرمایی در مخزن ذخیره بیشتر می گردد و در نتیجه تعداد ساعات کارکرد با تمام ظرفیت نیروگاه در سال افزایش می یابد.

- سیستم انرژی انتقال گرمایی

- سیستم تبدیل قدرت

- سیستم ذخیره انرژی (۳)

در جدول (۱-۲)، مشخصات ۱۰ نیروگاه بزرگ خورشیدی با فناوری دریافت کننده مرکزی آورده شده است.

جدول (۲-۱): جزئیات اطلاعات بزرگترین نیروگاه های دریافت کننده مرکزی (۳)

ردیف	نام پروژه	کشور	ظرفیت (MW)	تولید سالانه (GWh)	هزینه احداث (M\$)	تعداد و ارتفاع برج (m)	تعداد هلیواستات	سطح هر هلیواستات (m ²)	مساحت زمین (هکتار)	تاریخ بهره برداری
1	Ivanpah	آمریکا	390	1,080	2,200	140 . 3	173,500	نامشخص	1,420	2013
2	Crescent Dunes	آمریکا	110	485	900	160 . 1	17,170	62	650	2013
3	PS20	اسپانیا	20	48	65	165 . 1	1,250	120	80	2009
4	Gemasolar	اسپانیا	19/9	110	310	140 . 1	2,650	120	185	2011
5	PS10	اسپانیا	11	24	35	115 . 1	624	120	55	2006
6	Sierra SunTower	آمریکا	5	21,5	نامشخص	2 . نامشخص	2400	نامشخص	8	2009
7	Jülich Solar Tower	آلمان	1/5	2,2	نامشخص	60 . 1	2000	نامشخص	17	2008
8	Marcus Solar Plant	ترکیه	5	14	50	1 . نامشخص	510	نامشخص	20	2013

۳-۲-۳-۱: مزایای نیروگاه دریافت کننده مرکزی

- بازدهی نسبتا بالای نیروگاه
- دمای بالای بخار تولید شده
- پیوند ساده با یک سیستم پشتیبان سوخت نفت یا گاز طبیعی
- تولید همزمان گرما و برق
- عدم نیاز به صرف هزینه برای تامین سوخت اولیه نیروگاه
- عدم آلودگی محیط زیست

۳-۲-۴-۱: معایب نیروگاه دریافت کننده مرکزی

- بازدهی نسبتا کم با سیستمهای پشتیبانی سوخت های فسیلی
- نیاز به پایه های بسیار بادوام برای آینه ها.
- نیاز به آب برای تمیز کردن آینه ها
- محدودیت اندازه مزرعه خورشیدی (۳)

۳-۳-۱ : نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده دیش استرلینگ

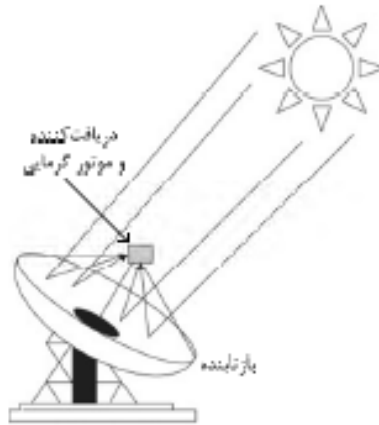
(Sterling Dish)

در این نوع نیروگاه از بشقابهای بزرگ سهمی شکل شبیه به آینه مقعر استفاده می شود که با ضریب تمرکز بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ می تواند با متمرکز کردن پرتوهای خورشید تابیده شده در یک نقطه کانونی به حرارتی تا حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد در نقطه کانونی کلکتور برسد. موتور استرلینگ مورد استفاده در این نیروگاه که البته دارای بازدهی بسیار بالایی نیز می باشد، انرژی حرارتی این تشعشع تمرکز یافته را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند و به کمک یک آلترناتور (دینام) از این انرژی مکانیکی، الکتریسیته تولید می گردد، همچنین گرمای حاصل در دریافت کننده رami توان با کمک یک سیال مناسب به سیکل ترمودینامیکی جدا از گردآورنده منتقل نمود و بدین ترتیب انرژی الکتریکی تولید کرد. سیستمهای دیش استرلینگ به تنهایی قادر به تولید ۱۰ تا ۵۰ کیلووات الکتریسیته اند که با اتصال به یکدیگر، نیروگاهی با توان بیش از یک مگاوات و قابل اتصال به شبکه را ایجاد می کنند. دیش های معمولی، قطری بین ۵ تا ۱۰ متر و سطح بازتابنده ای برابر با ۲۰ تا ۸۰ متر مربع دارند و می توانند ۴ تا ۲۵ کیلووات انرژی تولید کنند. اگرچه دیش هایی به بزرگی ۲۰۰ تا ۴۰۰ مترمربع و توان تولیدی بیش از ۵۰ کیلووات نیز ساخته شده است، اما عواملی از جمله مواد اولیه و موتور مناسب، توسعه صنعتی آنها را با محدودیت روبرو می کند. (۵)

موتور استرلینگ موتورهای گرما-کاری هستند که حرارت را تبدیل به انرژی جنبشی می کنند و نسبت به موتور بنزینی و دیزلی کارایی بیشتری دارند. امروزه چنین موتورهایی برای موارد خاص استفاده می شوند. موتورهای استرلینگ از یک منبع حرارتی خارجی مانند بنزین،

انرژی خورشیدی یا گازهای بیومس استفاده می کند و هیچ احتراقی داخل سیلندرهای موتور رخ نمی دهد. برای تامین انرژی مورد نیاز این موتور از یک دیش منعکس کننده استفاده می شود. این دیش انرژی حرارتی خورشید را مستقیماً بر روی موتور منعکس می کند و موتور شروع به تولید برق می کند. توان تولیدی موتورهای استرلینگ موجود از ۲۵ کیلووات فراتر نمی رود. این موتورها با دیش های کوچکتر عملکرد بهتری دارند. موتورهای توربین گازی کوچک، موسوم به میکروتوربین ها، می توانند خروجی بیشتری فراهم کنند؛ ولی بازده آنها از موتورهای استرلینگ به مراتب کمتر است. دیش های دارای موتورهای استرلینگ در اندازه هایی بین ۵ تا ۲۵ کیلووات ساخته می شوند. بازده نظری این موتورها در حدود ۴۰ درصد و بازده عملی آنها نزدیک به ۳۰ درصد است. میکروتوربین هایی با ظرفیت بیش از ۱۰۰ کیلووات نیز وجود دارد؛ اما بیشترین ظرفیت آزمایش شده آن در یک سامانه دیش استرلینگ ۳۰ کیلووات بوده است. تولید محدود موتورهای استرلینگ یکی از دلایل اصلی توجه بیشتر به میکروتوربین ها است. با این حال، به نظر می رسد با افزایش فعالیتهای توسعه ای جدید، تولید موتورهای استرلینگ در آینده نزدیک افزایش یابد. (۳)

سازه دیش استرلینگ، سازه ای مشبک است که روی آن تعداد زیادی آینه انحنادار نصب می شود. این آینه ها ممکن است از شیشه یا فلز براق ساخته شده و به شکل دایره یا مستطیل باشند. در مرکز این بشقاب پایه ای وجود دارد که موتور گرمایی روی آن قرار می گیرد. طرحواره دیش خورشیدی در شکل (۱-۱۰) دیده می شود.



شکل (۱-۱۰): طرحواره بشقاب خورشیدی (۳)

۱-۳-۳-۱: اجزاء اصلی نیروگاههای دیش استرلینگ

سطح متمرکزکننده: وظیفه آن متمرکز کردن شعاعهای نور خورشید در نقطه کانونی است. موتور استرلینگ: انرژی گرمایی تمرکز یافته نور را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده که توسط یک آلترناتور از آن الکتریسیته تولید میگردد. این موتورها با سیستمهای دما بالا و پرفشار با انتقال حرارت خارجی هستند که گاز هلیوم یا هیدروژن بعنوان سیال عامل آنها عمل می کند. بهترین عملکرد انواع این موتورها در دماهای بالای ۷۰۰ درجه سانتی گراد و فشارهایی تا ۲۰ مگاپاسکال انجام می شود.

ردیاب و سیستم کنترل: همانند نیروگاه های سهموی خطی و برج های خورشیدی، دیش های خورشیدی نیز می توانند برای اینکه پر بازده باشند از یک مکانیسم ردیابی دو محوره استفاده نمایند. سیستم ردیاب همواره سطح متمرکز کننده را در مقابل خورشید قرار می دهد تا نور دقیقاً در دریافت کننده موتور استرلینگ تمرکز یابد. بعلاوه سیستم کنترل با دریافت اطلاعات از سنسورهای مختلف و همچنین موتور استرلینگ، در هر وضعیت فرمان مناسبی برای کنترل سیستم ارسال می نماید.

همانند نیروگاه های سهموی خطی و برج های خورشیدی، دیش های خورشیدی نیز می توانند برای اینکه پر بازده باشند از یک مکانیسم ردیابی دو محوره استفاده نمایند.

سازه و فونداسیون: برای نگه داشتن سطح متمرکزکننده، موتور استرلینگ و سایر اجزاء سیستم و تحمل بارهای اینرسی، باد و زلزله وجود یک فونداسیون و سازه ای سبک و با استحکام ضروریست. (۳)

۱-۳-۲: مزایای نیروگاه دیش استرلینگ

- کاملاً به طور مستقل قابل نصب بوده و کارکرد و تعمیر و نگهداری ساده ای دارد.
- دارای دمای کارکرد و بازده بالاست.
- امکان تولید برق برای مناطق دور افتاده

۱-۳-۳: معایب نیروگاه دیش استرلینگ

- سیستم پشتیبان سوخت فسیلی پیوندی هنوز در دسترس نیست.
- نیاز به پایه های صلب و آفتابگردان کامل دارد که هزینه را افزایش می دهد. (۳)

۱-۳-۴: نمونه هایی از نیروگاه های دیش استرلینگ

کشورهای اروپایی به همراه استرالیا و آمریکا بیشترین تحقیقات را در زمینه سامانه های خورشیدی انجام داده اند. اولین سامانه دیش خورشیدی در دهه ۱۹۸۰ در کشور آمریکا آزمایش شد. هزینه دیش و دسترسی به موتورهای استرلینگ از جمله عوامل موثر بر تجاری سازی این سامانه است

در بین تمامی تکنولوژی‌های خورشیدی، سیستم‌های دیش استرلینگ بالاترین بازده تبدیل خورشید به الکتریسیته را از خود نشان داده‌اند و بنابراین بالاترین پتانسیل برای تبدیل شدن به ارزان‌ترین منبع انرژی تجدید پذیر را دارند. علیرغم ظرفیت مناسب فناوری دیش خورشیدی برای تولید برق در مقیاس نیروگاهی و واحدهای کوچکتر، نبود سرمایه گذاری کافی و پایین بودن نرخ رشد فناوری، سبب شده است از این فناوری در نیروگاههای برق خورشیدی استفاده نشود. تنها طرح نیروگاهی اجرا شده در این زمینه، نیروگاه ماریکوپا در ایالت آریزونای آمریکا است که با ظرفیت ۱۵ مگاوات در سال ۲۰۱۰ عملیات احداث آن آغاز شد؛ اما در پایان سال ۲۰۱۱ به دلیل بحران اقتصادی، پروژه ناتمام ماند. در کالیفرنیا نیز به واسطه مشوقهای موجود، شرکتی به نام استرلینگ انجین سیستمز قراردادهای مربوط به احداث دو واحد بزرگ تولید انرژی بر پایه فناوری بشقاب خورشیدی را به ظرفیت های ۸۵۰ و ۷۰۰ مگاوات در سن برناردینو و دره ایمپریال کالیفرنیا به تصویب رساند ولی در پی بحران اقتصادی آمریکا و مزیت رقابتی فوق العاده فناوری فتوولتائیک، این دو پروژه را در سال ۲۰۱۱ ورشکسته اعلام و دو طرح فتوولتائیک را جاگزین آنها کرد. دو پروژه دیش خورشیدی نیز به دو شرکت انگلیسی ای.ای.اس. سولار^{۱۴} و کی.رود^{۱۵} فروخته شد و هنوز خبری از ادامه آنها منتشر نشده است. (۳)

¹⁴ A.a.s.solar.co

¹⁵ K.rood.co

۱-۳-۴: نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده دودکش خورشیدی (Solar

(Chimney)



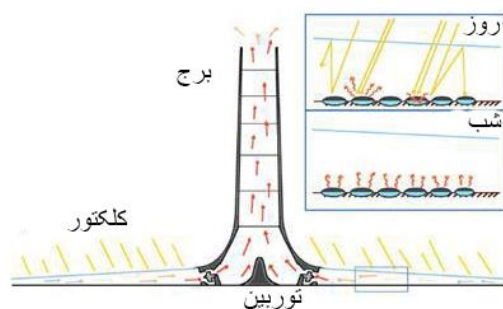
تصویر (۱-۱۱): نیروگاه دودکش خورشیدی (۵)

نیروگاه دودکش خورشیدی از ترکیب کلکتورهای خورشیدی و برج هدایت کننده هوا، برای تولید جریان هادی القائی هوا استفاده می‌کند و این جریان هوا موجب چرخش توربین‌های پله‌ای فشار و در نهایت تولید برق توسط ژنراتور می‌شود که روش دیگر برای تولید الکتریسیته از انرژی خورشید می‌باشد. در شکل (۱-۱۱) تصویری از این نیروگاه آورده شده است.

۱-۳-۴: نیروگاه‌های خورشیدی با سیستم برج‌های نیرو با هوای گرم

در نحوه عملکرد نیروگاه‌های خورشیدی با سیستم برج‌های نیرو با هوای گرم از سه پدیده طبیعی طرز کار گرمخانه‌های خورشیدی، طرز کار توربین‌های بادی و سیستم دودکش‌های بلند الهام گرفته شده است و اساس کار این نیروگاه بدین صورت است که هوای گرمی که بوسیله نور خورشید در یک گرمخانه خورشیدی تولید می‌شود، از اطراف به سمت دودکش هدایت شده و این هوای گرم باعث ارتفاع زیاد برج و سبک تر بودن از هوای سرد، با

سرعت و فشار زیاد صعود کرده و باعث ایجاد مکش در پایین برج می شود تا هوای گرم بیشتری را به درون بکشد که این جریان مداوم هوا، باعث چرخیدن پروانه و ژنراتوری که در پایین برج نصب شده است می گردد و بوسیله این ژنراتور برق تولید می شود. شکل (۱-۱۲) نمایی از شماتیک عملکرد این نوع نیروگاههای خورشیدی را نشان می دهد.



شکل (۱-۱۲): شماتیک عملکرد نیروگاههای حرارتی دودکش خورشیدی (۵)

این سیستم ها از برجی به ارتفاع تقریبی ۲۰۰ متر و قطر حدود ۱۰ متر تشکیل شده که این برج از ورق های گالوانیزه با ضخامت در حدود یک میلیمتر ساخته شده است. قسمت دیگر سیستم نیروگاه، گرمخانه نیروگاه است که به صورت یک ساختمان آهنی ساده است و از تعداد زیادی ستون فولادی با ارتفاع ۲ تا ۶ متر تشکیل شده و بر روی این ستون ها پرده های مربع شکل پلاستیکی انداخته می شود و انرژی حرارتی خورشید در زیر پوشش شیشه ای در گرمخانه ذخیره می شود.

قطر میدان گرمخانه حدود ۲۰۰ متر می باشد و کف گرمخانه با رنگ سیاه مخصوصی برای جذب بهتر حرارت رنگ شده و ارتفاع ستون های گرمخانه از اطراف به سمت محل استقرار دودکش که در مرکز میدان گرمخانه واقع شده، افزایش می یابد. همچنین پوشش شیشه ای مورد استفاده در محوطه گرمخانه، مانع خروج امواج بلند تابش خورشید به بیرون از آن می

شود و بدین ترتیب تقریباً ۵۰ درصد از انرژی خورشیدی تابیده شده به سطح گرمخانه به صورت گرما در زیر پوشش شیشه ای ذخیره می شود برای دستیابی به بازدهی بالاتر، هر آینه یک سامانه ردیابی خورشیدی دارد که جهت آن را مطابق با حرکت خورشید به نحوی تنظیم میکند که بیشترین بازتاب را به سمت دریافت کننده بالای برج داشته باشد.

توان قابل حصول در این سیستم متناسب با حاصلضرب جریان حجم هوا (حاصل از ارتفاع برج و سطح کلکتور) در واحد زمان و اختلاف فشار در توربین، می باشد. البته اگر اتلاف اصطکاکی وارد شود دیگر موضوع فوق صادق نیست. با این وجود تا زمانی که قطر کلکتور بیش از حد زیاد نشود می توان از قاعده سر انگشتی فوق استفاده کرد. قابل ذکر است که بدلیل بالا بودن حجم هوای جابجا شده در دودکش خورشیدی، می توان از این فناوری جهت جابجایی هوا در شهر های دارای پدیده اینورژن یا وارونگی^{۱۶} استفاده نموده و آلودگی را از لایه های نزدیک سطح زمین به لایه های بالاتر پمپاژ نمود. (۵)

۱-۳-۴-۱: مزایای نیروگاههای خورشیدی سیستم برج های نیرو با هوای گرم:

- امکان استفاده از مولفه های پراکنده تابش خورشید که در نیروگاه های هلیوستاتی و سهموی خطی قابل استفاده نبودند.

- عدم نیاز به آب که باعث می شود این نیروگاه ها را در هر مکانی احداث کرد.
- عدم آلودگی محیط زیست و استفاده از انرژی تجدید پذیر و پاک خورشید به عنوان سوخت اصلی نیروگاه

- عدم نیاز به تولید دماهای بالا که باعث افزایش طول عمر نیروگاه می شود.

¹⁶ inversion

- مصالح ارزان قیمت و قابل دسترس برای ساخت نیروگاه

۱-۳-۴-۲: معایب نیروگاههای خورشیدی سیستم برج های نیرو با هوای گرم:

- در این سیستم ها پیوند با سوخت های فسیلی به عنوان سوخت پشتیبان امکان پذیر نیست (برخلاف نیروگاه های خورشیدی هلیواستاتی یا سهموی خطی)
- پیچیدگی و هزینه بر بودن ساخت برج های نیرو و میدان گرم خانه این نیروگاه ها.
- توسعه نیافتن تکنولوژی ساخت این نیروگاه ها و عدم امکان دست یابی به مقادیر بالا توان تولیدی

- پایین بودن بازدهی نیروگاه و مدت زمان محدود بهره برداری از نیروگاه در طول سال
- نیاز به اشغال مساحت زیادی برای احداث گرم خانه نیروگاه توان خروجی
- مدت زمان بهره برداری سالانه محدود است (حدود دو هزار و ۵۰۰ ساعت).
- برای تولید توانهای بالا به دودکش بسیار بلند نیاز است. (۵)

۱-۳-۴-۲: نیروگاه خورشیدی با سیستم برج های نیرو با هوای سرد

پروسه تولید برق در این نیروگاهها تا حدودی شبیه به پروسه تولید برق در نیروگاههای آبی می باشد بدین صورت که هوای سرد و سنگین از ارتفاع بالا به طرف پایین حرکت می کند و پس از برخورد با پره های توربین، آن را به حرکت در می آورد و با چرخش توربین ژنراتور کوپل شده به آن انرژی الکتریکی تولید می شود.

فرآیند کلی تولید برق در این نیروگاه ها بدین شرح می باشد که استفاده از یک برج بلند با دهانه بزرگ که در یک منطقه خشک کویری احداث شده و پمپاژ کردن آب به بالای برج

باعث می شود تا هوای خشک و کویری که رطوبت را به خود جذب کرده و خنک تر و سنگین تر شده است، تحت تاثیر نیروی جاذبه زمین به سمت پایین برج حرکت کند و به دلیل ارتفاع زیاد برج سرعت هوای سرد در پایین برج افزایش می یابد و میزان توان تولیدی بیشتری را می توان از سیستم کسب کرد. توان حاصل از این نیروگاه مشابه نیروگاههای آبی، متناسب با حاصلضرب حجم در وزن مخصوص ماده سیال می باشد و اثبات گردیده که در حدود هشت برابر صرف شده برای پمپاژ آب به بالای برج را می توان از سیستم نیروگاه دریافت کرد.(۵)

۱-۳-۴-۲: مزایا نیروگاه های خورشیدی با سیستم برج های نیرو با هوای سرد :

این نیروگاه ها از انرژی پاک و تجدید پذیر خورشید استفاده می کنند که محیط زیست را آلوده نمی کند و حتی باعث افزایش رطوبت هوا و لطیف هوا در حوالی نیروگاه می شوند و باعث بوجود آمدن مزارع و زمین های قابل کشت در اطراف نیروگاه می شوند.

۱-۳-۴-۲: معایب نیروگاه های خورشیدی با سیستم برج های نیرو با هوای سرد :

- نیاز به حجم زیاد آب برای پمپاژ به بالای برج که تامین چنین آبی در یک منطقه کویری و خشک مشکل میباشد.
- نیاز به استفاده از موتور پمپ های قوی برای پمپاژ آب به بالای برج که خود هزینه احداث نیروگاه را افزایش می دهد.
- موتور پمپاژ آب به بالای برج نیاز به سوخت دارند که هزینه تولید برق را افزایش می دهند.

- با استفاده از این سیستم نیروگاه ها نمی توان به مقادری بالای توان تولید رسید زیرا نیاز به احداث برج های بسیار بلند با قطر دهانه بسیار بزرگ دارد که بسیار مشکل و هزینه بر است.

- در مناطق با هوای مرطوب یا در هنگام باریدن، افزایش رطوبت هوا باعث می شود تا رطوبت کمتری در برج توسط هوای گرم جذب شود و میزان تولید و راندمان نیروگاه کاهش یابد. (۵)

۱-۳-۴: اجزاء اصلی یک دودکش خورشیدی

- سقف نیمه شفاف (مثلاً شیشه ای) که در ارتفاع چندمتری زمین نصب می گردد. (کلکتور یا گرمخانه)
- دودکش مرتفع که در مرکز گرمخانه های شیشه ای قرار می گیرد (برج).
- توربین های بادی که در پایه دودکش قرار می گیرند (توربین).
- لوله های آب برای ذخیره سازی حرارت (ذخیره سازی).

کلکتور یا گرمخانه: هوای گرم مورد نیاز برای دودکش خورشیدی توسط پدیده گلخانه ای در یک محوطه که با پلاستیک یا شیشه پوشانده شده و حدوداً چند متری از زمین فاصله دارد، ایجاد می شود. البته با نزدیک شدن به پایه برج، ارتفاع ناحیه پوشانده شده نیز افزایش می یابد تا تغییر مسیر حرکت جریان هوا بصورت عمودی با کمترین اصطکاک انجام پذیرد. این پوشش باعث می شود که امواج تشعشع خورشید وارد شده و تشعشع های با طول موج بالا مجدداً از زمین گرم بازتاب شود.

ذخیره سازی: اگر به یک ظرفیت اضافی برای ذخیره سازی حرارت نیاز باشد، می توان از لوله های سیاه رنگ که با آب پر شده اند و بر روی زمین در داخل کلکتور قرار داده شده اند، بهره جست. این لوله را باید فقط یکبار با آب پر کرده و دو طرف آنها را بست و بنابراین تبخیر نیز رخ نخواهد داد. حجم آب در درون لوله ها بنحوی انتخاب می شود که بسته به توان خروجی نیروگاه لایه ای با ضخامت ۲۰-۵ سانتیمتر تشکیل شود.

در شب زمانی که هوا داخل کلکتور شروع به سرد شدن می کند، آب داخل لوله ها نیز حرارت ذخیره شده در طول روز را آزاد می کند. ذخیره حرارت به کمک آب بسیار موثرتر از ذخیره در خاک به تنهایی است چون همانطور که می دانید انتقال حرارت بین لوله و آب بسیار بیشتر از انتقال حرارت بین سطح خاک و لایه های زیرین است و این از آن بابت است که ظرفیت حرارتی آب پنج برابر ظرفیت حرارتی خاک است.

برج: برج به خودی خود نقش موتور حرارتی نیروگاه را بازی می کند و همانند یک لوله تحت فشار است که به دلیل دارا بودن نسبت مناسب سطح به حجم از اتلاف اصطکاک کمی برخوردار است. در این برج سرعت مکش به سمت بالای هوا تقریباً متناسب با افزایش دمای هوا د کلکتور و ارتفاع برج است. در یک دودکش خورشیدی چند مگاوانی، کلکتور باعث می شود که دمای هوا بین ۳۵-۳۰ درجه سانتی گراد افزایش یابد و این به معنی سرعتی معادل ۱۵ متر بر ثانیه است که باعث حرکت شتاب دار هوا نخواهد شد و بنابراین برای انجام عملیات تعمیر و نگهداری می توان براحتی وارد آن شد و ریسک سرعت بالای هوا وجود ندارد.

توربین ها: با بکارگیری توربینها، انرژی موجود در جریان هوا به انرژی مکانیکی دورانی تبدیل می شود. توربینهای موجود در دودکش خورشیدی شبیه توربینهای بادی نیستند و بیشتر شبیه توربین های نیروگاههای برق_آبی هستند که با استفاده از توربینهای محفظه دار، فشار استاتیک را به انرژی دورانی تبدیل می کنند. سرعت هوا در قبل و بعد از توربین نیز یکسان است. (۵)

۱-۳-۴: نمونه هایی از نیروگاههای برج خورشیدی

اولین برجهای خورشیدی سولار ۱ و سولار ۲ نام دارند که در کالیفرنای آمریکا احداث شدند. با این حال، این دو پروژه در حد برنامه های تجربی باقی ماندند و هرگز به مرحله تجاری نرسیدند. سامانه انتقال حرارت سولار ۱ بین سال های ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۸ بر پایه آب بود. این سامانه در سال ۱۹۹۶ به نمک مذاب تغییر یافت و فعالیت خود را با نام واحد سولار ۲ بین سالهای ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۹ ادامه داد. ظرفیت اسمی هر دو واحد ۱۰ مگاوات بود. تصویر برج و هلیواستاتهای این نیروگاه ها در تصویر (۱-۱۳) مشاهده می شود. سامانه نمک مذاب نیروگاه سولار ۲ ترکیبی از نیترات های سدیم و پتاسیم با قابلیت ذوب در دمای حدود ۲۲۰ درجه سانتیگراد بود. در این روش نمک مذاب پس از خروج از مخزن سرد، با عبور از میان دریافت کننده، گرمای حاصل از آینه های مزرعه خورشیدی را جذب می کند و با دمای بیش از ۵۵۰ درجه سانتیگراد به مخزن نمک داغ وارد می شود، در ادامه، نمک مذاب پس از خروج از مخزن ذخیره و عبور از مبدل حرارتی، با انتقال گرمای خود به آب و تبخیر آن، موجب حرکت توربین بخار و تولید برق می شود، سپس نمک مذاب سرد شده با دمای حدود ۲۹۰ درجه سانتیگراد، دوباره به مخزن ذخیره سرد باز می گردد تا بار دیگر برای عبور

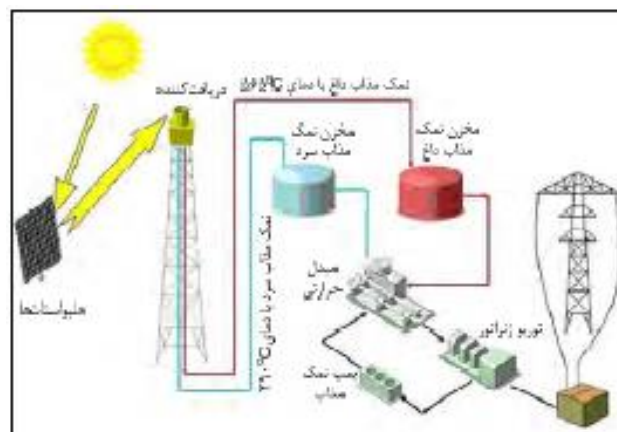
از دریافت کننده انرژی خورشیدی آماده شود. ترتیب این فرآیند را میتوان در شکل (۱-۱۴)

مشاهده کرد. (۳)



شکل (۱-۱۳): برج و هلیوستاتهای مورد استفاده

در نیروگاه های سولار ۱ و ۲ (۳)



شکل (۱-۱۴): طرحواره نیروگاه برج خورشیدی و اجزای آن (۳)

در اسپانیا نیز که یکی از فعال ترین کشورها در زمینه نیروگاههای خورشیدی است، سه

پروژه تحت حمایت اتحادیه اروپا، بنا شده است. اولین پروژه به نام PS، یک واحد تولید

انرژی از نوع برج خورشیدی با ظرفیت ۱۱ مگاوات است که از چرخه مستقیم آب-بخار و سامانه ذخیره آبی استفاده می کند. دومین پروژه نیروگاه PS همانطور که در شکل (۱-۱۵) دیده می شود، با ظرفیت ۲۰ مگاوات بود که در سال ۲۰۰۹ تکمیل و وارد شبکه شد. سومین پروژه نیز گماسولار نام دارد که در سال ۲۰۱۱ با ظرفیت ۱۷ مگاوات به بهره برداری رسید. علاوه بر نیروگاههای مذکور، چند طرح ۱۱۰، ۱۲۰ و ۵۰ مگاواتی نیز در سرزمینهای اشغالی فلسطین، آمریکا و آفریقای جنوبی دنبال می شود. طرحهای دیگری نیز در کشورهای آلمان و ترکیه با ظرفیت های ۱۵ و ۵ مگاوات اجرا و در سالهای ۲۰۰۸ و ۲۰۱۳ به بهره برداری رسیده است. تنها طرح عملیاتی به ظرفیت ۲۷۵ مگاوات در چین نیز که از سال ۲۰۰۹ آغاز شده، هنوز پیشرفت قابل ذکری نداشته است. (۳)



شکل (۱-۱۵): نیروگاه های برج خورشیدی

PS۱۰ (جلو) و PS۲۰ (عقب) در اسپانیا (۳)

۱-۳-۵: نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از کلکتورهای فرنل (Fresnel Collector)



شکل (۱-۱۶): نیروگاه‌های خورشیدی با استفاده از کلکتورهای فرنل (۵)

در این نیروگاه، کلکتورهای فرنل برای متمرکز کردن نور خورشید روی لوله گیرنده و همانند نیروگاه‌های سهموی خطی، به صورت خطی و در جهت شمال جنوب نصب می شوند. کلکتورها، تعداد زیادی آینه تخت با پهنای کم و طول زیاد هستند که کنار یکدیگر قرار می گیرند. زاویه قرار گیری هر کدام از آینه ها بصورتی است که بازتاب نور خورشید را روی بخش دریافت کننده متمرکز کنند.

در بخش دریافت کننده یک بازتاب دهنده ثانویه از نوع جفت سهموی قرار دارد که بازتاب آینه ها را جمع آوری کرده و روی لوله گیرنده می تاباند و با گرم شدن لوله گیرنده سیال داخل آن گرم می شود. در شکل (۱-۱۵) تصویری از بازتابنده های این نیروگاه نشان داده شده است.

عملکرد اینگونه نیروگاه‌های خورشیدی ممکن است به دو صورت باشد؛ در سیستم های متداول، سیال عامل داخل لوله گیرنده روغن است که پس از داغ شدن به مبدل‌های حرارتی منتقل شده و سپس موجب تولید بخار می شود اما در نوع دیگر که نوع بخار مستقیم (direct

steam) نامیده می شود طول کلکتورها بیش از یکصد متر می باشد که از یک طرف لوله دریافت کننده آب وارد شده و از طرف دیگر بخار خارج می شود و نیازی به سیستم های جانبی اضافی نیست و از طریق وارد شدن بخار آب به توربین ها و ژنراتور، الکتریسیته و یا همان برق تولید می شود. (۵)

در حال حاضر این سیستم فقط در کشورهای آمریکا و برخی کشورهای اروپایی که مدیریت آن با آلمان است و همچنین در اسپانیا نصب شده است.

تحقیق و توسعه در زمینه ساخت این نوع کلکتورها در حال حاضر در دنیا ادامه دارد. یک نمونه از این نوع ، تحت حمایت ۵ موسسه بزرگ اروپایی از جمله Solar mondo ساخته شده توسط انیستو فرانهورف آلمان می باشد، یک نمونه دیگر نیز در استرالیا توسعه داده شده است این نمونه ها از لحاظ ابعاد و عملکرد با هم تفاوت هایی دارند. یک نمونه از این کلکتورها نیز در ایران ساخته شده است و در سایت انرژی نو طالقان نصب شده است. کلیه مراحل طراحی و ساخت این نمونه توسط افراد در سازمان انرژی نو در ایران انجام شده و نمونه دیگری از انواع فرنل ها می باشد (۵).

۱-۳-۵: مزایای نیروگاه کلکتورهای فرنل

- سادگی ساخت و قیمت پایین
- هزینه تعمیرات و نگهداری پایین
- عدم آسیب پذیری در مقابل باد
- امکانات بهره برداری از زمین زیر آینه

۱-۳-۵: ایراد اصلی نیروگاه کلکتورهای فرنل

در هنگام طلوع و غروب آفتاب راندمان آنها به شدت پایین می آید و درکل راندمان

انها حدود ۷۰ درصد کلکتورهای سهموی خطی است. (۵)

۱-۴: بررسی تلفات متمرکز کننده ها

۱- تلفات ناشی از پراکنش پرتوهای نور رسیده از میدان (spillage):

انرژی منعکس شده توسط میدان خورشیدی با احتساب تلفات ناشی از جذب توسط اتمسفر، در فاصله بین آینه تا دریافت کننده و یا واقع شدن آنها در خارج دهانه دریافت کننده حفره ای، رخ می دهد. این مسائل ناشی از اندازه دریافت کننده یا خط های هدف گیری آینه ها (هلیوستات) می باشد. دریافت کننده ها معمولاً طوری طراحی می شوند تا پراکنش پرتوهای نور رسیده به آنها کمتر از ۵ درصد باشد.

۲- تلفات حرارتی ناشی از بازتابش:

قسمتی از انرژی نورانی ارسالی از طرف هلیوستاتها با توجه به ضریب جذب پوشش دریافت کننده در آن ساطع می شود. برای کاهش این انعکاس پرتوهای نور، می بایست از پوشش رنگ با ضریب جذب بالا بر روی سطوح جاذب حرارت دریافت کننده استفاده نمود. اتلاف حرارتی ناشی از بازتابش عموماً برای سطوحی که به تازگی رنگ آمیز شده باشند حدود پنج درصد یا کمتر می باشد ولی باید در نظر داشت که هرچه از بهره برداری واحد و در نتیجه طول عمر رنگ گذشته باشد این اتلاف بعثت کاهش کیفیت پوشش رنگ افزایش می یابد.

۳- تلفات ناشی از انتقال حرارت جابه جایی:

در اثر انتقال حرارت به هوای مجاور دریافت کننده از طریق جابجایی بخشی از انرژی به وسیله دریافت کننده هدر می رود. این اتلاف انرژی ترکیبی از اتلاف حرارت در اثر جابه جایی آزاد (انتقال حرارت بر اثر اختلاف دمای سطح با دمای محیط) و اتلاف حرارت در اثر جابه جایی اجباری (انتقال حرارت بر اثر وزش باد) رخ می دهد. مولفه اتلاف حرارت در اثر جابه جایی آزاد معمولاً بزرگتر می باشد. مقدار این تلفات حرارتی بایستی به صورت تحلیلی برای هر طرح محاسبه شده و با توجه به شرایط محیط مورد ارزیابی قرار گیرد. واضح است که این تلفات در دریافت کننده های خارجی بیشتر از دریافت کننده های حفره ای است و در دریافت کننده های حفره ای با بزرگتر شدن دهانه این تلفات بیشتر می شود.

۴- تلفات حرارتی ناشی از تشعشع:

تلفات انرژی حرارتی در اثر تشعشع و انتشار امواج نورانی تابعی از دمای دریافت کننده است. هر دو تلفات ناشی از انتقال حرارت جابه جایی و تشعشع، تابعی از دما و شکل دریافت کننده (حفره ای یا خارجی) می باشند. معمولاً مجموع تلفات حرارتی ناشی از جابه جایی و تشعشع بین پنج تا پانزده درصد با توجه به شرایط محیط می باشد.

۵- تلفاتی حرارتی ناشی از هدایت:

تعدادی از انرژی دریافت کننده در اثر انتقال حرارت به طریق هدایت از عایق ها و اتصالات و اجزاء سازه دریافت کننده تلف می گردد مقدار این تلفات حرارتی برای حالتی که عایق کاری به خوبی صورت گرفته باشد کمتر از یک درصد است.

کاهش تلفات حرارتی دریافت کننده خورشیدی بسیار مهم می باشد. طراحی بهینه دریافت کننده می بایست براساس به حداقل رساندن قیمت در ازای انرژی تولید شده توسط کل سیستم، ارزیابی شده و با توجه به آن کاهش تلفات حرارتی صورت گیرد زیرا این مسئله بر روی قیمت و عملکرد کلیه اجزاء سیستم اثر می گذارد. اصولاً راندمان دریافت کننده با افزایش دما کاهش می یابد (۱).

سیستم های سهموی خطی

همانطور که در فصل گذشته آورده شد ، سیستم های متمرکز کننده سهموی خطی قابل توجه ترین روش در بین روشهای حرارتی - برقی برای تولید انرژی تجدید پذیر می باشند. بخش عمده ی این متمرکزکننده ها شامل سطوح انعکاسی سهموی می باشند که با توجه به ساختار هندسی آن می بایست تابش مستقیم خورشید در کانون خطی آن منعکس شود. جنس این سطوح ، ازآینه های شیشه ای تشکیل شده و بر روی نگهدارنده در راستای شمالی - جنوبی قرار می گیرند. سیستم ردیاب خورشیدی به کار رفته در این سیستم ها نیز به گونه ای که پرتوهای خورشید در تمام مدت بر روی لوله های جاذب منعکس شود ،مورد استفاده قرار گرفته است. در این فصل به بررسی عملکرد حرارتی - اپتیکی و آنالیز انرژی این کلکتورها پرداخته می شود.(۱)

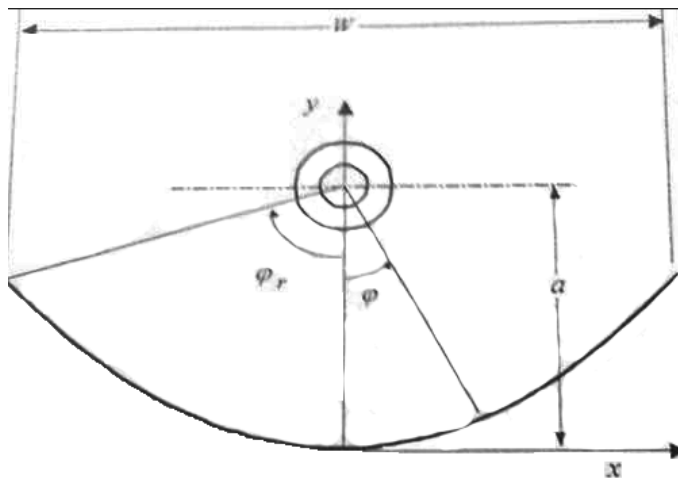
۱-۲ روابط عملکرد حرارتی کلکتور

۱-۱-۲ نسبت ها و پارامترهای هندسی کلکتور

مقطع عمود بر محور متمرکز کننده به شکل سهمی می باشد. با در نظر گرفتن شکل (۱-۲) که مقطع متمرکز کننده را در مختصات $X-Y$ نشان می دهد، معادله سهمی از رابطه زیر پیروی می کند:(۹)

$$y = \frac{x^2}{4a}$$

(۱-۲)



شکل (۱-۲): مقطع عمود بر محور متمرکز کننده در مختصات $x-y$ (۹)

که a فاصله کانونی سهمی می باشد و عبارتست از فاصله کانون تا محور سهمی که همان مبدا مختصات است، φ_r زاویه دور سهمی می باشد و عبارت است از زاویه بین محور عمودی و خطی که کانون سهمی را به لبه سهمی متصل می کند. چنانچه از کانون سهمی خطی به هر نقطه ای از سهمی رسم شود، زاویه بین محور عمودی و این خط را با φ نمایش می دهند و از صفر تا φ_r متغیر می باشد. عرض دهانه متمرکزکننده برابر W می باشد، بنابراین مختصات نقطه لبه متمرکز کننده با توجه به رابطه (۱-۲) بصورت زیر بدست می آید. (۹)

$$\begin{cases} x \big|_{\varphi=\varphi_r} = \frac{W}{2} \\ y \big|_{\varphi=\varphi_r} = \frac{W^2}{16a} \end{cases} \quad (۲-۲)$$

با دانستن φ_r و W همواره می توان فاصله کانونی سهمی را بدست آورد و معادله سهمی

مشخص می گردد با توجه به شکل (۱-۲) و نوشتن روابط مثلثاتی خواهیم داشت:

$$\tan \varphi_r = \frac{x}{a-y} \quad (۳-۲)$$

با قرار دادن مقادیر y, x از رابطه (۲-۲) در رابطه (۳-۲) و خلاصه کردن آن، فاصله کانونی

سهمی بصورت زیر بدست می آید:

$$a = \frac{w(1 \pm \sqrt{1 + \tan^2 \varphi_r})}{8 \tan \varphi_r} \quad (۲ - ۴)$$

در رابطه بالا علامت مثبت برای $\varphi_r \leq 90^\circ$ و علامت منفی برای $\varphi_r > 90^\circ$ بکار

می رود پارامتر هندسی دیگری که در روابط متمرکزکننده ها اهمیت دارد، نسبت تمرکز می

باشد. این پارامتر با علامت C نمایش داده می شود و عبارت است از مساحت سطح دهانه

متمرکز کننده به مساحت سطح جانبی لوله گیرنده با توجه به اینکه عرض متمرکز کننده W و

طول آن L و قطر خارجی لوله جذب کننده D می باشد، نسبت تمرکز به صورت زیر بدست

می آید: (۹)

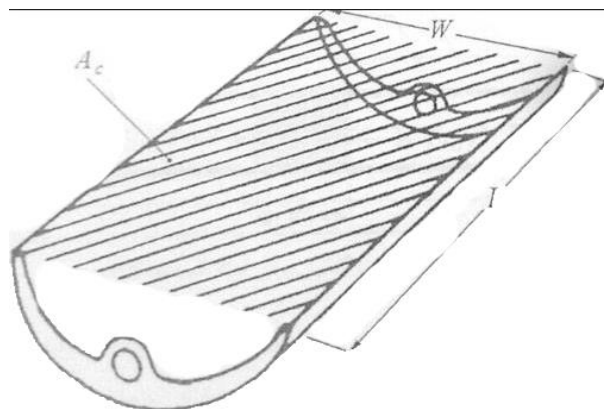
$$C = \frac{(W - D_o)}{\pi D_o} \quad (۲ - ۵)$$

مساحت کل متمرکز کننده سهموی خطی عبارت است از مساحت سطح دهانه کلکتور که

تشعشع خورشید از این دهانه وارد متمرکزکننده می گردد و مطابق شکل (۲-۲) از

حاصلضرب طول در عرض کلکتور بدست می آید: (۹)

$$A_C = W \cdot L \quad (۲ - ۶)$$

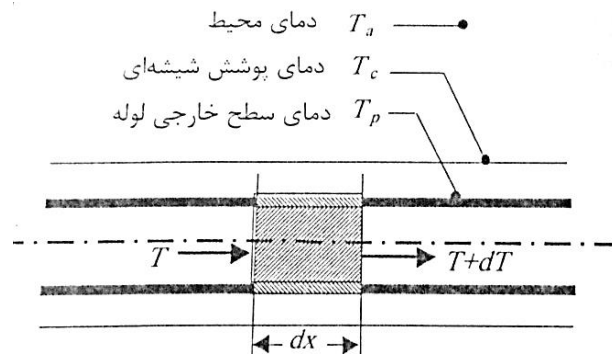


شکل (۲-۲): سطح مقطع ورود شار تشعشعی خورشید در متمرکز کننده (۹)

اینجا لازم به ذکر است که طراحی هندسی و تعیین شرایط عملکردی متمرکز کننده همواره پیرامون قطر خارجی لوله جذب کننده انجام میشود. به عبارت دیگر قطر خارجی لوله فلزی مبنای اولیه طراحی می باشد مساحت کلکتور A_c و قطر خارجی لوله جذب کننده D_o ، همواره معلوم فرض می شوند و بنابراین در انتها پس از بدست آوردن نسبت تمرکز بهینه، می توان عرض و طول متمرکز کننده را بدست آورد. (۹)

۲-۱-۲ شار تشعشعی جذب شده توسط لوله جاذب

برای محاسبه شار جذب شده بوسیله سطح خارجی لوله فلزی باید خواص تشعشی سطوح و همچنین ضریب دریافت تشعشع توسط لوله جاذب به سبب تلفات اپتیکی متمرکز کننده مشخص باشد. شکل (۲-۳) یک المان حجمی از لوله جاذب را نشان می دهد. طول المان dx می باشد و سیال با دمای T وارد و با دمای $T + dT$ خارج می شود. دمای متوسط سطح خارجی لوله جذب کننده T_p و دمای متوسط پوشش شیشه ای آن T_c فرض می گردد و T_a دمای محیط می باشد. (۲۳)



شکل (۲-۳): المان حجم کنترل برای لوله گیرنده کلکتور (۲۳)

شار تشعشعی خورشید که با I_b نمایش داده می شود عمود بر سطح دهانه متمرکز کننده وارد کلکتور می گردد. قسمتی از این شار تشعشی به خاطر تلفات ایتیکی و همچنین خواص تشعشعی سطوح تلف می گیرد و باقیمانده آن جذب سطح خارجی لوله جذب کننده می شود. با نوشتن رابطه انرژی برای حجم کنترل لوله نشان داده شده در شکل (۲-۳) می توان معادله دیفرانسیلی حاکم بر عملکرد کلکتور را بدست آورد.

هنگامی که شار I_b وارد سطح دهانه کلکتور می گردد، قسمت کمی از آن با برخورد به لوله جذب کننده جذب لوله فلزی می گردد، قسمت بیشتر آن پس از عبور از دهانه متمرکز کننده به آینه سهموی برخورد کرده و پس از بازتابش از آینه بر روی لوله جذب متمرکز می شود. مقدار تشعشع جذب شده به سطح خارجی لوله جذب کننده پس از بازتابش در آینه به صورت زیر است: (۲۳)

$$d\dot{Q}_{in,1} = I_b \rho \gamma (\tau a)_b \quad (۷ - ۲)$$

که در این رابطه:

ρ ضریب انعکاس^{۱۷} آینه، γ ضریب دریافت^{۱۸} متمرکز کننده بدلیل تلفات اپتیکی متمرکز کننده $T\tau$ ، ضریب عبور^{۱۹} تشعشع از پوشش شیشه ای و a ضریب جذب^{۲۰} سطح خارجی لوله می باشد.

منظور از $(\tau a)_b$ حاصلضرب ضرایب عبور و جذب مجموعه دریافت کننده (لوله فلزی و پوشش شیشه ای) است و مقصود از اندیس b مقدار متناظر این ضرایب برای جسم سیاه می باشد. مقدار تمامی ضرایب معرفی شده بین صفر تا یک است.

قسمت دیگری از پرتو خورشید که مستقیماً توسط خود لوله گیرنده جذب می شود بصورت زیر محاسبه می شود: (۲۳)

$$d\dot{Q}_{in,2} = I_b (\tau a)_b D_o dx \quad (۸ - ۲)$$

از طرف دیگر به علت اختلاف دمای سطح خارجی لوله جاذب و دمای محیط، قسمتی از حرارت جذب شده بصورت تشعشع، جابجایی و هدایت حرارتی از سطح خارجی لوله به محیط اطراف منتقل می گردد که جزو تلفات حرارتی کلکتور محسوب می شود. این اتلاف حرارت با ضریب کلی انتقال حرارت U_I صورت می پذیرد. لذا حرارت خارج شده از حجم کنترل فوق بصورت زیر می باشد:

$$d\dot{Q}_{out} = U_I \pi D_o (T_p - T_a) dx \quad (۹ - ۲)$$

بنابراین حرارت مفید جذب شده توسط گیرنده با نوشتن رابطه تعادل انرژی بدست می آید:

$$d\dot{Q}_u = d\dot{Q}_{in,1} + d\dot{Q}_{in,2} - d\dot{Q}_{out} \quad (۱۰ - ۲)$$

¹⁷.specular reflectivity factor

¹⁸.Intercept factor

¹⁹.transmissivity factor

²⁰.absorptivity factor

با جایگذاری روابط (۷-۲) تا (۹-۲) در رابطه (۱۰-۲) خواهیم داشت:

$$d\dot{Q}_u = [I_b (\tau a)_b \pi D_o + I_b \rho \gamma (\tau a)_b (W - D_o) - U_l \pi D_o (T_p - T_a)] dx \quad (۱۱ - ۲)$$

با ضرب و تقسیم رابطه (۱۱-۲) در $(W - D_o)$ بدست خواهیم آورد:

$$d\dot{Q}_u = \left[I_b (\tau a)_b \frac{D_o}{W - D_o} + I_b \rho \gamma (\tau a)_b - \frac{U_l \pi D_o}{W - D_o} (T_p - T_a) \right] (W - D_o) dx \quad (۱۲ - ۲)$$

با استفاده از تعریف نسبت تمرکز رابطه بالا بصورت زیر بازنویسی میگردد:

$$d\dot{Q}_u = \left[S - \frac{U_l}{C} (T_p - T_a) \right] (W - D_o) dx \quad (۱۳ - ۲)$$

که در این رابطه S شار تشعشعی ای می باشد که توسط لوله گیرنده جذب می شود و بصورت زیر بدست آمد:

$$S = I_b (\tau a)_b \frac{D_o}{W - D_o} + I_b \rho \gamma (\tau a)_b \quad (۱۴ - ۲)$$

همواره راندمان اپتیکی کلکتور عبارت است از نسبت شار تشعشعی جذب شده توسط گیرنده به شار تشعشعی وارد شده به کلکتور. بنابراین می توان راندمان اپتیکی کلکتور را به صورت زیر محاسبه نمود: (۲۳)

$$\eta = \frac{S}{I_b} \quad (۱۵ - ۲)$$

۲-۱-۳ محاسبه حرارت مفید جذب شده

برای بدست آوردن حرارت مفید جذب شده بر حسب دمای ورودی سیال به کلکتور و دمای محیط، از رابطه (۱۳-۲) که در قسمت قبل بدست آمد استفاده می شود. \dot{Q}_u حرارت مفید جذب شده توسط سیال در کلکتور می باشد که از رابطه (۱۳-۲) بدست آورده می شود. از طرف دیگر نمی توان برای حجم کنترل نشان داده شده در شکل (۳-۲)، رابطه انتقال حرارت را بر اساس اختلاف دمای سطح خارجی لوله و دمای محلی سیال نوشت. ضریب کلی انتقال حرارت بین سطح خارجی لوله و سیال U_c می باشد بنابراین داریم:

$$d\dot{Q}_u = [U_c \pi D_o (T_p - T)] dx \quad (۱۶ - ۲)$$

با حذف T_p بین دو رابطه (۱۳-۲) و (۱۶-۲) بدست خواهیم آورد:

$$d\dot{Q}_u = F' \left[S - \frac{U_l}{C} (T - T_a) \right] (W - D_o) dx \quad (۱۷ - ۲)$$

که T دمای محلی سیال است و F' ضریب راندمان کلکتور می باشد که به صورت زیر بیان می گردد:

$$F' = \frac{1}{U_l \left[\frac{1}{U_l} + \frac{1}{U_c} \right]} \quad (۱۸ - ۲)$$

لازم به ذکر است که ضرایب انتقال حرارت U_l و U_c هر دو بر اساس سطح خارجی لوله گیرنده تعریف شده اند و در یک فصل مجزا بدست آورده خواهند شد. (۲۹)

از طرف دیگر با توجه به اینکه سیال به مقدار dT افزایش دما پیدا می کند. خواهیم داشت:

$$d\dot{Q}_u = \dot{m} C_p dT \quad (۱۹ - ۲)$$

که \dot{m} دبی جرمی سیال و C_p گرمای ویژه سیال می باشند با حذف $d\dot{Q}_u$ بین معادلات (۱۷ و (۱۹-۲) معادله دیفرانسیل دمای سیال به دست می آید:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{F' U_c \pi D_o}{\dot{m} C_p} \left[\frac{CS}{U_l} - (T - T_a) \right] \quad (۲۰ - ۲)$$

شرایط مرزی معادله دیفرانسیل فوق بصورت زیر است:

$$x = 0 \quad \rightarrow \quad T = T_{in} \quad (۲۱ - ۲)$$

که T_{in} دمای سیال در ورود به کلکتور می باشد با حل معادله (۲۰-۲) دمای سیال بر حسب

طول بصورت زیر بدست می آید:

$$T(x) = \left(\frac{CS}{U_l} + T_a - T_{in} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{F' U_l \pi D_o x}{\dot{m} C_p} \right) \right] + T_{in} \quad (۲۲ - ۲)$$

با توجه به اینکه در $x = L$ دمای سیال برابر $T = T_{out}$ می باشد. لذا از معادله بالا خواهیم

داشت:

$$T_{out} - T_{in} = \left(\frac{CS}{U_I} + T_a - T_{in} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{F' U_I \pi D_o x}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2-23)$$

همچنین با انتگرالگیری از رابطه (2-19) می توان کل حرارت مفید جذب شده را بدست آورد:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (2-24)$$

بنابراین با حذف $(T_{out} - T_{in})$ بین دو رابطه (2-23) و (2-24)، کل حرارت مفید جذب شده توسط سیال بصورت زیر بدست می آید:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p \left(\frac{CS}{U_I} + T_a - T_{in} \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{F' U_I \pi D_o x}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2-25)$$

با تعریف ضریبی به نام ضریب برداشت حرارت²¹ F_R ، میتوان رابطه (2-25) را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\dot{Q}_u = F_R \left[S - \frac{U_I}{C} (T_{in} - T_a) \right] (W - D_o) L \quad (2-26)$$

که در آن

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{U_I \pi D_o L} \left[1 - \exp \left(- \frac{F' U_I \pi D_o L}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2-27)$$

می باشد. در رابطه (2-26) مشاهده می شود که اختلاف دمای $(T_{out} - T_{in})$ به صورت ضریبی برای U_I در آمده است و از همین جا مفهوم پارامتر F_R مشخص می گردد. در حقیقت نسبت حرارت مفید جذب شده به مقدار حرارت جذب شده اگر دمای سطح خارجی لوله برای دمای ورودی سیال بود، می باشد.

با توجه به حرارت مفید جذب شده و کل انرژی تشعشعی وارد شده به متمرکز کننده، می توان راندمان حرارتی لحظه ای کلکتور را بدست آورد:

²¹ Heat recovery factor

$$\eta_I = \frac{\dot{Q}_u}{I_b A_C} \quad (2-28)$$

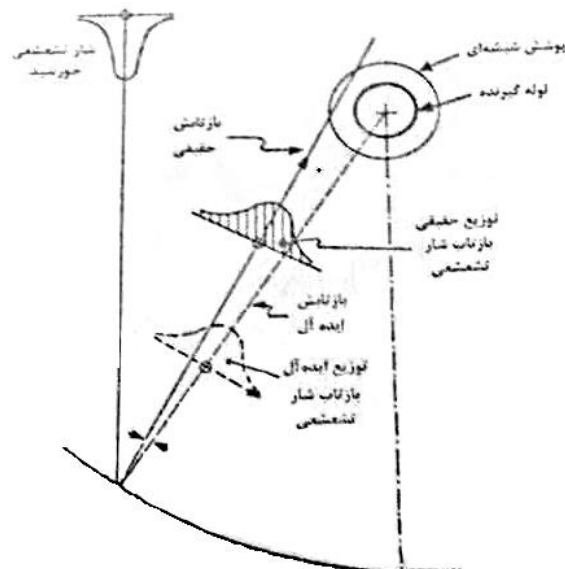
که η_I راندمان قانون اول کلکتور می باشد. (۲۹)

۲-۲ تحلیل اپتیکی متمرکز کننده

۱-۲-۲ منشا خطاهای اپتیکی

در محاسبه شار جذب شده توسط لوله گیرنده، ضریب دریافت γ تعریف گردید. وجود این ضریب به سبب خطاهای اپتیکی متمرکز کننده می باشد. بدین صورت که شار تشعشعی بازتاب شده از آئینه، به طور کامل به لوله گیرنده برخورد نمی کند و قسمتی از آن از اطراف لوله فلزی متفرق میگردد. ضریب دریافت γ درصد شار تشعشعی بازتاب شده از آئینه می باشد که جذب لوله گیرنده می شود و در مقدار راندمان اپتیکی متمرکزکننده نقش اساسی ایفا می کند. (۶)

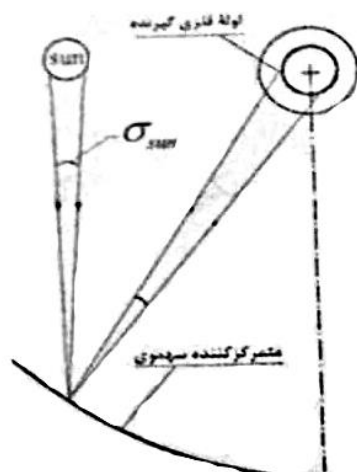
شکل (۲-۴) نحوه منحرف شدن شار تشعشعی را نشان می دهد مطابق این شکل، در حالت ایده آل شار تشعشعی متمرکز کننده به صورت عمود بر سطح دهانه متمرکز کننده وارد آن می شود و پس از بازتابش آئینه، بسوی کانون سهمی هدایت می گردد. اما به سبب خطاهای اپتیکی متمرکز کننده، شار تشعشعی از حالت معمولی خارج شده و به سوی کانونی غیر از کانون اصلی متمرکز کننده منحرف می گردد و لذا قسمتی از آن بدون اینکه به گیرنده فلزی برخورد کند، از کنار آن می گذرد و به هدر می رود.



شکل (۲-۴): نحوه ی انحراف مسیر توزیع شار تشعشعی خورشید (۶)

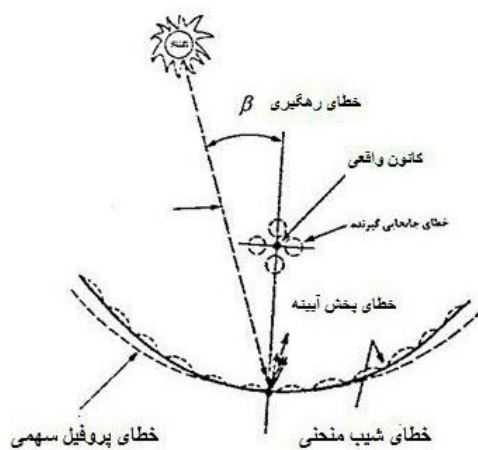
مقدار γ با توجه به خطاهای موجود محاسبه می گردد. منشا و ریشه خطاهای اپتیکی رامی توان بصورت زیردسته بندی نمود:

۱- خطای پهنای خورشید: از آنجائیکه خورشید یک نقطه مادی بدون بعد نمی باشد لذا از هر نقطه ناظر بر روی متمرکز کننده، خورشید دارای ابعاد هندسی است. با مشاهده شکل (۲-۵) می توان گفت که پرتوهای خورشیدی به صورت یک زاویه فضایی مخروطی به هر نقطه از آئینه سهموی تابیده می شود. لذا بازتابش این پرتوها نیز به صورت یک زاویه مخروطی خواهد بود. این امر خود باعث توزیع متفرق تشعشع خورشید می شود. مقدار این زاویه را با σ_{sun} نشان می دهند که یک پارامتر خطای بدیهی در تمام سیستم های متمرکز کننده خورشیدی می باشد و بر حسب رادیان بیان می گردد و به عنوان انحراف معیار خطای پهنای خورشید نامیده می شود.



شکل (۲-۵): نحوه ی تاثیرپذیری پهنای خورشید در وجود خطاهای اپتیکی (۶)

سایر خطاهای سیستم متمرکز کننده که ناشی از مواد، ساخت، مونتاژ و یا عملکرد متمرکز کننده می باشند در شکل (۲-۶) نمایش داده شده است و به شرح زیر می باشند



شکل (۲-۶): نمایش خطاهای اپتیکی بر روی متمرکز کننده سهموی (۶)

۲- خطای پخش آینه: این خطا ناشی از خاصیت پخش آینه می باشد و جزو دسته خطاهایی است که مربوط به مواد ساخت آینه می باشد مطابق شکل (۲-۶) بر اثر این خطا، آینه در برابر

هر پرتو مستقیم از خود خاصیت پخش کردن^{۲۲} نشان می دهد و پرتوهای بازتابش آن کاملاً در یک امتداد قرار نمی گیرند انحراف معیار این خطا با σ_{mir} نشان داده می شود.

۳- خطای شیب های آینه: با توجه به شکل (۶-۲) سطح آینه ممکن است به صورت سطح موجی شکل باشد. همچنین خطای پروفیل سهمی نیز می تواند وجود داشته باشد و تمام این خطاها به نام خطاهای شیب آینه در نظر گرفته می شود و انحراف معیار این خطا با σ_{stop} نمایش داده می شود.

۴- خطای تعقیب خورشید: باز هم مطابق شکل (۶-۲)، متمرکزکننده نمی تواند در حین عملکرد دهانه خود را کاملاً عمود بر جهت پرتو خورشید نگاه دارد. بنابراین همواره بین پرتو خورشید و خطر کانونی متمرکز کننده زاویه ای بوجود می آید که ناشی از تعقیب خورشید می باشد. این خطای اپتیکی، جزو خطاهای عملکردی به حساب می آید و به نام خطای تعقیب خورشید نامیده می شود و انحراف معیار این خطا با پارامتر β مشخص می شود.

۵- خطای جابجایی گیرنده: در شکل (۶-۲) مشاهده می شود که امکان دارد لوله فلزی گیرنده از کانون اصلی سهمی خارج شود که این خود تولید خطای اپتیکی می نماید. این خطا نیز بر اثر ضعف ساخت یا مونتاژ ایجاد می شود. مقدار این جابجایی با dr نشان داده میشود و برحسب واحد طول بیان می گردد و به عنوان خطای ناشی از جابجایی گیرنده بکار می رود. (۶)

۲-۲-۲ بدست آوردن ضریب دریافت (۷)

²² Diffusivity

همانطور که قبلاً شرح داده شد، مقدار ضریب دریافت تابعی از خطاهای اپتیکی می باشد، یک مدل سازی برای محاسبه γ در سال ۱۹۸۵ توسط Guven در مرجع (۶) ارائه شده است. سه خطای اول یعنی خطای پهنای خورشید و پخش آینه و شیب های آینه را در مجموع در یک پارامتر خطای کلی در نظر گرفته می شده و با نام کل انحراف معیار خطاهای ذکر شده به صورت زیر بدست آورده می شود: (۶)

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{sun} + \sigma_{mir}^2 + (2\sigma_{stop})^2} \quad (۲ - ۲۹)$$

از ضرب پارامترهای σ_{tot} و β در نسبت تمرکز و تقسیم dr به قطر خارجی لوله فلزی پارامترهای خطای عمومی برای متمرکز کننده به دست می آید یعنی:

$$\sigma^* = \sigma_{tot} \cdot C \quad (۲ - ۳۰)$$

$$\beta^* = \beta \cdot C \quad (۲ - ۳۱)$$

$$d^* = \frac{dr}{D_o} \quad (۲ - ۳۲)$$

که σ^*, β^*, d^* پارامترهای خطاهای عمومی یا جهانی^{۲۳} برای متمرکز کننده سهموی نامیده می شوند. با مدلسازی که در مرجع (۶) ارائه شده است، اکنون ضریب دریافت تابع چهار متغیر می باشد:

$$\gamma = \gamma(\sigma^*, \beta^*, d^*, \varphi_r) \quad (۲ - ۳۳)$$

بنابراین ضریب دریافت علاوه بر اینکه تابع پارامترهای خطای بی بعد عمومی می باشد، تابع زاویه دور متمرکز کننده نیز است. رابطه ای که برای محاسبه γ بدست آورده شده است. به صورت زیر ارائه می گردد:

²³ Universal Error Parameter

$$\gamma = \frac{1 + \cos \varphi_r}{2 \sin \varphi_r} \int_0^{\varphi_r} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi) (1 - 2d^* \sin \varphi) - \pi \beta^* (1 + \cos \varphi_r)}{\sqrt{2\pi} \sigma^* (1 + \cos \varphi_r)} \right) - \operatorname{erf} \left(- \frac{\sin \varphi_r (1 + \cos \varphi) (1 + 2d^* \sin \varphi) + \pi \beta^* (1 + \cos \varphi_r)}{\sqrt{2\pi} \sigma^* (1 + \cos \varphi_r)} \right) \right] \frac{d\varphi}{1 + \cos \varphi} \quad (34)$$

که erf تابع خطا^{۲۴} می باشد که تعریف آن به صورت زیر است: (۶)

$$\operatorname{erf}(w) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^w e^{-\vartheta^2} d\vartheta \quad (35 - 2)$$

۳-۲-۲ بررسی تغییرات ضریب دریافت γ

برای محاسبه γ می بایست مقادیر $\sigma^*, \beta^*, d^*, \varphi_r$ مشخص باشد. در مورد خطاها می توان گفت که مقدار آنها با توجه به تکنولوژی ساخت و مونتاژ و رهگیری خورشید و مواد بکار رفته در متمرکزکننده تغییر میکند. در مرجع (۷) مقادیر متوسط این خطاها برای کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه آورده شده است. جدول (۱-۲) مقادیر خطاهای اپتیکی را نشان می دهد. (۶)

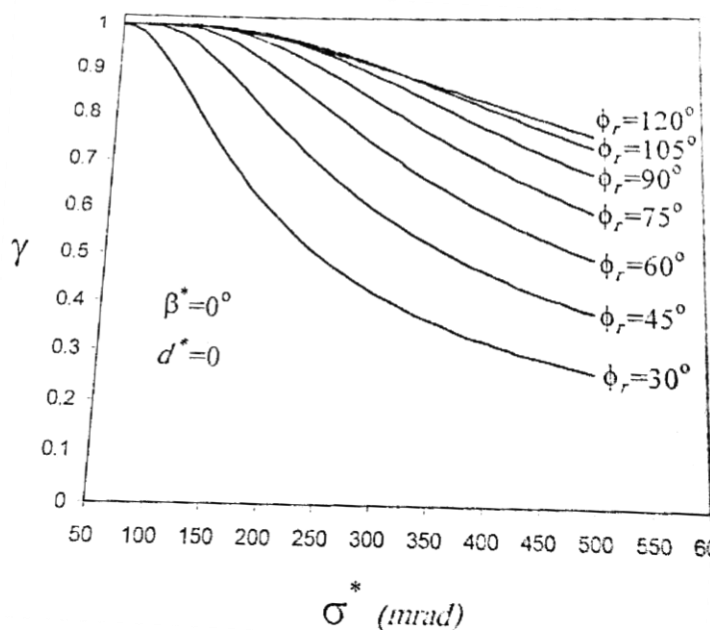
جدول (۱-۲): مقادیر متوسط پارامترهای خطای اپتیکی (۶)

پارامتر خطا	کشورهای توسعه یافته	کشورهای در حال توسعه یافته	کشورهای در حال توسعه یافته
$\sigma(mrad)$	۶,۴	۸,۷	۱۱,۳
$\beta(degree)$	۰,۲۵	۰,۵	۱
$d_r(mm)$	۳,۱	۶,۲	۰,۲

²⁴ Error Function

با استفاده از برنامه نویسی کامپیوتری که جهت به دست آوردن γ انجام شده است، محاسبه مقدار γ برای σ^*, d^*, φ_r های مختلف امکان پذیر می باشد. در این قسمت برای دو حالت مختلف، مقادیر و نمودارها ارائه شده است و صحت آنها با مقادیر ارائه شده در مراجع (۸) و (۶) مقایسه شده است.

در حالت اول مقادیر β^*, d^* برابر صفر در نظر گرفته شده اند و مقدار γ با تغییر σ^* برای φ_r های مختلف بدست آورده شده است. در شکل (۷-۲) منحنی های تغییرات γ مشاهده می شود، ملاحظه می گردد که با افزایش σ^* همواره γ کاهش پیدا می کند. به عبارت دیگر از آنجاییکه $\sigma^* = \sigma_{tot} \cdot c$ می باشد و σ_{tot} برای یک متمرکز کننده مقدار ثابتی فرض می شود لذا می توان اظهار داشت که همواره ضریب دریافت γ با افزایش نسبت تمرکز کاهش پیدا می کند. یعنی هر چه نسبت تمرکز بیشتری داشته باشیم خطاهای اپتیکی متمرکز کننده نیز بیشتر خواهد شد.



شکل (۷-۲): منحنی های تغییرات γ برای ϕ_r های مختلف (۱۳)

در ضمن در این شکل ملاحظه می شود که با افزایش زاویه دور ϕ_r در یک σ^* ثابت، مقدار

γ افزایش پیدا می کند. هر چقدر که به سوی ϕ_r های بالاتر حرکت کنیم. مقدار افزایش γ کمتر

می گردد و به عبارت ریاضی می توان نوشت :

$$\left. \frac{\Delta \gamma}{\Delta \phi_r} \right|_{\sigma^*} = cte, \phi_r > 90^\circ \ll \left. \frac{\Delta \gamma}{\Delta \phi_r} \right|_{\sigma^*} = cte, \phi_r < 75^\circ \quad (۳۶-۲)$$

با توجه به این مطلب و مشاهده شکل (۸-۲) که تعدادی متمرکز کننده سهموی را با یک

کانون ثابت و برای ϕ_r های مختلف نشان می دهد، میتوان ϕ_r را برای متمرکز کننده ها مشخص

نمود با توجه به این شکل هر چقدر زاویه دور یعنی ϕ_r افزایش یابد وزن و هزینه ساخت نیز

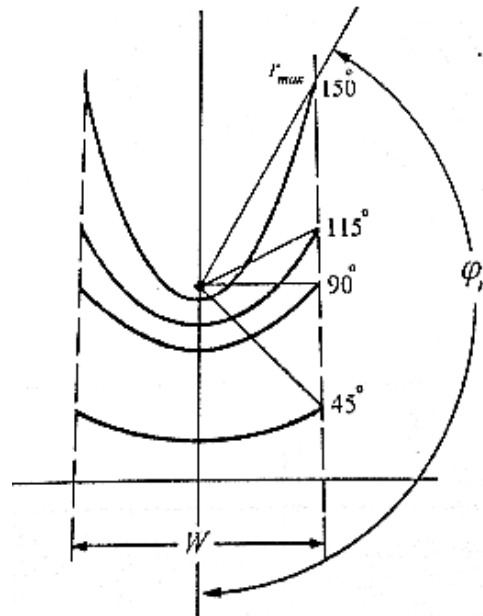
افزایش پیدا میکند و مشکلات ساخت نیز بیشتر می گردد و از آنجاییکه در ϕ_r های حدود ۹۰

درجه و بالاتر، افزایش ϕ_r در افزایش γ تاثیر چندانی ندارد، لذا در مراجع مقدار بهینه ϕ_r بین ۸۰

تا ۱۰۰ درجه معرفی گردیده است (۸) در کاربردهای متمرکز کننده ها برای نیروگاه ها،

مقدار φ_r ، ۸۰ یا ۹۰ درجه دیده شده است (۹) لذا در ادامه طراحی بهینه برای متمرکزکننده ها،

مقدار $\varphi_r = 90^\circ$ به عنوان بهترین زاویه دور انتخاب می گردد (۱۳)



شکل (۸-۲): متمرکزکننده سهموی با یک کانون ثابت و با زوایای دور مختلف (۱۳)

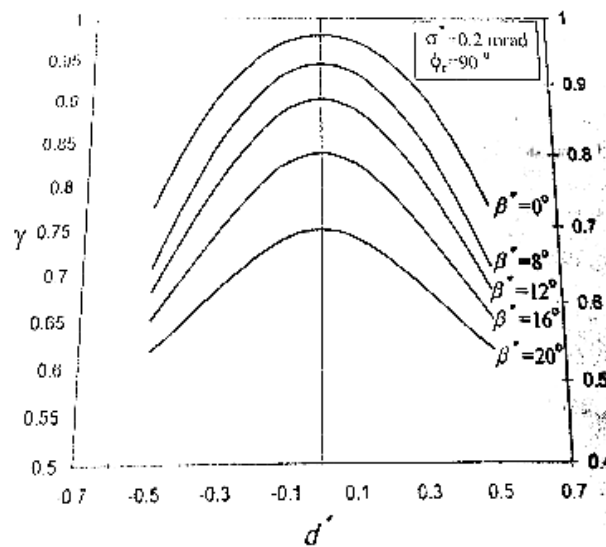
در حالت دوم مقادیر $\varphi_r = 90^\circ$ و $\sigma^* = 0.2 \text{ rad}$ فرض شده اند و مقادیر γ

برای β^* ، d^* های مختلف رسم گردیده است. نمودارهای تغییرات γ برای این حالت را می

توان در شکل (۹-۲) مشاهده نمود. در اینجا باز هم میتوان اظهار داشت که هر چقدر که نسبت

تمرکز بیشتر شود باعث افزایش β^* شده و بنابراین راندمان اپتیکی متمرکزکننده به سبب کاهش

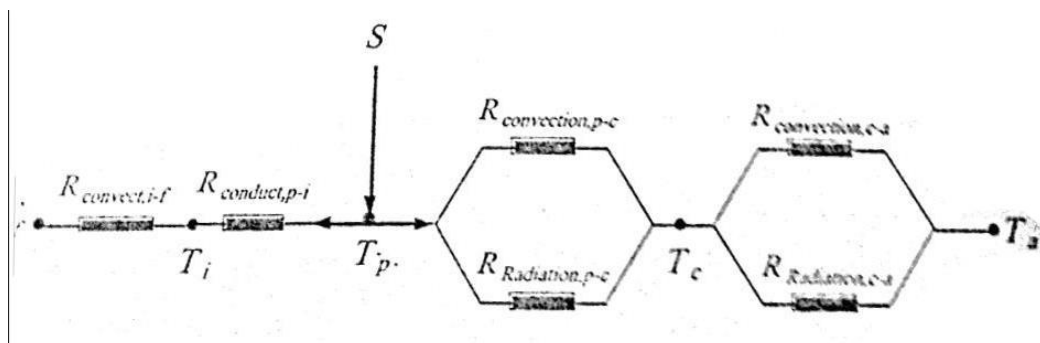
γ ، کاهش پیدا خواهد کرد. (۱۳)



شکل (۹-۲): نمودار تغییرات γ برای تغییرات d^* , β^* (۱۳)

۲-۲-۴ محاسبه ضرایب انتقال حرارت و افت فشار

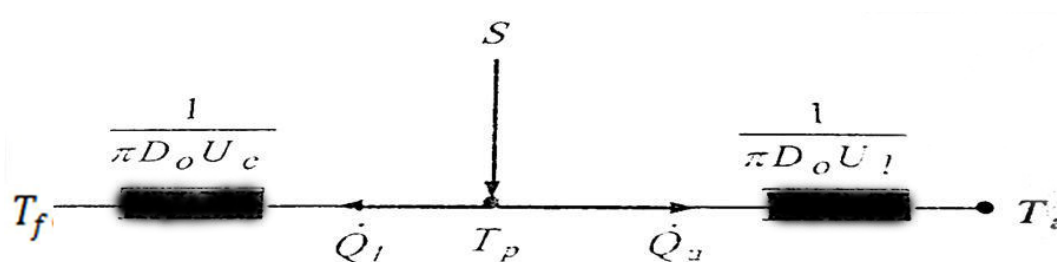
با تعریف ضرایب انتقال حرارت U_I و U_C ، روابط ریاضی مربوط به عملکرد حرارتی کلکتور بدست آورده می شود. ضرایب U_I و U_C خود تابع متغیرهای مختلفی می باشند و نمی توان آنها را ثابت در نظر گرفت. بنابراین در این قسمت به محاسبه این ضرایب پرداخته می شود. در شکل (۱۰-۲) با استفاده از الزام مقاومت‌های حرارتی، روش‌ها و مسیرهای جریان انتقال حرارت مشخص شده است. (۱۳)



شکل (۱۰-۲): اجزای مقاومت‌های حرارتی در مسیرهای افت و جمع آوری انتقال حرارت (۱۳)

در این شکل مشاهده می شود که شار تشعشی S در دمای T_p جذب سطح خارجی لوله فلزی می گردد. این شار جذب شده به دو قسمت کلی تقسیم می شود. قسمت عمده آن از طریق سیالی که در داخل لوله در حرکت است جذب می شود که ضریب کلی انتقال حرارت این مسیر U_C می باشد و قسمت دیگری از این شار به محیط اطراف لوله گیرنده منتقل شده که ضریب کلی انتقال حرارت این مسیر U_I می باشد.

U_I ضریب افت حرارت بین دو دمای T_p و T_a است که به ترتیب، دمای سطح خارجی لوله و دمای محیط می باشند. U_O ضریب جمع آوری حرارت بین دو دمای T_p و T_ρ است که به ترتیب دمای خارجی لوله و دمای محلی سیال می باشند. مطابق شکل (۲-۱۰) حرارت از دمای T_p به طریق جابجایی و تشعشع حرارتی به پوشش شیشه ای لوله گیرنده منتقل می شود و به دمای T_C می رسد. سپس حرارت بازهم به طریق جابجایی و تشعشع حرارتی به دمای محیط یعنی T_a منتقل می شود. ضمناً حرارت از دمای T_p با هدایت حرارتی به سطح داخلی لوله فلزی منتقل شده و از آنجا بصورت جابجایی حرارتی به سیال با دمای T_f منتقل می شود. لذا با بدست آوردن معادل مقاومتهای حرارتی در دو مسیر مشخص شده، میتوان ضرایب کلی انتقال حرارت U_C و U_I را بدست آورد. شکل (۲-۱۱) مسیرهای انتقال حرارت را با مقاومت های حرارتی معادل آنها نشان می دهد. (۱۳)



شکل (۲-۱۱): مقاومت های معادل حرارتی در مسیرهای انتقال حرارت (۱۳)

۵-۲-۲ محاسبه ضریب افت حرارت U_I

برای محاسبه ضریب کلی انتقال حرارت در مسیر دمای T_p به T_a ، می توان دو رابطه برای بدست آوردن \dot{Q}_I در این مسیر نوشت بنابراین با در نظر گرفتن مجدد شکل (۲-۱۰) برای دو مسیر موازی بین دماهای T_p و T_c می توان نوشت: (۱۰)

$$\frac{\dot{Q}_I}{L} = h_{p-c} \pi D_o (T_p - T_c) + \frac{\sigma \pi D_o (T_p^4 - T_c^4)}{\left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{D_o}{D_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right]} \quad (۲ - ۳۷)$$

که معکوس عبارت $\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{D_o}{D_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)$ ضریب دید تشعشعی بین دو سطح استوانه ای هم مرکز می باشد.

در رابطه بالا:

h_{p-c} ضریب جابجایی انتقال حرارت بین لوله و شیشه، σ ثابت استفان بولتزمن^{۲۵}، ε_p ضریب صدور سطح خارجی لوله، ε_c ضریب صدور پوشش شیشه ای و D_c قطر پوشش شیشه ای می باشد.

در رابطه (۲-۳۷) سطح خارجی لوله فلزی به عنوان سطح انتقال حرارت در نظر گرفته شده است. برای دو مسیر موازی بین دماهای T_c و T_a که شامل تشعشع و جابجایی می باشد می توان نوشت:

$$\frac{\dot{Q}_I}{L} = h_w \pi D_o (T_c - T_a) + \sigma \pi D_c \varepsilon_c (T_c^4 - T_a^4) \quad (۲ - ۳۸)$$

²⁵ Stefan-Boltzmann

که در این رابطه h_w ضریب جابجایی انتقال حرارت برای سطح خارجی پوشش شیشه ای می باشد در این رابطه سطح پوشش شیشه ای به عنوان سطح انتقال حرارت در نظر گرفته شده است.

از آنجاییکه ضرایب انتقال حرارت بر اساس یک رابطه خطی با اختلاف درجه حرارت تعریف می شوند، لذا از اتحاد زیر استفاده می شود:

$$(T_1^4 - T_2^4) = [(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)](T_1 - T_2) \quad (2-39)$$

و روابط (2-37) و (2-38) بصورت زیر بازنویسی می شوند:

$$\frac{\dot{Q}_I}{L} = \pi D_o \left[h_{p-c} + \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{D_o}{D_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right]} \right] (T_p - T_c) \quad (2-40)$$

$$\frac{\dot{Q}_I}{L} = \pi D_o [h_w + \sigma \varepsilon_c (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a)] (T_c - T_a) \quad (2-41)$$

بنابراین با توجه به دو معادله بالا ضرایب انتقال حرارت کلی بین دماهای T_p و T_c و دماهای T_c و T_a بصورت زیر بدست می آیند:

$$U_{I,p-c} = h_{p-c} + \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{\left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{D_o}{D_c} \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) \right]} \quad (2-42)$$

$$U_{I,c-a} = h_w + \sigma \varepsilon_c (T_c^2 + T_a^2)(T_c + T_a) \quad (2-43)$$

سپس می توان ضریب کلی انتقال حرارت را با مقادیر $U_{I,p-c}$ و $U_{I,c-a}$ محاسبه نمود. بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{1}{U_I} = \frac{1}{U_{I,p-c}} + \frac{1}{\frac{D_o}{D_c} U_{I,c-a}} \quad (2-44)$$

در روابط (۲-۴۲) و (۲-۴۳) دو ضریب جابجایی انتقال حرارت h_{p-c} و h_w تعریف شده است که بایستی محاسبه شوند.

h_{p-c} ضریب جابجایی انتقال حرارت بین لوله فلزی و پوشش شیشه ای می باشد که با

توجه به رابطه (۲-۴۴) محاسبه می شود. (۱۰)

$$h_{p-c} = \frac{2k_{eff}}{D_o \ln\left(\frac{D_c}{D_o}\right)} \quad (۲ - ۴۵)$$

که k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر می باشد و بصورت زیر به دست می آید:

$$k_{eff} = 0.386 \left[\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right]^{1/4} (Ra^*)^{1/4} \quad (۲ - ۴۶)$$

Pr عدد پرانتل هوا است و Ra^* عدد رایلی اصلاح شده می باشد که بصورت زیر

تعریف می گردد:

$$Ra^* = \frac{\left[\ln\left(\frac{D_c}{D_o}\right) \right]^4}{b^2 \left[\left(\frac{1}{D_o}\right)^{3/5} + \left(\frac{1}{D_c}\right)^{3/5} \right]^5} Ra \quad (۲ - ۴۷)$$

که b فاصله خالی بین دو جداره استوانه می باشد و بر اساس قطرهای به صورت زیر بدست می آید:

$$b = \frac{D_c - D_o}{2} \quad (۲ - ۴۸)$$

Ra عدد رایلی^{۲۶} می باشد و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$Ra = \frac{g(T_p - T_c)b^3}{\vartheta^2 T_m} Pr \quad (۲ - ۴۹)$$

ϑ ویسکوزیته سینماتیکی هوا، g شتاب ثقل و T_m دمای متوسط بین دو جداره می باشد:

²⁶ Rayleigh Number

$$T_m = \frac{T_p + T_c}{2} \quad (۲-۵۰)$$

بنابراین با روابط (۲-۴۵) تا (۲-۵۰) می توان h_{p-c} را محاسبه نمود.

h_w ضریب جابجایی انتقال حرارت در سطح خارجی لوله شیشه ای می باشد از آنجا که در این حالت انتقال حرارت شامل جابجایی اجباری و طبیعی می شود، لذا این ضریب به صورت زیر تعریف می گردد: (۱۰)

$$h_w = \frac{\overline{Nu}_{D_c} \cdot k}{D_c} \quad (۲-۵۱)$$

که \overline{Nu}_{D_c} معادل ناسلت جابجایی طبیعی و اجباری می باشد و بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\overline{Nu}_{D_c}^n = \overline{Nu}_f^n + \overline{Nu}_N^n \quad (۲-۵۲)$$

که \overline{Nu}_f^n و \overline{Nu}_N^n به ترتیب اعداد ناسلت جابجایی اجباری و طبیعی می باشند و برای یک لوله افقی $n = ۰.۷$ می باشد. عدد ناسلت جابجایی اجباری بصورت زیر بدست می آید:

$$\overline{Nu}_f = c Re_{D_c}^m \cdot Pr^{1/3} \quad (۲-۵۳)$$

که مقادیر c و m برای اعداد رینولدز مختلف از جدول (۱-۴) استخراج می گردد.

جدول (۲-۲): ثابت های معادله (۲-۵۳) (۱۰)

Re_{D_c}	C	M
۰-۴	۰.۹۸۹	۰.۳۳۰
۴-۴۰	۰.۹۱۱	۰.۳۸۵
۴۰-۴۰۰۰	۰.۶۸۳	۰.۴۶۶
۴۰۰۰-۴۰۰۰۰	۰.۱۹۳	۰.۶۱۸
۴۰۰۰۰-۴۰۰۰۰۰	۰.۰۲۷	۰.۸۰۵

Re_{D_c} با توجه به سرعت وزش باد تعیین می گردد، اگر V_w سرعت باد باشد، خواهیم

داشت:

$$Re_{D_c} = \frac{\rho V_w D_c}{\mu} \quad (۵۴ - ۲)$$

عدد ناسلت جابجایی طبیعی با رابطه زیر بدست می آید:

$$\overline{Nu}_N = \left[0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8.27}} \right]^2 \quad (۵۵ - ۲)$$

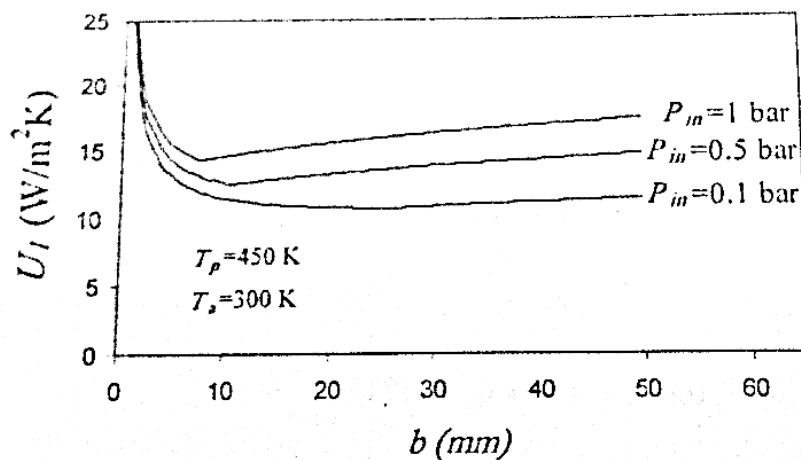
که عدد رایلی Re مطابق همان رابطه (۴۹-۲) تعریف می شود و بجای پارامتر b ، قطر پوشش شیشه ای قرار می گیرد.

لذا روابط (۵۱-۲) تا (۵۵-۲) می توان h_w را محاسبه نمود.

پس از محاسبه h_{p-c} و h_w می توان با استفاده از روابط (۴۲-۲) و (۴۴-۲) ضریب افت حرارت U_I را محاسبه نمود. در مجموع می توان اظهار داشت که دسته روابط (۴۲-۲) تا (۴۵-۲) منجر به محاسبه U_I می گردد و در این میان می توان با توجه به تعداد معادلات و تعداد متغیرها و پارامتر U_I را تابعی به صورت یک معادله با چند متغیر به صورت زیر در نظر گرفت:

$$U_I = U_I(D_o, D_c, T_p, T_a, \dots) \quad (۵۶ - ۲)$$

در رابطه (۵۶-۲) مشاهده می گردد که U_I تابعی از قطرهای و دماهای سطح خارجی لوله فلزی و محیط می باشد. همچنین U_I به سرعت وزش باد و خواص تشعشعی سطوح و هم چنین خواص سیال وابسته می باشد که با علامت نقطه چین در رابطه (۵۶-۲) مشخص شده است لذا با تغییر فشار داخل پوشش شیشه ای خواص سیال تغییر کرده و بر روی U_I تاثیر می گذارد. شکل (۱۲-۲) نمودار تغییرات U_I را که بر حسب فاصله بین در لوله برای چند فشار مختلف محاسبه شده است را نشان می دهد. (۱۰)



شکل (۲-۱۲): تغییرات U_I بر حسب فاصله بین لوله فلزی و پوشش شیشه ای (۱۰)

همانطور که در این شکل مشاهده می گردد، اولاً: با کاهش فشار داخل پوشش شیشه ای ضریب انتقال حرارت U_I کاهش می یابد و ثانیاً: در یک فاصله مشخص b ، کمترین مقدار را برای U_I خواهیم داشت.

۲-۲-۶ محاسبه ضریب جمع آوری حرارت U_C

U_C ضریب جمع آوری حرارت بین سطح خارجی لوله و دمای محلی سیال می باشد. با توجه به شکل (۲-۱۰)، حرارت از طریق هدایت حرارتی به سطح داخل لوله فلزی با دمای T_I منتقل شده و سپس با جابجایی حرارتی به سطح بادمای T_f منتقل می گردد. با توجه به اینکه دو مقاومت حرارتی، بصورت متوالی می باشند لذا می توان نوشت:

$$\frac{1}{U_C} = \frac{1}{U_{C,p-i}} + \frac{1}{U_{C,i-f}} \quad (۵۷ -$$

۲) که $U_{C,p-i}$ ضریب انتقال حرارت مربوط به هدایت حرارتی لوله می باشد و به صورت

زیر بدست می آید:

$$U_{c,p-i} = \frac{2k_w}{D_o \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} \quad (58)$$

- ۲)

و $U_{c,i-f}$ ضریب انتقال حرارت مربوط به جابجایی حرارتی در داخل لوله می باشد که برش ضریب جابجایی انتقال حرارت در داخل لوله است.

$$U_{c,i-f} = h_{fi} \quad (59 - ۲)$$

برای محاسبه h_{fi} از روابط زیر استفاده می شود: (۱۲)

برای ناحیه آشفته $Re > 10000$:

$$h_{fi} = 0.00225 \frac{\mu}{D_i} Pr^{0.495} Re^{0.795} [\exp(-0.0225 \ln(Pr^2))] \quad (60 - ۲)$$

برای ناحیه گذرا $2000 < Re < 10000$:

$$h_{fi} = 0.1 \frac{\mu}{D_i} Pr^{0.495} (Re^{2/3} - 125) [\exp(-0.0225 \ln(Pr^2))] \left(1 + \frac{D_i}{L}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (61 - ۲)$$

برای ناحیه آرام

$$h_{fi} = 1.75 \frac{\mu}{D_i} [Gz + 0.0083(Gr.Pr)^{0.75}]^{1/3} : Gz > 9, Re < 2000 \quad (62 - ۲)$$

$$h_{fi} = 3.66 \frac{\mu}{D_i} : Gz \leq 9, Re < 2000 \quad (63 - ۲)$$

که در روابط بالا Re عدد رینولدز داخل لوله می باشد و با رابطه زیر بدست می آید:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi D_i} \quad (64 - ۲)$$

و Gz عدد گریتز^{۲۷} می باشد که رابطه زیر به دست می آید:

²⁷ .Greetz Number

$$Gr = Re.Pr.\frac{D_I}{L} \quad (۶۵ - ۲)$$

و Gr عدد گرشف^{۲۸} می باشد و با رابطه زیر بدست می آید:

$$Gr = \frac{g\beta D_I^3}{\nu^2} \quad (۶۶ - ۲)$$

و بقیه پارامترها مربوط به خواص سیال داخل لوله می باشد.

در مواقعی که دبی جرمی سیال پایین باشد. جریان در لوله آرام خواهد بود. بنابراین در برخی موارد مقدار h_{fi} آنقدر کوچک خواهد بود که تاثیر زیادی بر روی U_C می گذارد و در نتیجه باعث پایین آمدن راندمان حرارتی کلکتور می شود. این موضوع به ویژه در زمانی که سیال مورد استفاده روغن باشد اهمیت پیدا می کند. زیرا روغن دارای خاصیت هدایت حرارتی پایین و عدد پرانتل بالا می باشد. بنابراین در این حالات پیشنهاد می گردد که از روش هایی برای افزایش ضریب انتقال حرارت داخل لوله استفاده شود. این روش ها عموماً مشتمل بر افزایش سطح انتقال حرارت و آشفته کردن جریان در داخل لوله می باشد. گرچه استفاده از این روشها موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می گردد اما خود باعث افزایش فشار به داخل لوله می گردد که این موضوع در انتها بررسی می شود. (۱۰)

بنابراینچه که برآورده شد، می توان با استفاده از روابط (۵۷-۲) تا (۶۶-۲) مقدار ضریب U_C را محاسبه نمود. بازهم با توجه به تعداد معادلات و تعداد متغیرها می توان پارامتر U_C را تابعی به صورت یک معادله با متغیرهای زیر در نظر گرفت.

$$U_C = U_C(D_o, D_I, \dot{m}, \dots) \quad (۶۷ - ۲)$$

²⁸. Grashof Number

لذا متغیرهای اساسی تاثیرگذار بر روی U_C و قطرهای داخلی و خارجی لوله و دبی جرمی سیال می باشند و بقیه پارامترهای موثر مربوط به خاصیت هدایتی لوله و خواص سیال هستند.

۷-۲-۲ محاسبه افت فشار

بدست آوردن افت فشار به منظور محاسبه برگشت ناپذیری ناشی از آن لازم می باشد. هر قدر دبی جرمی سیال در داخل لوله افزایش یابد، موجب بهبود راندمان حرارتی کلکتور می گردد، لذا این افزایش دبی جرمی موجب افزایش افت فشار نیز می گردد که بایستی تاثیر متقابل این دو با هم در راندمان اگزرژی کلکتور بررسی شود. لذا در این قسمت به محاسبه افت فشار سیال در داخل لوله می پردازیم. برای جریان در داخل لوله افت فشار با رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta P = 2f \frac{L \cdot G^2}{\rho \cdot D_I} \quad (۲ - ۶۸)$$

رابطه فوق f ضریب اصطکاک می باشد و برای رژیم های مختلف جریان با روابط زیر تعیین می شود: (۱۳)

جریان آرام $Re < ۲۳۰۰$:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (۲ - ۶۹)$$

جریان گذرا $۲۳۰۰ < Re < ۱۰۰۰۰$:

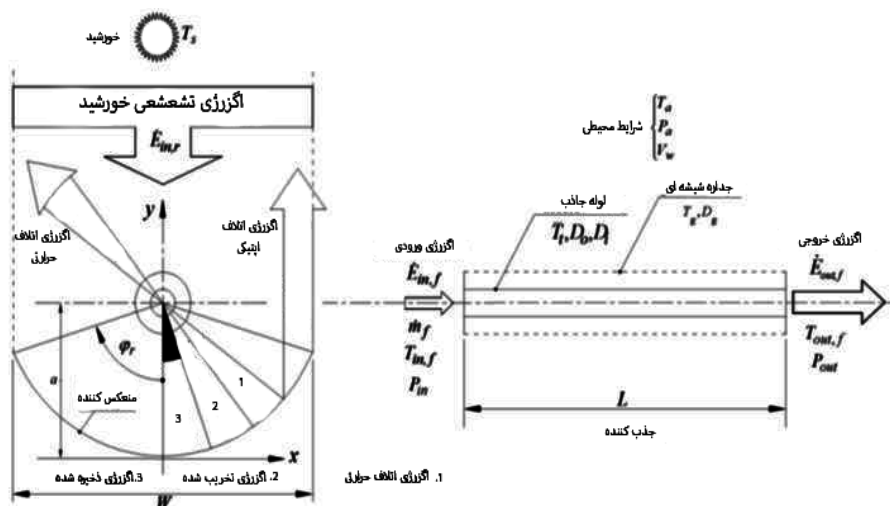
$$f = 0.0122 \quad (۲ - ۷۰)$$

جریان آشفته $Re \geq ۱۰۰۰۰$:

$$f = 0.0035 + \frac{0.264}{Re^{0.42}} \quad (۲ - ۷۱)$$

۳-۲ تعادل انرژی برای کلکتور خورشیدی

در شکل (۲-۱۳) تمام انرژی‌های مرتبط با یک کلکتور خورشیدی و نحوه جمع‌آوری انرژی مشخص شده است. انرژی‌های ورودی شامل انرژی تشعشعی خورشید و انرژی جریان سیال می‌باشند قسمتی از انرژی تشعشعی خورشید به سیال در حال حرکت منتقل می‌شود و بنابراین انرژی جریان خروجی افزایش پیدا می‌کند در اینجا به محاسبه هر کدام از انرژی‌های موجود، در سیستم کلکتور می‌پردازیم.



شکل (۲-۱۳): نمای شماتیک از جریان‌های انرژی در کلکتور خورشیدی (۱۱)

۳-۲-۱ انرژی ورودی:

انرژی ورودی کلکتور شامل دو قسمت می‌باشد. یکی انرژی تشعشعی خورشید و دیگری انرژی جریان سیال ورودی که به ترتیب با $E_{i,th}$ و $E_{i,f}$ نمایش داده می‌شوند.

با محاسبه اختلاف آنتروپی ها و جایگذاری آن، می توان روابط بالا را بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$e = C_p \left(T - T_a - T_a \ln \frac{T}{T_a} \right) + \frac{\Delta P}{\rho} \quad (۷۶ - ۲)$$

که در این رابطه ΔP اختلاف فشار سیال با محیط است. با استفاده از رابطه (۷۶-۲) و صرفنظر کردن از جملات سرعت و ارتفاع سیال، اگزرژی ورودی جریان بصورت زیر بدست می آید:

$$\dot{E}_{i,f} = C_p \dot{m} \left(T_{in} - T_a - T_a \ln \frac{T_{in}}{T_a} \right) + \frac{\dot{m} \Delta P_{in}}{\rho} \quad (۷۷ - ۲)$$

که ΔP_{in} اختلاف فشار بین سیال ورودی و فشار محیط می باشد. حاصل جمع اگزرژی های تشعشی و جریال سیال کل اگزرژی ورودی را بدست میدهد: (۱۲)

$$\dot{E}_I = \dot{E}_{i,f} + \dot{E}_{i,th} \quad (۷۸ - ۲)$$

۲-۳-۲ اگزرژی ذخیره شده:

اگزرژی ذخیره شده برای حالت پایدار برابر صفر است بنابراین: (۱۲)

$$\dot{E}_I = 0 \quad (۷۹ - ۲)$$

۲-۳-۳ اگزرژی خروجی:

اگزرژی خروجی از کلکتور تنها شامل اگزرژی جریان سیال خروجی از کلکتور می شود و

مشابه اگزرژی ورودی جریان بدست می آید: (۱۲)

$$\dot{E}_O = -C_p \dot{m} \left(T_{out} - T_a - T_a \ln \frac{T_{out}}{T_a} \right) - \frac{\dot{m} \Delta P_{out}}{\rho} \quad (۸۰ - ۲)$$

۲-۳-۴ اگزرژی نشتی:

نشتی کلکتور فقط بصورت حرارتی می باشد. مقدار نشتی همان مقدار افت حرارت از کلکتور

می باشد که بین دمای سطح گیرنده و دمای محیط صورت می پذیرد یعنی داریم:

$$\dot{Q}_I = U_I A_I (T_P - T_a) \quad (۸۱ - ۲)$$

که A_I سطح خارجی لوله جاذب است. با استفاده از رابطه بالا، نرخ انرژی نشتی بصورت زیر بدست می آید: (۱۲)

$$\dot{E}_I = -U_I A_I (T_P - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) \quad (۸۲ - ۲)$$

۲-۳-۵ اگزرژی تخریب شده:

اگزرژی تخریب شده در کلکتور شامل سه قسمت می باشد: اول اگزرژی تخریب شده به سبب افت فشار سیال در لوله، دوم اگزرژی تخریب شده به سبب اختلاف دمای خورشید با سطح لوله گیرنده و سوم اگزرژی تخریب شده به سبب اختلاف دمای سطح گیرنده با دمای سیال که توضیح هر کدام به صورت زیر می آید:

۲-۳-۵-۱ اگزرژی تخریب شده توسط افت فشار: برای محاسبه اگزرژی تخریب شده می

بایست اختلاف آنتروپی تولید شده به سبب افت فشار مشخص گردد و برای اختلاف آنتروپی تولید شده به سبب افت فشار خواهیم داشت:

$$\Delta S_{gen, \Delta p} = \dot{m} (S_{out} - S_{in}) \quad (۸۳ - ۲)$$

برای محاسبه اختلاف آنتروپی های ورود و خروج جریان، از رابطه زیر استفاده می شود:

$$T ds = dh - v dp \quad (۸۴ - ۲)$$

از آنجایی که اختلاف آنتروپی تولید شده را فقط برای افت فشار بدست می آوریم. لذا $dh =$

0 می باشد و بنابراین خواهیم داشت:

$$S_{out} - S_{in} = \int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{v dp}{T} \quad (۲ - ۸۵)$$

با فرض تغییرات خطی برای دمای سیال در طول لوله. اختلاف آنتروپی ها به صورت زیر بدست می آید:

$$S_{out} - S_{in} = \frac{\Delta P}{\rho} \frac{\ln \frac{T_{out}}{T_{in}}}{T_{out} - T_{in}} \quad (۲ - ۸۶)$$

باجایگذاری رابطه (۲-۸۶) در رابطه (۲-۸۳)، اگزرژی تخریب شده به سبب افت فشار درون لوله بصورت زیر بدست می آید:

$$\dot{E}_{d,\Delta P} = -T_a \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \frac{\ln \frac{T_{out}}{T_{in}}}{T_{out} - T_{in}} \quad (۲ - ۸۷)$$

توجه شود که در رابطه بالا ΔP اختلاف فشار بین ورود و خروج سیال می باشد. لازم به ذکر است که اگزرژی ناشی از افت فشار بسیار ناچیز می باشد و غالبا در تحلیل اگزرژی از آن صرف نظر می شود اما مقدار آن کاملا وابسته به دبی جرمی سیال است و نمی توان در دبی های جرم بالا از آن صرف نظر کرد.

۲-۳-۵-۲ اگزرژی تخریب شده به سبب جذب تشعشع خورشید: این اگزرژی تخریب شده به

علت اختلاف دمای خورشید با سطح گیرنده بوجود می آید و با توجه به اینکه مقدار حرارت جذب شده به سطح گیرنده $I_b A_c \eta_o$ می باشد، مقدار آن بصورت زیر بدست می آید:

$$\dot{E}_{d,abs} = -T_a I_b A_c \eta_o \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (۲ - ۸۸)$$

۳-۵-۳-۲ اگزرژی تخریب شده به سبب هدایت حرارتی: این اگزرژی تخریب شده به علت

اختلاف دمای سطح گیرنده با دمای سیال بوجود می آید و با توجه به اینکه انتقال حرارت بین

دمای سطح خارجی گیرنده یعنی T_P و سیال با دمای محلی T انجام می پذیرد، خواهیم داشت:

$$\dot{E}_{d,cond} = - \int_T^{T_P} \dot{Q}_u \frac{T_a}{T^2} dT \quad (۸۹ - ۲)$$

از طرف دیگر داریم:

$$\dot{Q}_u = \int_{T_{in}}^{T_{out}} C_P \dot{m} dT \quad (۹۰ - ۲)$$

با روابط (۸۹-۲) و (۹۰-۲) خواهیم داشت:

$$\dot{E}_{d,cond} = - \int_{T_{in}}^{T_{out}} \int_T^{T_P} \left(T_a \frac{C_P \dot{m} dT}{T^2} \right) dT \quad (۹۱ - ۲)$$

با حل انتگرال فوق، اگزرژی تخریب شده ناشی از هدایت حرارتی نیز بصورت زیر بدست

می آید:

$$\dot{E}_{d,cond} = -C_P \dot{m} T_a \left(\ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - \frac{T_{out} - T_{in}}{T_P} \right) \quad (۹۲ - ۲)$$

بنابراین کل اگزرژی تخریب شده از حاصل جمع سه اگزرژی تخریبی ناشی از افت فشار،

جذب تشعشع و هدایت حرارتی بدست می آید:

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{d,\Delta P} + \dot{E}_{d,abs} + \dot{E}_{d,cond} \quad (۹۳ - ۲)$$

پس از بدست آوردن تمام اگزرژی های کلکتور، با جایگذاری روابط (۷۳-۲)، (۷۷-۲)، (۷۹-۲)

(۷۹)، (۸۰-۲)، (۸۲-۲)، (۸۷-۲)، (۸۸-۲) و (۹۲-۲) در رابطه تعادل اگزرژی و خلاصه کردن

آن به رابطه زیر می رسیم:

$$C_p \dot{m} \left(T_{out} - T_{in} - T_a \ln \frac{T_{out}}{T_a} \right) - \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} = -I_b A_c \eta_o \eta_p - I_b A_c \eta_o T_a \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) \\ - U_I A_I (T_p - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) - C_p \dot{m} T_a \left(\ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - \frac{T_{out} - T_{in}}{T_p} \right) - \\ T_a \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \frac{\ln \frac{T_{out}}{T_{in}}}{T_{out} - T_{in}} \quad (94-2)$$

طرف چپ معادله (۹۴-۲) اگزرژی جمع آوری شده را نشان میدهد. چنانچه به طرف راست

رابطه (۹۴-۲)، عبارت $I_b A_c \eta_p$ را که اگزرژی ورودی تشعشعی می باشد اضافه و کم نماییم و

مجددا رابطه را بازنویسی نماییم، خواهیم داشت:

$$C_p \dot{m} \left(T_{out} - T_{in} - T_a \ln \frac{T_{out}}{T_a} \right) - \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} = I_b A_c \eta_p - \left[(1 - \eta_o) I_b A_c \eta_p + \right. \\ \left. I_b A_c \eta_o T_a \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s} \right) + U_I A_I (T_p - T_a) \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) + C_p \dot{m} T_a \left(\ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - \frac{T_{out} - T_{in}}{T_p} \right) + \right. \\ \left. T_a \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \frac{\ln \frac{T_{out}}{T_{in}}}{T_{out} - T_{in}} \right] \quad (95-2)$$

جمله سمت چپ معادله (۹۵-۲)، نرخ اگزرژی تحصیل شده یا جمع آوری شده را نشان

می دهد تمام افت های اگزرژی در براکت سمت راست معادله (۹۵-۲) آمده است. جمله اول

داخل براکت افت اگزرژی به سبب تلفات اپتیکی ، جمله دوم افت اگزرژی به سبب اختلاف

دمای بین خورشید و سطح خارجی جذب کننده ، جمله سوم افت اگزرژی به علت تلفات

حرارتی به محیط اطراف ، جمله چهارم افت اگزرژی به سبب هدایت حرارتی به اختلاف

دمای سطح جذب کننده با دمای سیال و جمله پنجم افت انرژی به سبب اصطکاک با افت فشار درون لوله می باشد.

راندمان انرژی برای کلکتور خورشیدی عبارت است از انرژی تحویل شده به انرژی ورودی تشعشعی. لذا راندمان انرژی به صورت رابطه زیر بدست می آید که می توان آن را با تقسیم کردن سمت چپ معادله (۹۵-۲) که انرژی تحویل شده می باشد به عبارت $I_b A_c \eta_p$ که انرژی تشعشعی خورشید است. بدست آورد:

$$\eta_E = \frac{C_p \dot{m} \left(T_{out} - T_{in} - T_a \ln \frac{T_{out}}{T_a} \right) - \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho}}{I_b A_c \eta_p} \quad (۹۶ - ۲)$$

از طرف دیگر با تقسیم کردن سمت راست معادله (۹۵-۲) بر عبارت $I_b A_c \eta_p$ ، باز هم راندمان انرژی به صورت زیر بدست می آید:

$$\eta_E = 1 - \left[(1 - \eta_o) + \frac{\eta_o T_a}{\eta_p} \left(\frac{1}{T_P} - \frac{1}{T_s} \right) + \frac{U_L A_L (T_P - T_a)}{I_b A_c \eta_p} \left(1 - \frac{T_a}{T_p} \right) + \frac{C_p \dot{m} T_a}{I_b A_c \eta_p} \left(\ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - \frac{T_{out} - T_{in}}{T_P} \right) + \frac{T_a}{I_b A_c \eta_p} \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \frac{\ln \frac{T_{out}}{T_{in}}}{T_{out} - T_{in}} \right] \quad (۹۷ - ۲)$$

در رابطه (۹۷-۲)، براکت سمت راست معادله، افت های انرژی را مشخص می سازد که همان گونه که مشاهده می شود با کم کردن مقادیر آنها از یک، راندمان انرژی بدست می آید. بنابراین راندمان انرژی با دو رابطه (۹۶-۲) و (۹۷-۲) قابل محاسبه است. رابطه اول راندمان انرژی را بصورت مستقیم بدست می دهد و رابطه دوم راندمان انرژی را با توجه به

تحلیل اگزرژی کلکتور بدست می‌دهد که در آن تمام افت های اگزرژی نسبت به اگزرژی ورودی آورده شده است. (۱۲)

۲-۴ معادلات نهایی عملکرد کلکتور

در این قسمت جهت مشخص نمودن تعداد درجات آزادی سیستم معادلات حاکم بر عملکرد کلکتور ، کلیه روابط نهایی ذکر شده آورده می شود تا با تعیین پارامترهای متغیر آنها و مشخص کردن تعداد روابط ، درجه آزادی سیستم معادلات بدست می آید. این روابط به صورت زیر مرتب می شوند:

$$C = \frac{(W - D_o)}{\pi D_o} \quad (۲ - ۹۸)$$

$$A_c = W \cdot L \quad (۲ - ۹۹)$$

$$S = I_b (\tau a)_b \frac{D_o}{W - D_o} + I_b \rho \gamma (\tau a)_b \quad (۲ - ۱۰۰)$$

$$F' = \frac{1}{U_l \left[\frac{1}{U_l} + \frac{1}{U_c} \right]} \quad (۲ - ۱۰۱)$$

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (۲ - ۱۰۲)$$

$$\dot{Q}_u = F_R \left[S - \frac{U_l}{C} (T_{in} - T_a) \right] (W - D_o) L \quad (۲ - ۱۰۳)$$

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{U_l \pi D_o L} \left[1 - \exp \left(- \frac{F' U_l \pi D_o L}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (۲ - ۱۰۴)$$

$$\dot{Q}_l = U_l \pi D_o L (T_p - T_a) \quad (۲ - ۱۰۵)$$

$$\dot{Q}_l = S A_c - \dot{Q}_u \quad (۲ - ۱۰۶)$$

$$\sigma^* = \sigma_{tot} \cdot C \quad (۱۰۷ - ۲)$$

$$\beta^* = \beta \cdot C \quad (۱۰۸ - ۲)$$

$$d^* = \frac{dr}{D_o} \quad (۱۰۹ - ۲)$$

$$\gamma = \frac{1 + \cos \varphi_r}{2 \sin \varphi_r} \int_0^{\varphi_r} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi) (1 - 2d^* \sin \varphi) - \pi \beta^* (1 + \cos \varphi_r)}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \varphi_r)} \right) - \operatorname{erf} \left(- \frac{\sin \varphi_r (1 + \cos \varphi) (1 + 2d^* \sin \varphi) + \pi \beta^* (1 + \cos \varphi_r)}{\sqrt{2} \pi \sigma^* (1 + \cos \varphi_r)} \right) \right] \frac{d\varphi}{1 + \cos \varphi} \quad (۱۰ - ۲)$$

$$U_I = U_I(D_o, D_c, T_p, T_a, \dots) \quad (۱۱۱ - ۲)$$

$$U_C = U_C(D_o, D_I, \dot{m}, \dots) \quad (۱۱۲ - ۲)$$

بنابر این تعداد معادلات یا قیدهای مسئله بهینه سازی برابر ۱۵ عدد می باشد و پارامترهایی

که در روابط بالا آمده است شامل دو دسته کلی می شوند، یک دسته پارامترهای معلوم

مشخص هستند و دسته دیگر که متغیرهای اساسی عملکرد کلکتور می باشند. پارامترهای

مشخص و معلوم به صورت زیر تقسیم بندی می شوند:

۱- پارامترهای هندسی معلوم که شامل قطر داخلی و خارجی لوله فلزی و مساحت کل کلکتور می باشد.

۲- خواص تشعشعی سطوح که شامل ضرایب جذب و صدور انعکاس سطح لوله و پوشش شیشه ای و آینه می شود

۳- پارامترهای خطاهای اپتیکی

۴- شرایط محیط و فشار داخل پوشش

۵- شدت تابش خورشید

بنابراین متغیرهای اصلی کلکتور که تعداد آنها برابر ۱۹ عدد می باشد شامل

$$U_I, U_C, S, C, W, L, F, \gamma, \dot{Q}_u, \dot{Q}_l, \dot{m}, T_{in}, T_{out}, F_R, \sigma^*, \beta^*, d^*, T_p, D_C$$

باشد. لذا تعداد درجات آزادی سیستم معادلات با توجه به معادلات بصورت زیر بدست می آید:

$$F = 19 - 15 = 4$$

بنابراین تعداد درجات آزادی سیستم معادلات حاکم بر عملکرد کلکتور چهار بدست آمد. یعنی کافی است مقادیر چهار متغیر از متغیرهای فوق تعیین شود تا سیستم معادلات حل شود و جواب ها بدست آید. پس از حل معادلات (۹۸-۲) تا (۱۱۲-۲) مقادیر افت فشار، راندمان اپتیکی، راندمان قانون اول، راندمان اگزرژی و هر پارامتر دیگر قابل محاسبه است.

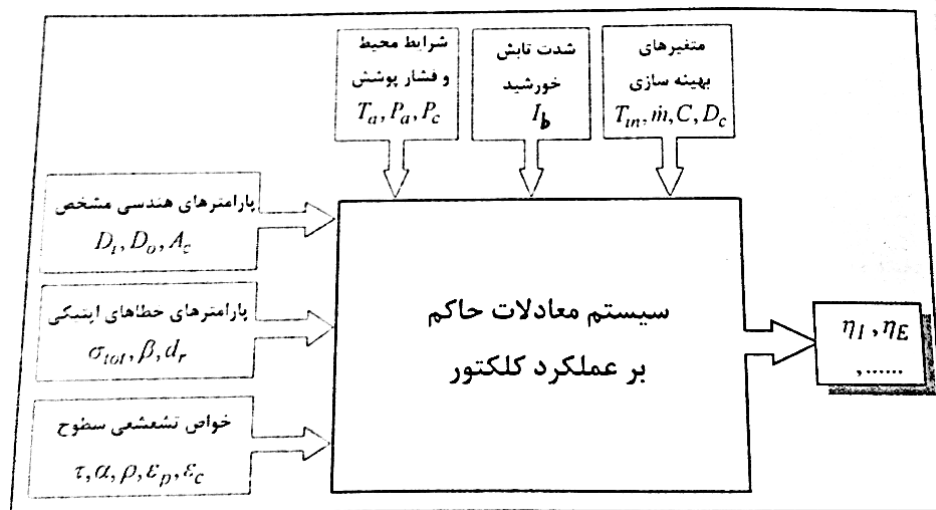
همانطور که قبلاً اشاره شده هدف بهینه سازی کلکتور به حداکثر رساندن راندمان اگزرژی می باشد. بنابراین تابع موضوع در اینجا راندمان اگزرژی است و تابعی از تمام متغیرهای اصلی بصورت زیر است: (۱۶)

$$\eta_E = \eta_E(U_I, U_C, S, C, W, L, F, \gamma, \dot{Q}_u, \dot{Q}_l, \dot{m}, T_{in}, T_{out}, F_R, \sigma^*, \beta^*, d^*, T_p, D_C) \quad (113 - 2)$$

بقیه پارامترها جزو پارامترهای معلوم می باشند پس تاکنون مسئله بهینه سازی عبارت است از تابع راندمان اگزرژی و معادلات (۹۸-۲) تا (۱۱۲-۲) که حکم قیدهای مسئله بهینه سازی را ایفا می کنند.

از آنجاییکه معادلات (۹۸-۲) تا (۱۱۲-۲) را نمی توان بصورت تحلیلی حل نمود لذا از حل عددی برای آنها استفاده می شود. بنابراین با تعیین چهار متغیر از متغیرهای فوق، می

توان بهینه سازی را انجام داد. لازم به ذکر است که انتخاب این چهار متغیر دل خواه می باشد اما بهتر است از متغیرهایی استفاده نمود که دارای مفاهیم مشخصی از کلکتور باشند. در مقالات موجود عموماً راندمان اگزرژی کلکتور بر حسب دبی جرمی و دمای ورودی بهینه شده است. در اینجا با اضافه کردن دو متغیر هندسی به متغیرهای بهینه سازی، متغیرهای بهینه سازی کامل می شود. این دو متغیر یکی نسبت تمرکز و دیگری قطر پوشش شیشه ای می باشند. شکل (۲-۱۴) پارامترهای ورودی را برای حل سیستم معادلات کلکتور به تفکیک نشان میدهد. (۱۶)



شکل (۲-۱۴): پارامترهای ورودی جهت حل دستگاه معادلات عملکردی کلکتور (۱۵)

از آنجاییکه معادلات عملکرد نهایی کلکتور به صورت عددی و با استفاده از برنامه نویسی کامپیوتری حل می شوند، لذا با تعیین چهار متغیر بهینه سازی که شامل دمای ورودی و دبی جرمی و نسبت تمرکز قطر و پوشش شیشه ای می باشد، راندمان اگزرژی محاسبه می شود بنابراین می توان با حل معادلات (۲-۹۸) و (۲-۱۱۲)، سیستم بهینه سازی را بصورت یک

تابع چهار متغیره، که همان راندمان اگزرژی می باشد و بدون هیچگونه قیدی به صورت زیر در نظر گرفت:

$$\eta_E = \eta_E(C, \dot{m}, T_m, D_C) \quad (2-114)$$

که چهارمتغیر فوق، متغیرهای بهینه سازی می باشند و سایر پارامترهای ورودی مطابق شک (2-14) جزو پارامترهای معلوم به حساب می آیند بنابراین برای یافتن نقطه بهینه لازم است معادله زیر حل شود:

$$\nabla \eta_E = 0 \quad (2-115)$$

یا به عبارت دیگر :

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta_E}{\partial T_{in}} = 0 \\ \frac{\partial \eta_E}{\partial \dot{m}} = 0 \\ \frac{\partial \eta_E}{\partial C} = 0 \\ \frac{\partial \eta_E}{\partial D_C} = 0 \end{cases} \quad (2-116)$$

دسته معادله (2-116) باید بطور همزمان حل گردند و با حل این چهار معادله مقادیر متغیرهای بهینه سازی در نقطه بهینه بدست می آید. (15)

۲-۵ تحلیل حرارتی و اگزرژی متمرکزکننده و نتایج

نتایج بدست آمده از تحلیل حرارتی و اگزرژی متمرکز کننده به صورت زیر خلاصه می شود:

۱- راندمان قانون اول یا راندمان حرارتی کلکتور نسبت به تغییرات نسبت تمرکز و قطر پوشش شیشه ای همواره دارای یک نقطه بهینه می باشد ولی نسبت به تغییرات دمای ورودی و دبی جرمی دارای نقطه بهینه نمی باشد و مقدار راندمان قانون اول با افزایش دمای ورودی پیوسته کاهش پیدا می کند و با افزایش دبی جرمی پیوسته افزایش می یابد. در هر دمای ورودی و هر دبی جرمی، دارای یک نسبت تمرکز و قطر پوشش بهینه می باشیم.

۲- راندمان قانون دوم یا راندمان اگزرژی کلکتور نسبت به تغییرات تمام متغیرهای بهینه سازی دارای نقطه بهینه می باشد یعنی مقدار راندمان اگزرژی در یک دمای ورودی و یک نسبت تمرکز یک دبی و جرمی و یک قطر پوشش مشخص، حداکثر می گردد که مقادیر آنها با روش بهینه سازی بدست می آید.

۳- با افزایش شار تشعشی عمود بر سطح دهانه کلکتور، راندمان اگزرژی حداکثر و دمای ورودی بهینه و دبی جرمی بهینه افزایش می یابد ولی نسبت تمرکز بهینه کاهش پیدا می کند و قطر پوشش بهینه نیز تغییری نمی یابد به عبارت دیگر اثر تغییر شدت شار تشعشی بیشتر متوجه پارامترهای عملکردی کلکتور می باشد تا پارامترهای هندسی آن.

۴- با افزایش دمای محیط در یک شار تشعشی ثابت، راندمان اگزرژی کلکتور به طور ناچیزی کاهش یافته و دمای ورودی بهینه نیز افزایش می یابد و سایر متغیرها تغییرات قابل توجهی ندارد.

۵- کمتر بودن قطر پوشش شیشه ای از مقدار بهینه آن، باعث افت حرارتی شدید و کاهش راندمان می گردد در حالی که بیشتر بودن آن مقدار بهینه، موجب کاهش کمی در مقدار

راندمان کلکتور می شود و به عبارت دیگر قطر پوشش شیشه ای کلکتور نباید از یک حد بحرانی کمتر باشد.

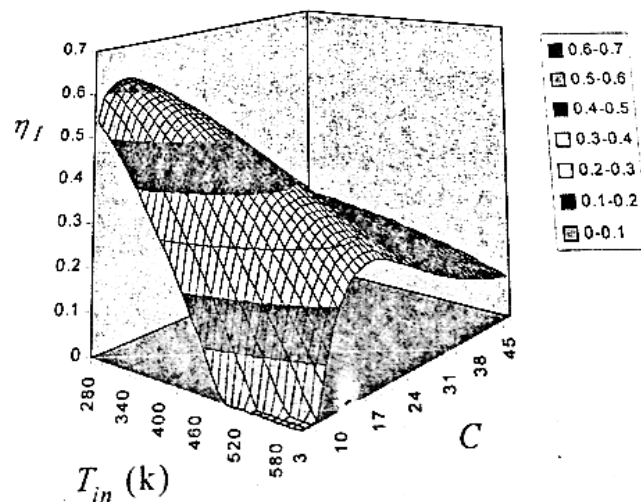
۶- استفاده از روش های بهبود انتقال حرارت در داخل لوله در نقطه عملکرد بهینه کلکتور، تاثیری بر مقدار راندمان اگزرژی حداکثر ندارد و تنها باعث جابجایی متغیرهای عملکردی نقطه بهینه می گردد. چنانچه این روشها هنگامی که دبی جرمی کمتر از مقدار دبی جرمی بهینه است استفاده شود، موجب بهبود راندمان اگزرژی می گردد و چنانچه این روشها هنگامی که دبی جرمی بیشتر از مقدار بی جرمی بهینه است استفاده شود باعث کاهش راندمان اگزرژی خواهد شد. (۱۶)

در شکلهای (۲-۱۵) و (۲-۱۶)، تغییرات راندمان قانون اول کلکتور برحسب دمای ورودی و نسبت تمرکز ملاحظه می گردد. مقادیر راندمان قانون اول برای این شکل ها با $D_{c,opt}$, \dot{m}_{opt} که در قسمت (۲-۱۵) محاسبه شد بدست آورده شده است.

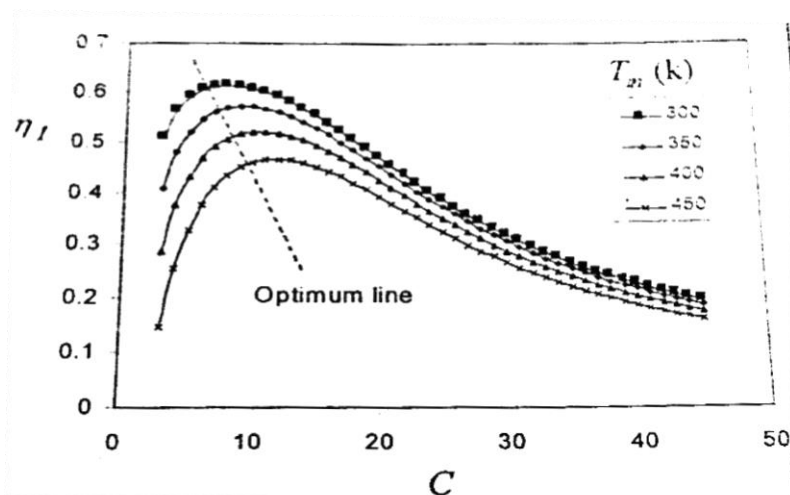
در شکل (۲-۱۵) مشاهده می گردد که راندمان قانون اول کلکتور با افزایش دمای ورودی، پیوسته کاهش می یابد. اما در یک نسبت تمرکز مشخص، مقدار آن حداکثر می شود. هر چقدر که دمای ورودی کلکتور افزایش یابد، افت حرارت از کلکتور نیز بیشتر می گردد و در نتیجه نرخ حرارت جمع آوری شده کاهش می یابد. بنابراین راندمان قانون اول کلکتور نسبت به تغییرات دمای ورودی دارای نقطه بهینه نمی باشد.

از طرف دیگر هر قدر که نسبت تمرکز بیشتر شود به سبب وجود خطاهای اپتیکی، راندمان اپتیکی متمرکزکننده کاهش می یابد و هر چه که نسبت تمرکز کاهش یابد به سبب بیشتر شدن

مساحت لوله فلزی، افت حرارت از کلکتور بیشتر می شود و لذا راندمان قانون اول کاهش پیدا می کند. بنابراین راندمان قانون اول نسبت به تغییرات نسبت تمرکز، دارای نقطه بهینه است. (۱۱)



شکل (۲-۱۵): رویه تغییرات راندمان قانون اول بر حسب دمای ورودی (۱۱)



شکل (۲-۱۶): منحنی های تغییرات راندمان قانون اول بر حسب نسبت تمرکز و دمای ورودی (۱۱)

در شکل (۲-۱۶) نیز به صورت دو بعدی تغییرات راندمان قانون اول برحسب تغییرات نسبت تمرکز و برای چند دمای مختلف ورودی رسم شده است. در این شکل ملاحظه می گردد که به ازای هر دمای ورودی، دارای یک نسبت تمرکز بهینه می باشیم که تقریباً امتداد نقاط پیک منحنی ها در یک خط واقع شده است. در مراجع (۹) و (۸) این نسبت تمرکز بهینه تنها با فرض کردن یک افت حرارت ثابت برای کلکتور بدست آورده شده است در حالی که نسبت تمرکز بهینه هم به طور اساسی تابع دمای ورودی می باشد و همچنین خود افت حرارت از کلکتور با تغییر نسبت تمرکز تغییر پیدا می کند و نمی توان آن را ثابت فرض نمود و این اشکال اساسی به کار آنها وارد است. (۱۱)

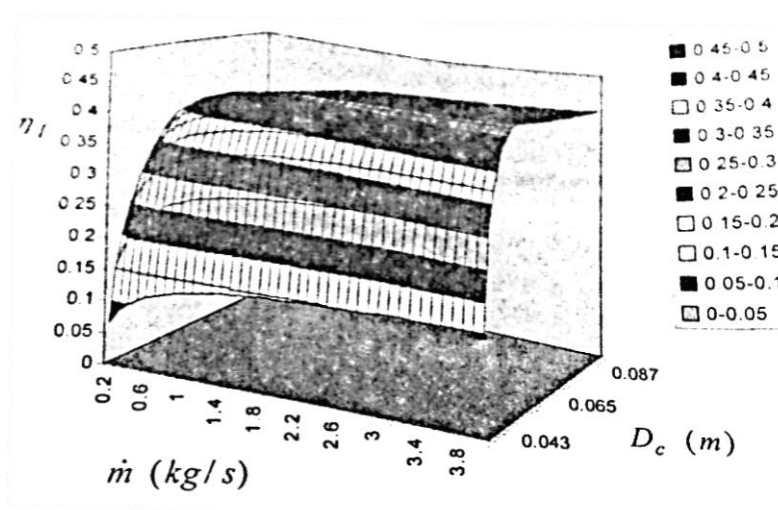
در شکل های (۲-۱۷) و (۲-۱۸) تغییرات راندمان قانون اول کلکتور بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای ملاحظه می گردد. مقادیر راندمان قانون اول برای این شکل ها با $T_{in,opt}$, C_{opt} که در قسمت (۲-۱۵) محاسبه شده، آورده شده است.

در شکل (۲-۱۷) مشاهده می گردد که راندمان قانون اول کلکتور با افزایش دبی جرمی پیوسته افزایش پیدا می کند، اما در یک قطر مشخص برای پوشش شیشه ای، مقدار آن به حداکثر می رسد.

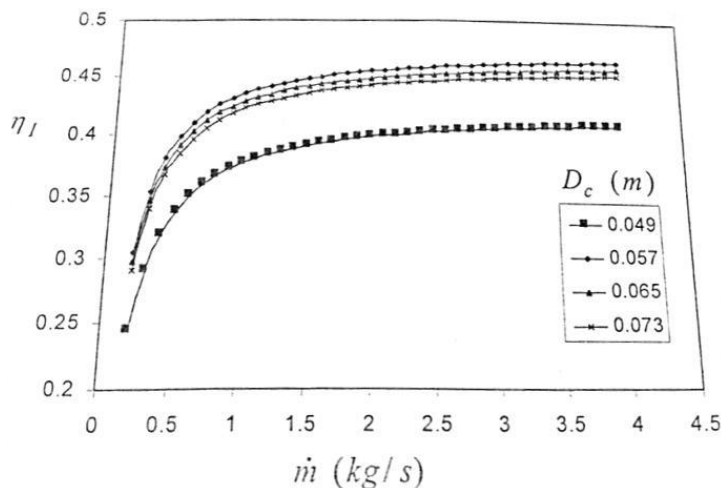
هر چقدر که مقدار دبی جرمی افزایش یابد، به سبب افزایش ضریب انتقال حرارت داخل لوله، ضریب جمع آوری حرارت U_C افزایش پیدا کرده و باعث پایین آمدن دمای سطح خارجی لوله فلزی می گردد و ضریب افت حرارت U_I کاهش پیدا می کند و در نتیجه راندمان

قانون اول افزایش می یابد. بنابراین راندمان قانون اول کلکتور نسبت به تغییرات دبی جرمی دارای نقطه بهینه نمی باشد.

از طرف دیگر در قطر های پایین پوشش شیشه ای، راندمان قانون اول به شدت کاهش پیدا می کند که علت آن بالا رفتن تلفات حرارتی می باشد. اما در یک قطر مشخصی، راندمان به حداکثر خود می رسد و پس از آن با اضافه شدن قطر پوشش، راندمان با شیب خیلی کمی کاهش می یابد. بنابراین راندمان قانون اول نسبت به تغییرات قطر پوشش شیشه ای دارای نقطه بهینه می باشد (۱۱)



شکل (۲-۱۷): رویه تغییرات راندمان قانون اول بر حسب دبی جرمی و پوشش شیشه ای (۱۱)



شکل (۲-۱۸): منحنی های تغییرات راندمان قانون اول بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای (۱۱)

در شکل (۲-۱۸) نیز به صورت دو بعدی تغییرات راندمان قانون اول بر حسب تغییرات دبی جرمی و برای چند قطر مختلف پوشش شیشه ای رسم گردیده است. ملاحظه می گردد که منحنی راندمان پس از افزایش مشخصی در مقدار D_c مجدداً پایین می آید و راندمان کم می شود و با افزایش دبی جرمی همواره راندمان بهبود پیدا می کند.

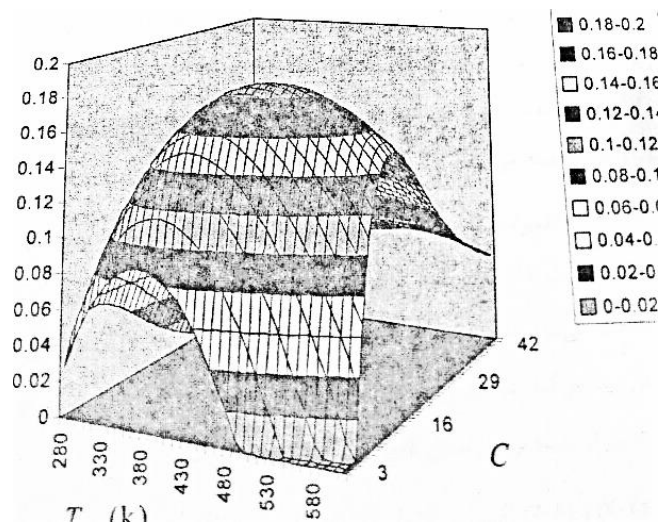
۲-۵-۱ بررسی تغییرات راندمان اگزورژی

مشابه بخش قبل در این قسمت تغییرات راندمان اگزورژی که هدف بهینه سازی بوده است بررسی می شود و تغییرات آن بر حسب تغییرات متغیرهای بهینه سازی ارزیابی می گردد. شکل های (۲-۱۹) و (۲-۲۰) تغییرات راندمان اگزورژی را بر حسب دمای ورودی و نسبت تمرکز نشان می دهند. مقادیر راندمان اگزورژی برای این شکل ها با \dot{m}_{opt} , $D_{c,opt}$ بدست آورده شده است.

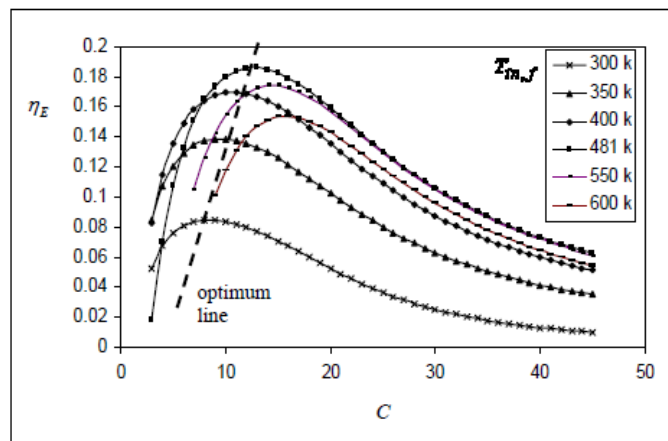
در شکل (۲-۱۹) نقطه ی حداکثر رویه ی راندمان اگزرژی قابل مشاهده است که همان نقطه ی بهینه سیستم می باشد. در این جا ملاحظه می گردد که راندمان اگزرژی با افزایش دمای ورودی افزایش می یابد

تا در یک دمای مشخص به حداکثر خود می رسد و پس از آن با افزایش دمای ورودی کاهش پیدا می کند. رفتار راندمان اگزرژی نسبت به تغییرات نسبت تمرکز، مشابه همان رفتار راندمان قانون اول در برابر این متغیر می باشد و دارای نقطه ی بهینه است.

هر چقدر که دمای ورودی کلکتور افزایش یابد، کیفیت انرژی جمع آوری شده نیز افزایش پیدا می کند و بنابراین اگزرژی جمع آوری شده بیشتر می شود. اما این افزایش دمای ورودی، باعث افزایش افت حرارت نیز می گردد تا جایی که در نقطه ی حداکثر راندمان اگزرژی، اثر افزایش افت حرارتی بر اثر افزایش کیفیت انرژی جمع آوری شده علبه کرده و باعث کاهش راندمان اگزرژی می شود. لذا همواره راندمان اگزرژی کلکتور بر خلاف راندمان قانون اول، نسبت به تغییر دمای ورودی دارای نقطه ی بهینه می باشد. (۱۱)



شکل (۲-۱۹): رویه تغییرات راندمان آگزرژی بر حسب دمای ورودی و نسبت تمرکز (۱۱)



شکل (۲-۲۰): منحنی های تغییرات راندمان آگزرژی بر حسب دمای ورودی و نسبت تمرکز (۱۱)

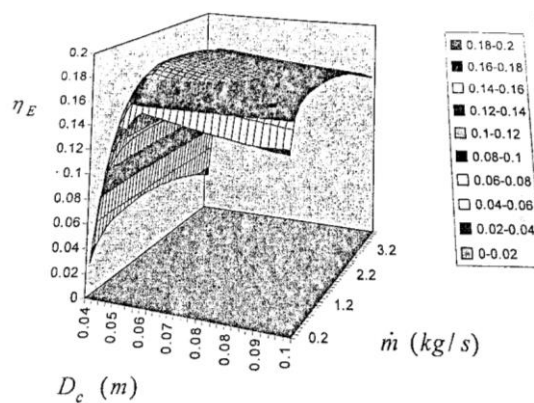
در شکل (۲-۲۰) تغییرات راندمان آگزرژی بر حسب نسبت تمرکز برای چند دمای ورودی مختلف رسم شده است. نقاط پیک راندمان آگزرژی برای دماهای مختلف تقریباً بر روی یک خط قرار دارد. ملاحظه می شود که با افزایش دمای ورودی، مقدار نسبت تمرکز بهینه برای راندمان آگزرژی افزایش پیدا می کند. در صورتی که در شکل (۲-۱۶) ملاحظه شد که با افزایش دمای ورودی مقدار نسبت تمرکز بهینه برای راندمان قانون اول کاهش پیدا می کند.

(۱۱)

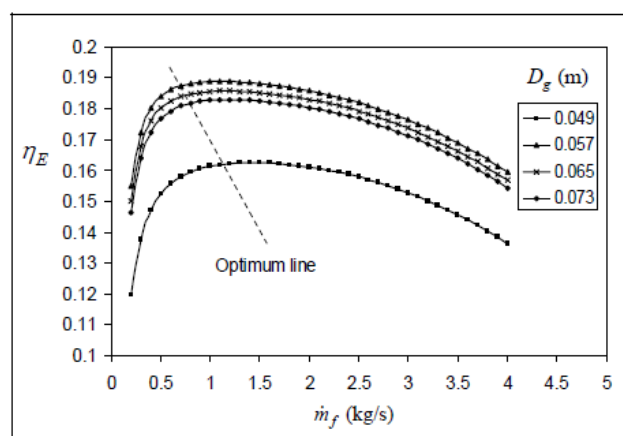
شکل های (۲-۲۱) و (۲-۲۲) تغییرات راندمان اگزرژی را بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای نشان می دهد. مقادیر راندمان اگزرژی برای این شکل ها با $T_{in,opt}$, C_{opt} بدست آورده شده است.

در شکل (۲-۲۱) مشاهده می شود که روبه ی تغییرات راندمان اگزرژی دارای نقطه ی حداکثر می باشد که مشخصات آن همان مشخصات نقطه ی بهینه می باشد. یعنی با افزایش دبی جرمی، راندمان اگزرژی افزایش می یابد تا به مقدار حداکثر خود می رسد و سپس با افزایش دبی جرمی، دارای نقطه بهینه می باشد. با افزایش دبی جرمی، ضریب انتقال حرارت داخل لوله افزایش می یابد و باعث کاهش تلفات حرارتی می گردد. اما از طرف دیگر، افزایش دبی جرمی باعث افزایش افت فشار و تخریب اگزرژی در کلکتور می شود و بنابراین با افزایش دبی جرمی در نقطه ی بهینه، اثر افزایش اگزرژی تخریب شده بر اثر کاهش افت حرارت غلبه کرده و باعث پایین آمدن راندمان اگزرژی می شود.

از طرف دیگر راندمان اگزرژی در برابر تغییرات قطر پوشش شیشه ای همانند رفتار راندمان قانون اول می باشد لذا راندمان اگزرژی نسبت به تغییرات پوشش شیشه ای دارای نقطه ی بهینه می باشد. (۱۱)



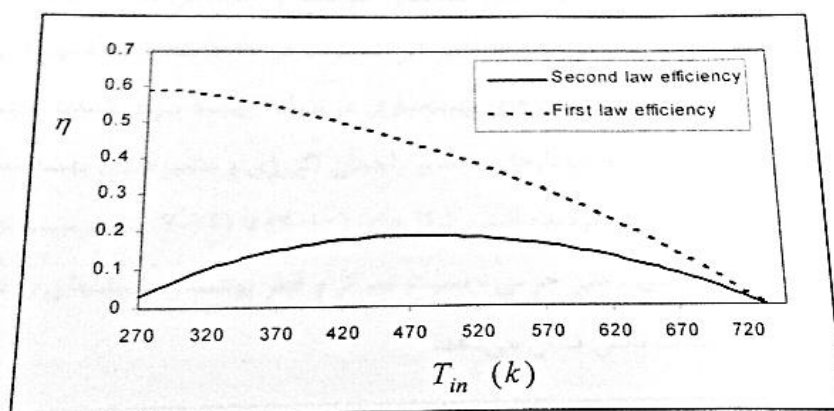
شکل (۲-۲۱): رویه تغییرات راندمان آگزرژی بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای (۱۱)



شکل (۲-۲۲): منحنی های تغییرات راندمان آگزرژی بر حسب دبی جرمی و قطر پوشش شیشه ای (۱۱)

در شکل (۲-۲۲) راندمان آگزرژی بر حسب دبی جرمی برای چند قطر مختلف رسم گردیده است. بازهم مشاهده می شود که نقاط حداکثر تقریباً بر روی یک خط واقعاً شده اند و با افزایش قطر پوشش از یک حد مشخص مقادیر راندمان آگزرژی کاهش پیدا کرده است. (۱۱)

در اینجا مناسب است که مقادیر راندمان قانون اول و دوم در یک نمودار با هم مشاهده گردد. شکل (۲-۲۳) تغییرات این دو راندمان را نشان می دهد. مشاهده می گردد که نمودار راندمان قانون اول غیر خطیمی باشد و علت آن متغیر بودن ضریب افت حرارت یعنی U_I می باشد که از اول بر آن تاکید داشتیم. در صورتی که اگر U_I ثابت فرض می شد، این منحنی بصورت خطی بدست می آمد. چنانچه ملاحظه می شود با افزایش دمای ورودی، راندمان قانون اول و دوم در یک دمای مشخص به صفر می رسد. این دما جایی است که بر اثر بالا رفتن دمای ورودی، افت حرارت از کلکتور برابر حرارت جذب شده می گردد و بنابراین دمای سیال در طول کلکتور افزایش پیدا نمی کند و ثابت می ماند که این دما را دمای سکون کلکتور^{۲۹} می نامند (۱۱)



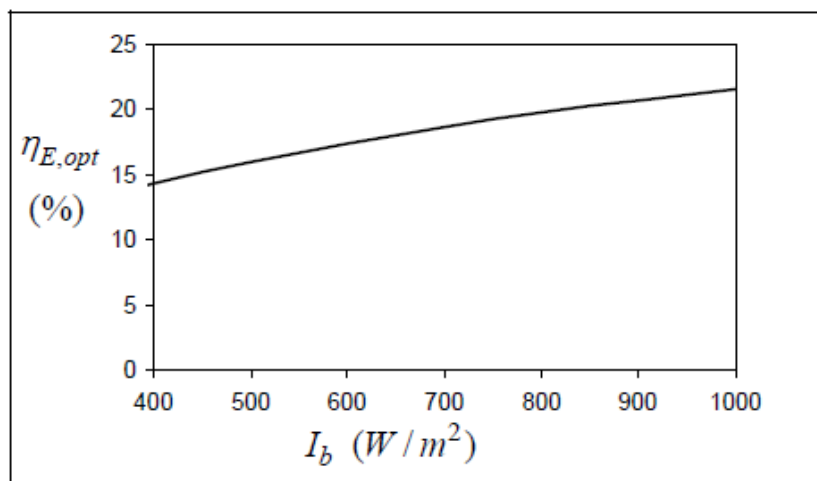
شکل (۲-۲۳): تغییرات راندمان ها بر حسب دمای ورودی کلکتور (۱۱)

۲-۵-۲ بررسی اثر شدت تابش و دمای محیط بر جابجایی نقطه بهینه

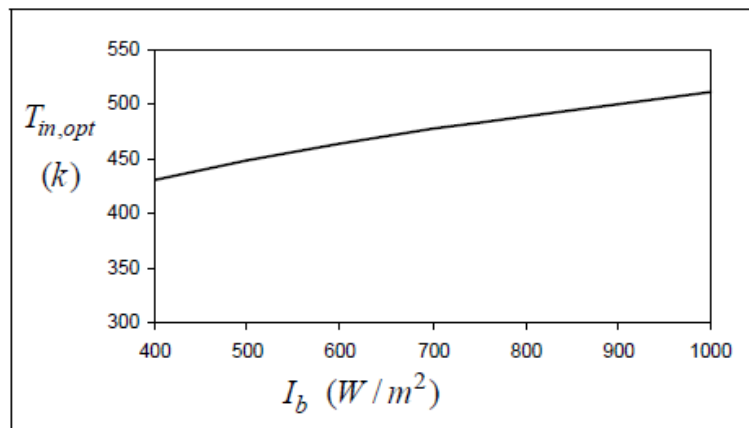
از آنجاییکه در یک محیط، شدت تابش تشعشعی خورشید و همچنین دمای محیط تغییر پیدا می کند، لذا ضروری به نظر می رسد که تاثیر این تغییرات در جابجا شدن نقطه بهینه

²⁹ Stagnation Temperature

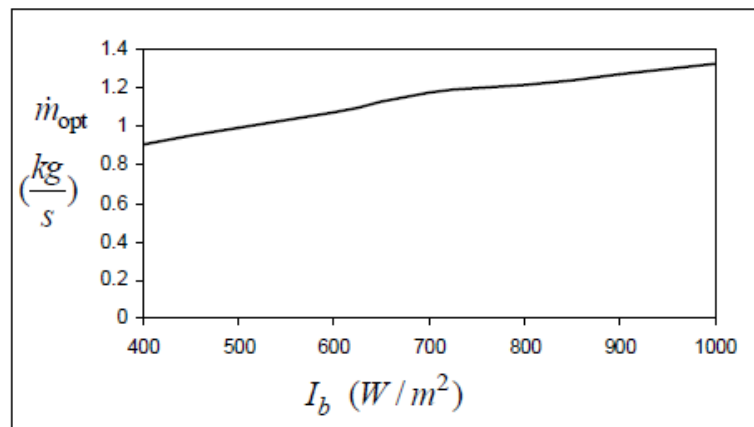
بررسی شود. جهت انجام این کار، مقادیر متغیرهای بهینه سازی در نقطه بهینه برای شدت تابش های مختلف بدست آورده شده است و نمودارهای مقادیر راندمان اگزرژی و متغیرها بهینه سازی بر حسب تغییرات شدت تابش رسم گردیده است. شکل های (۲-۲۴) تا (۲-۲۸) به ترتیب تغییرات راندمان اگزرژی، دمای ورودی، دبی جرمی، نسبت تمرکز و قطر پوشش شیشه ای را در نقطه بهینه بر حسب تغییرات شدت تابش نشان می دهد. (۱۱)



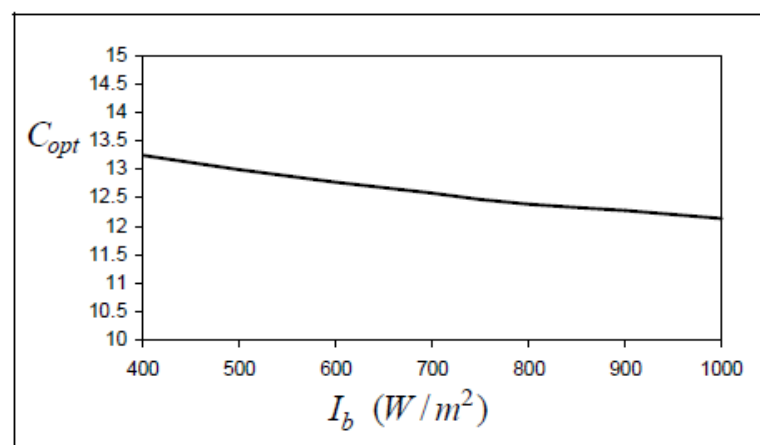
شکل (۲-۲۴): تغییرات راندمان اگزرژی بهینه بر حسب شدت تابش (۱۱)



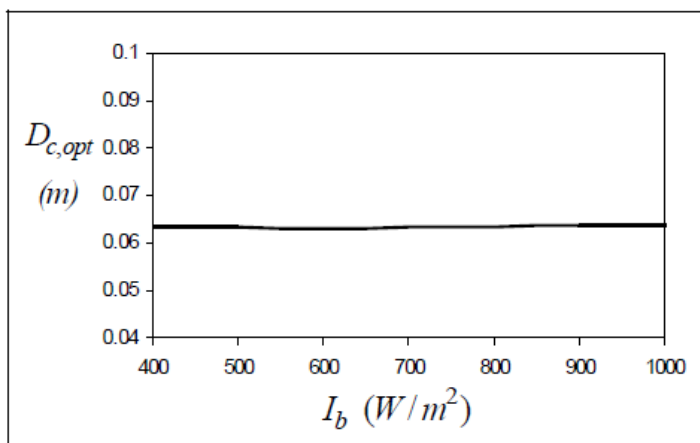
شکل (۲-۲۵): تغییرات دمای ورودی بهینه بر حسب شدت تابش (۱۱)



شکل (۲-۲۶): تغییرات دبی جرمی بهینه بر حسب شدت تابش (۱۱)



شکل (۲-۲۷): تغییرات نسبت تمرکز بهینه بر حسب شدت تابش (۱۱)

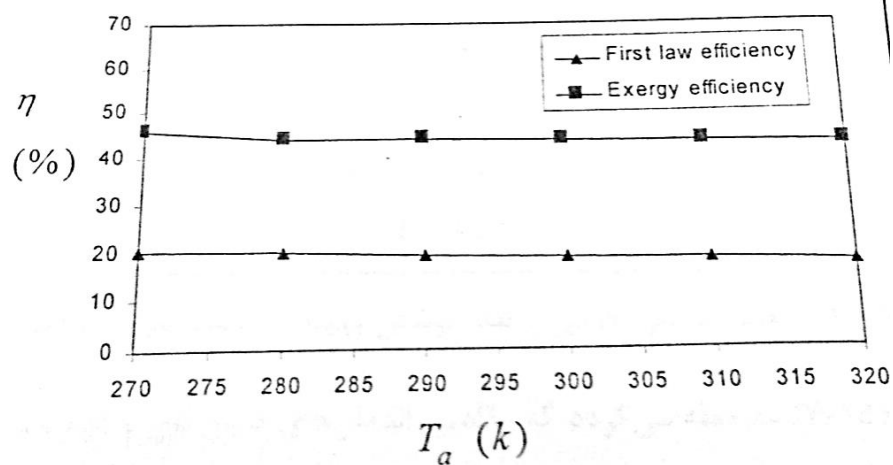


شکل (۲-۲۸): تغییرات قطر پوشش بهینه بر حسب شدت تابش (۱۱)

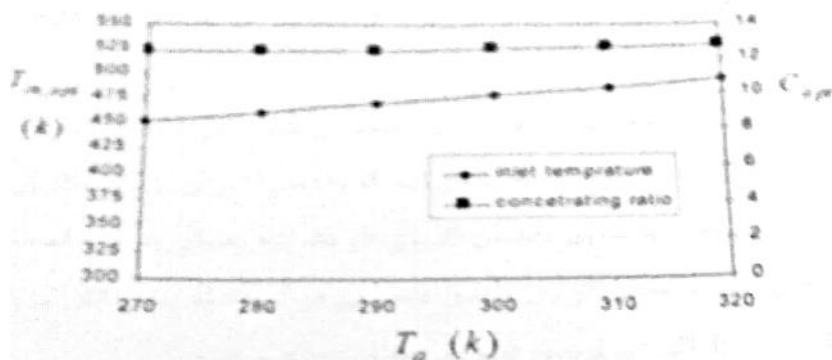
در این شکل ها ملاحظه می گردد که راندمان اگزورژی حداکثر و دمای ورودی بهینه و دبی جرمی بهینه با افزایش شدت تشعشع خورشید تغییر کرده و به مقدار نسبتاً قابل توجهی افزایش می یابند. در کنار آن نسبت تمرکز بهینه با افزایش شدت تشعشع، کاهش پیدا می کند اما درصد تغییرات آن نسبت به درصد تغییرات پارامترهای قبل کمتر می باشد. قطر پوشش شیشه ای نیز در نقطه بهینه با افزایش شدت تابش دارای تغییرات بسیار جزئی می باشد که در شکل به وضوح قابل ملاحظه نمی باشد. در مجموع می توان گفت که تغییرات شدت تابش خورشید، بیشتر از آنکه بر روی متغیرهای هندسی تاثیر گذار باشد، بر روی متغیرهای عملکردی یعنی دمای ورودی و دبی جرمی تاثیر می گذارد.

همچنین دمای محیط نیز می تواند یک عامل تاثیر گذار بر جابجایی نقطه بهینه باشد. لذا تغییرات مقادیر راندمان اگزورژی و متغیرهای بهینه سازی در نقطه بهینه بر حسب تغییرات دمای محیط باید بررسی شود.

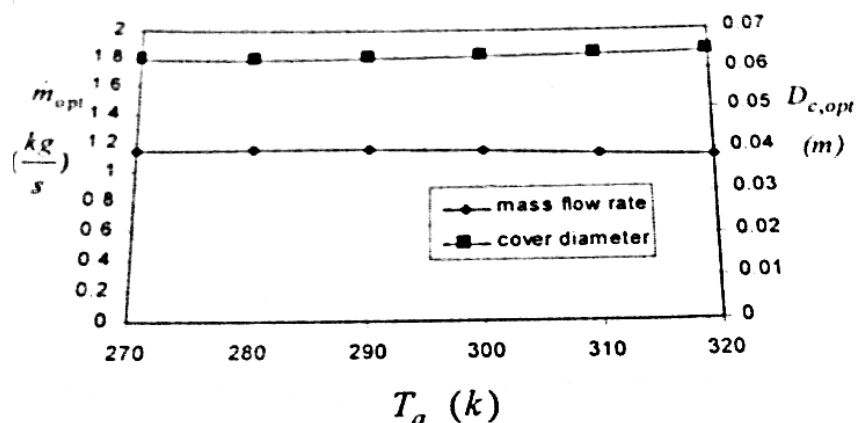
شکل های (۲-۲۹) تا (۲-۳۰) این تغییرات را نشان می دهند. (۱۱)



شکل (۲-۲۹): تغییرات راندمان ها بر حسب تغییرات دمای محیط (۱۱)



شکل (۲-۳۰): تغییرات دمای ورودی و نسبت تمرکز بر حسب تغییرات دمای محیط (۱۱)



شکل (۲-۳۱): تغییرات دبی جرمی و قطر پوشش بهینه بر حسب تغییرات دمای محیط (۱۱)

در شکل (۲-۲۹) ملاحظه می گردد که مقادیر راندمان های قانون اول و دوم، با افزایش دمای محیط به مقدار کمی کاهش پیدا می کند که بسیار ناچیز می باشد و تقریباً می توان گفت که ثابت هستند. در شکل (۲-۳۰) تغییرات دمای ورودی و نسبت تمرکز بهینه بر حسب دمای محیط رسم شده است که دمای ورودی بهینه با افزایش دمای محیط افزایش می یابد. اما نسبت تمرکز بهینه دارای تغییرات نسبتاً کمی می باشد. در شکل (۲-۳۱) دبی جرمی و قطر پوشش بهینه بر حسب دمای محیط رسم شده است که تغییرات آنها بسیار ناچیز می باشد. بنابراین در مجموع می توان گفت که تغییرات دمای محیط تنها در جابجایی مقدار دمای ورودی بهینه موثر است. البته تغییرات دمای محیط بر دمای ورودی از تغییرات شار تشعشی بر دمای ورودی بهینه کمتر می باشد.

از آنجا که شدت تابش خورشید در طول روز تغییر می کند و در نتیجه راندمان لحظه ای اگزرژی نیز تغییر می کند، این موضوع ایجاب می کند که راندمان اگزرژی را برای یک بازه زمانی با شدت تابش متغیر نیز محاسبه نماییم. راندمان اگزرژی در یک بازه زمانی عبارت است

از مقدار اگزرژی جمع آوری شده به مقدار اگزرژی ورودی تشعشی در آن فاصله زمانی

اگر $E_{o,\Delta t}$ اگزرژی جمع آوری شده و $E_{i,\Delta t}$ اگزرژی ورودی تشعشی باشد خواهیم داشت:

$$\eta_{E,\Delta t} = \frac{E_{o,\Delta t}}{E_{i,\Delta t}} \quad (۲-۱۱۷)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۳۵-۵) که راندمان لحظه ای اگزرژی را بدست می دهد و با

استفاده از رابطه (۲-۷)، راندمان اگزرژی در یک بازه زمانی به صورت زیر بدست می

آید:

$$\eta_{E,\Delta t} = \frac{\int_{t_2}^{t_2} \left(C_p \dot{m} \left(T_{out} - T_{in} - T_a \ln \frac{T_{out}}{T_a} \right) - \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \right) dt}{\int_{t_2}^{t_2} I_b(t) A_c \eta_p dt} \quad (۲-۱۱۸)$$

در رابطه (۲-۱۱۸) باید توجه شود که $I_b(t)$ شدت تابش متغیر با زمان می باشد و به عنوان

یک ورودی برای سیستم معادلات به حساب می آید. تمام محاسبات و معادلات بهینه سازی

که در قسمت های گذشته شرح داده شد را عیناً می توان برای بهینه کردن $\eta_{E,\Delta t}$ نیز بکار برد و

فقط باید انتگرال های (۲-۱۱۸) در هر مرحله تکرار محاسبه شوند که با استفاده از روش

عددی انتگرالگیری سمپسون این انتگرالگیری در برنامه کامپیوتری تهیه شده، انجام می پذیرد.

لازم به ذکر است که زمان محاسبات و اجرای برنامه به همین دلیل بسیار افزایش می یابد.

(۱۱)

۲-۵-۳ بررسی مقدار و تغییرات افت های اگزرژی

اگزرژی جمع آوری شده توسط کلکتور را می توان قسمتی از اگزرژی تشعشی ورودی

دانست که مقداری از این اگزرژی تشعشی، جمع آوری شده و باقیمانده آن به صورت افت

های اگزرژی از کلکتور به هدر می رود و یا تخریب می شود. در این قسمت، سهم هر کدام از این افت ها در مقدار راندمان اگزرژی بررسی می شود و همچنین تغییرات افت ها اگزرژی بر حسب متغیرهای بهینه سازی بدست آورده شده است و تحلیل فیزیکی آنها آورده می شود. نسبت افت های اگزرژی به اگزرژی ورودی تشعشی، درصد تاثیر هر کدام از این افت ها را در مقدار راندمان اگزرژی نشان می دهد که اگر مجموع آنها از یک کسر شود، راندمان اگزرژی به صورت زیر آورده می شود و افت های آن به تفکیک مشخص می گردد: (۱۱)

$$\eta_E = 1 - \left[\underbrace{\frac{(1 - \eta_o)}{\eta_p}}_{\text{optical loss}} + \underbrace{\frac{\eta_o T_a}{\eta_p} \left(\frac{1}{T_P} - \frac{1}{T_s} \right)}_{\text{absorption loss}} + \underbrace{\frac{U_I A_I (T_P - T_a)}{I_b A_c \eta_p} \left(1 - \frac{T_a}{T_P} \right)}_{\text{heat loss}} + \underbrace{\frac{C_p \dot{m} T_a}{I_b A_c \eta_p} \left(\ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - \frac{T_{out} - T_{in}}{T_P} \right)}_{\text{conduction loss}} + \underbrace{\frac{T_a}{I_b A_c \eta_p} \frac{\dot{m} \Delta P}{\rho} \frac{\ln \frac{T_{out}}{T_{in}}}{T_{out} - T_{in}}}_{\text{pressure loss}} \right] \quad (119-2)$$

بنابراین در یک سیستم کلکتور، پنج نوع افت اگزرژی خواهیم داشت ۱- افت اپتیکی ۲- افت جذب تشعشع ۳- افت حرارت به محیط ۴- افت هدایت حرارتی ۵- افت فشار سیال.

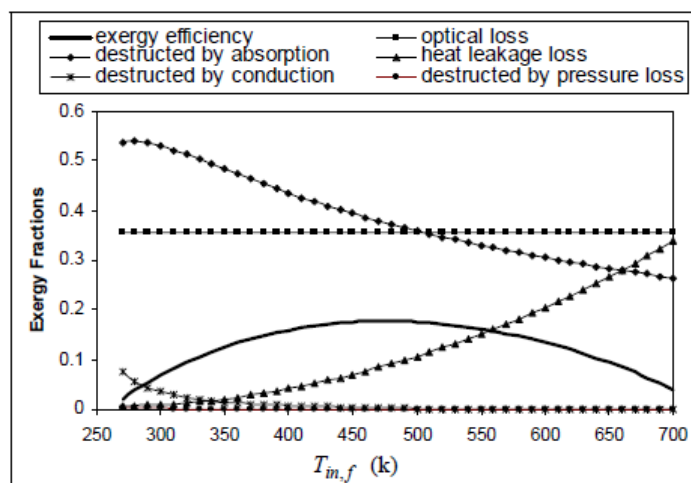
در شکل‌های (۳۲-۲) تا (۳۵-۲)، تغییرات افت های اگزرژی بر حسب تغییر متغیرهای بهینه سازی محاسبه و رسم گردیده اند که حاصل جمع آنها کل افت های اگزرژی را بدست می دهد که اگر از یک کم شود، راندمان اگزرژی بدست می آید و بنابراین در این شکل ها تغییرات راندمان اگزرژی نیز در کنار تغییرات افت ها آمده است. برای محاسبه بدست آوردن

این شکل ها یک متغیر بهینه سازی تغییر داده شده و سایر متغیرهای بهینه سازی در مقدار بهینه، مقدار دهی شده اند.

در شکل (۲-۳۲) راندمان اگزرژی و هر کدام از افت های اگزرژی بر حسب دمای ورودی رسم شده است. آنچه در این شکل ملاحظه می گردد این است که: ۱- افت اپتیکی کلکتور با افزایش دمای ورودی ثابت می باشد. علت آن اثر نداشتن دمای ورودی در راندمان اپتیکی متمرکز کننده می باشد ۲- افت اگزرژی ناشی از جذب تشعشع حرارتی با افزایش دمای ورودی کاهش می یابد علت آن این است که با افزایش دمای ورودی سیال، دمای سطح خارجی لوله گیرنده نیز بیشتر می شود و بنابراین اختلاف دمای سطح خارجی لوله فلزی با خورشید کم می شود و در نتیجه تخریب اگزرژی ناشی از این انتقال حرارت، کاهش می یابد. ۳- افت اگزرژی ناشی از تلفات حرارتی به محیط با افزایش دمای ورودی افزایش یافته است. علت آن باز هم افزایش دمای سطح خارجی لوله فلزی می باشد که موجب تلفات حرارتی بیشتری می گردد ۴- افت اگزرژی ناشی از هدایت حرارتی کم می شود و مقدار آن با افزایش دمای ورودی کاهش پیدا می کند. زیرا با بالا رفتن دمای ورودی سیال، افت حرارتی بیشتر می شود و اختلاف دمای ورودی و خروجی سیال کم می شود و دمای سیال به دمای سطح خارجی لوله جذب کننده نزدیک می گردد. لذا اختلاف دمای کمتری بین دمای سیال و لوله بوجود می آید که باعث کاهش افت هدایت حرارتی می شود ۵- افت اگزرژی ناشی از افت فشار نیز تقریباً ثابت بوده و مقدار آن بسیار ناچیز است. البته در اکثر مراجع از اگزرژی تخریب شده به سبب افت فشار صرفنظر شده است اما با بالا رفتن دبی جرمی سیال، باید از آن چشم

پوشی نمود. مجموع اثرات تغییر افت های اگزرژی نسبت به تغییر دمای ورودی موجب

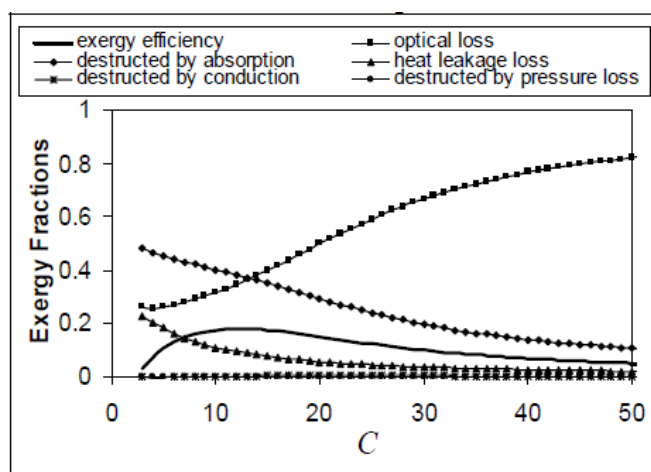
بوجود آمدن یک نقطه حداکثر در مقدار راندمان اگزرژی شده است. (۱۱)



شکل (۲-۳۲): تغییرات راندمان و افت های اگزرژی بر حسب دمای ورودی (۱۱)

در شکل (۲-۳۳) راندمان اگزرژی و هر کدام از افت های اگزرژی بر حسب نسبت تمرکز رسم شده است. آنچه ملاحظه می شود این است که: ۱- افت اپتیکی کلکتور با افزایش نسبت تمرکز افزایش زیادی پیدا می کند که علت آن وجود خطاهای اپتیکی در متمرکز کننده می باشند که متناسب با نسبت تمرکز هستند ۲- افت اگزرژی ناشی از جذب تشعشع حرارتی با افزایش نسبت تمرکز، کاهش پیدا می کند. علت آن کاهش مقدار تشعشع رسیده به سطح خارجی لوله فلزی می باشد. زیرا راندمان اپتیکی متمرکزکننده با افزایش نسبت تمرکز کاهش می یابد و تشعشع کمتری به لوله گیرنده برخورد می کند. ۳- افت اگزرژی ناشی از تلفات حرارت به محیط با افزایش نسبت تمرکز پیوسته کاهش می یابد. زیرا با افزایش نسبت تمرکز طول کلکتور کوتاه تر می شود و باعث کاهش سطح خارجی لوله می گردد و در نتیجه افت

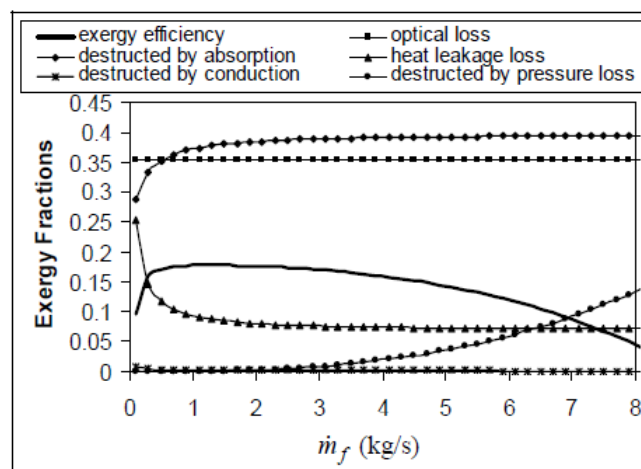
حرارتی به محیط کاهش می یابد. ۴- افت انرژی به سبب هدایت حرارتی و افت فشار سیال بسیار ناچیز و در حد صفر می باشد. مجموع اثرات تغییر افت های انرژی نسبت به تغییر نسبت تمرکز، موجب بوجود آمدن یک نقطه حداکثر در مقدار راندمان انرژی شده است. (۱۱)



شکل (۲-۳۳): تغییرات راندمان و افت های انرژی بر حسب نسبت تمرکز (۱۱)

در شکل (۲-۳۴) راندمان انرژی و هر کدام از افت های انرژی بر حسب دبی جرمی رسم شده است. آنچه ملاحظه می شود این است که: ۱- افت اپتیکی متمرکزکننده ثابت می باشد. زیرا تغییرات دبی جرمی اثری بر راندمان اپتیکی متمرکز کننده ندارد ۲- افت انرژی ناشی از جذب تشعشع، با افزایش دبی جرمی افزایش یافته است. زیرا افزایش دبی جرمی، ضریب انتقال حرارت داخل لوله افزایش یافته و حرارت با نرخ بیشتری از جداره لوله برداشت می شود و بنابراین دمای سطح خارج لوله پایین می آید و لذا اختلاف دمای سطح خارجی لوله با خورشید افزایش یافته و در نتیجه افت انرژی به سبب جذب تشعشع خورشید افزایش می یابد ۳- افت انرژی ناشی از تلفات حرارتی به محیط با افزایش دبی جرمی کاهش یافته است که علت توضیح داده شده است. ۴- افت انرژی به سبب هدایت حرارتی بسیار ناچیز می باشد که

دلیل آن همان اختلاف دمای لوله با سیال می باشد. ۵- افت انرژی های انتقالی ها سبب افت فشار سیال با افزایش دبی جرمی به طور چشمگیری افزایش پیدا می کند زیرا دبی جرمی بیشتر، افت فشار بیشتری را بوجود می آورد و بنابراین در دبی های نسبتاً بالا صرفنظر کردن از افت انرژی های انتقالی از افت فشار صحیح نمی باشد. مجموع اثرات تغییر افت های انرژی های انتقالی نسبت به تغییر دبی جرمی موجب بوجود آمدن یک نقطه حداکثر در مقدار راندمان انرژی شده است. (۱۱)

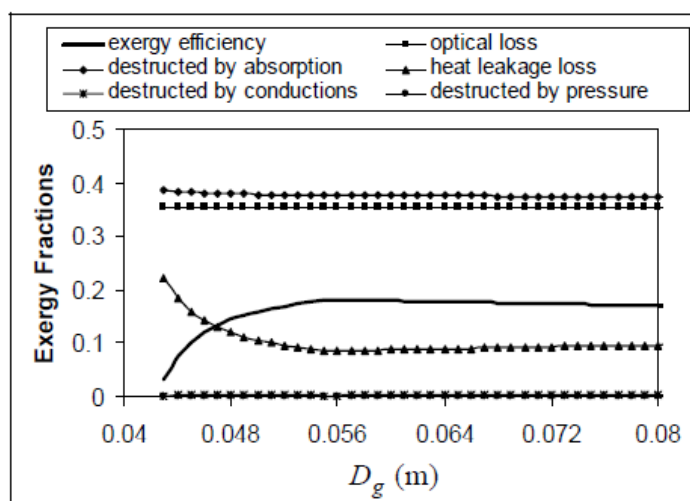


شکل (۲-۳۴): تغییرات راندمان و افت های انرژی های انتقالی بر حسب دبی جرمی (۱۱)

در شکل (۲-۳۵) راندمان انرژی های انتقالی و هر کدام از افت های انرژی های انتقالی بر حسب قطر پوشش شیشه ای رسم شده است. آنچه ملاحظه می شود این است که: ۱- افت اپتیکی متمرکزکننده ثابت می باشد. زیرا تغییرات قطر پوشش، اثری بر راندمان اپتیکی متمرکزکننده ندارد ۲- افت انرژی های انتقالی از جذب تشعشع با افزایش قطر پوشش شیشه ای کاهش پیدا می کند و با افزایش بیشتر قطر پوشش شیشه ای، تقریباً ثابت می ماند. علت آن بالا بودن افت حرارتی به محیط در قطرهای پایین می باشد که باعث پایین آمدن دمای سطح خارجی لوله فلزی شده و بنابراین اختلاف دمای لوله فلزی افزایش پیدا می کند. ۳- افت انرژی های انتقالی از تلفات حرارتی

به محیط با افزایش قطر پوشش شیشه ای در ابتدا به طور چشمگیری کاهش پیدا می کند و در یک قطر مشخص، مقدار آن به حداقل می رسد و با افزایش بیشتر قطر پوشش شیشه ای، افت حرارتی با شیب خیلی کم افزایش می یابد و بنابراین قطر پوشش شیشه ای از یک حد مشخص نبایستی کمتر باشد. ۴- افت اگزرژی به سبب هدایت حرارتی و افت فشار سیال نیز ناچیز و در حد صفر می باشد. مجموع این تغییر افت های اگزرژی نسبت به تغییر قطر پوشش شیشه ای موجب بوجود آمدن یک نقطه حداکثر در مقدار راندمان اگزرژی شده است. (۱۱)

شکل (۲-۳۵): تغییرات راندمان و افت های اگزرژی بر حسب قطر پوشش شیشه ای (۱۱)



۲-۵-۴ بررسی تاثیر استفاده از روشهای بهبود انتقال حرارت در راندمان اگزرژی

استفاده از روش های بهبود انتقال حرارت در داخل لوله، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت داخل لوله می شود و لذا حرارت با نرخ بیشتری از سطح لوله جمع آوری می شود و دمای سطح خارجی لوله کاهش پیدا کرده و در نتیجه آن، افت حرارتی به محیط نیز کاهش پیدا می کند بنابراین استفاده از این روش ها باعث افزایش راندمان حرارتی کلکتور می شود. در بحث اگزرژی نیاز به استفاده از این روش ها باعث کاهش اگزرژی تخریب شده ناشی از

تلفات حرارتی می گردد، که باعث افت فشار بیشتری نیز در سیال می شود و لذا اگرژی بیشتری از این طریق تخریب می شود بنابراین لازم است تا نقطه بهینه در حالتی که از این روش ها استفاده می گردد بدست آورده شود. برای این منظور یکی از ساده ترین این روش ها که عبارت است از قرار دادن یک تسمه پیچیده در داخل لوله، انتخاب شده است که روابط انتقال حرارت و افت فشار آن در صفحات قبل آورده شد.

با بررسی تحلیل پارامتری این روابط به این نتیجه می توان رسید که اساسا استفاده از این روش ها، سقف نهایی اگرژی جمع آوری شده را در نقطه بهینه افزایش نمی دهد و تنها مقادیر متغیرها را در نقطه بهینه جابجا می کند. این جابجایی تنها شامل شرایط عملکردی یعنی دمای ورودی و دبی جرمی می شود و پارامترهای هندسی کلکتور تغییر نمی کند. با استفاده از این روش ها مقدار دبی جرمی و دمای ورود بهینه کمی کاهش پیدا می کند. (۱۱)

فصل سوم

پیشینه پژوهش

در این فصل مروری بر پژوهش های انجام شده توسط محققین در این عرصه خواهیم داشت:
ابتدا به مقالات ارائه شده در داخل کشور پرداخته، سپس مقالات خارجی را مورد بررسی قرار
می دهیم .

در سال ۱۳۹۲ هجری شمسی، آقای صادقیانی و همکارانش مقاله ای تحت عنوان آنالیز
اگرژژیک و انرژی کلکتورهای سهموی خطی (۱۶) رادر ایران ارائه نمودند که در این مقاله
تاثیرات پوشش شیشه ای تخلیه را در از دست دادن حرارت همرفتی و راندمان اگرژژیک، در
سه مرحله مورد مطالعه قرار دادند. در مرحله ی اول لوله دریافت تخلیه ۲-Is کلکتور سهموی
خطی را با مکانیک سیالات حرارتی در آزمایشگاه تحقیقاتی بین المللی ساندا مورد آنالیز و
شبیه سازی قرار دادند و در مرحله دوم کلکتور ذکر شده و لوله جاذب را بدون پوشش شیشه
ای تخلیه برای سرعت های مختلف باد و جهت های کلکتور آنالیز و شبیه سازی کردند. درجه

حرارت لوله دریافت و محیط به ترتیب حدود ۳۵۰ و ۳۰۰ درجه سانتیگراد می باشد . در مرحله آخر آنالیز اگزورژی هر مورد مطالعه و نیز نسبت تاثیرات وزش باد و جهت کلکتور را در از دست دادن اگزورژی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که وقتی وزش باد بر روی جهت محدب آینه های سهموی باشد ، سرعت باد و تغییر جهت حداقل و حداکثر تاثیرپذیری رابر روی درجه حرارت دررو دارد، همچنین با افزایش مقدار وزش باد (از ۵ تا ۱۵) و همینطور زاویه جهت (از ۹۰- تا ۹۰+)، راندمان اگزورژی کاهش می یابد. بنابراین استفاده از لوله تخلیه سودمند بوده و منجر به افزایش اگزورژیک از ۱۰٪ تا ۶۰٪ می شود.

سال ۱۳۹۳ هجری شمسی مصادف با سال ۲۰۱۴ میلادی را می توان سال انرژی خورشیدی نامید چراکه در این سال پژوهش های فراوانی در این زمینه در سراسر جهان صورت گرفت که در زیر چندین نمونه از این پژوهش ها که البته مرتبط با پژوهش ارائه شده نیز می باشد، بیان می گردد.

آقای رضایی مقدم مقاله ای تحت عنوان آنالیز پارامتریک عوامل محیطی و تکنولوژیک بر کارایی دریافت کننده سهموی خطی خورشیدی [۱۵] را ارائه دادند که با توجه به اینکه سهم قابل توجهی از راندمان بخش خورشیدی به گرد آورنده تکنولوژی دریافت کننده سهموی خطی اختصاص دارد و کاهش اتلافات حرارتی در این جزء در عملکرد بهینه ی کل مجموعه موثر است، در مقاله خود، عملکرد حرارتی گردآورنده های سهموی خطی راشبیه سازی و پارامترهای موثر بر عملکرد دریافت کننده را لحاظ و اثر آن ها را بررسی کرده است. نتایج بدست آمده، نشان داد که عملکرد لوله دریافت کننده ، وابستگی کمی به دبی و نوع سیال ناقل

حرارت دارد و کارکرد در دماهای بالاتر علیرغم کاستن از کارایی لوله ی دریافت کننده، سبب افزایش راندمان سیکل قدرت می شود همچنین سرعت باد نیز تاثیر کمی بر راندمان دریافت کننده دارد و مارپیچ کردن لوله ها سبب افزایش آشفته گری جریان سیال ناقل حرارت و افزایش نرخ انتقال حرارت می گردد.

آقای صالحی و همکارانش نیز دو مقاله مجزا، تحت عناوین بررسی تاثیر دبی های متفاوت بر روی راندمان کلکتور سهموی خطی و بررسی تغییرات راندمان و دمای خروجی از کلکتورهای سهموی خطی بر اثر تغییر دقت سیستم ردیاب خورشیدی را ارائه دادند.

در مقاله اول به بررسی تاثیر میزان دبی سیال موجود در داخل لوله گیرنده ی کلکتورهای سهموی خطی بر روی راندمان سیستم پرداخته اند. (۱۷) به این منظور یک کلکتور سهموی خطی و یک سیستم کنترل کننده ی اتوماتیک با دقت مطلوب ساخته و چهار آزمایش بر روی این کلکتور انجام دادند که در همه ی آنها تمام پارامترها ثابت و فقط دبی ها متفاوت در نظر گرفته شده است. دما در طول لوله گیرنده را در تمام مدت زمان آزمایش ها اندازه گیری کرده و نمودار آن را رسم کردند همچنین میزان راندمان در هر کلکتور را محاسبه نمودند. طی اطلاعات بدست آمده هر چه دبی در لوله گیرنده افزایش یابد راندمان کلکتور نیز افزایش می یابد ولی از طرفی دمای سیال خروجی از کلکتورها کاهش می یابد. با وجود اینکه هر چه راندمان کلکتور افزایش یابد بهتر است، ولی محدودیت هایی نیز در افزایش دبی وجود دارد. در نیروگاه های حرارتی هر چه دما در سیکل افزایش یابد راندمان هم افزایش می یابد. همچنین برای افزایش دبی، نیاز به افزایش توان پمپ است که این دو عامل، محدود کننده

هایی برای افزایش دبی در کلکتورهای نیروگاهی است. در این مقاله فقط به راندمان کلکتور و تاثیر دبی بر روی آن پرداخته شده است.

در مقاله دوم نیز تاثیر میزان دقت سنسورهای ردیاب نور خورشید در کلکتورهای سهموی خطی بر روی راندمان این کلکتورها را بررسی نمودند. (۱۸) به این منظور نیز یک نمونه از این کلکتورها را ساخته و یک سیستم اتوماتیک ردیاب نور با دقت ردیابی قابل تنظیم، طراحی و بر روی کلکتور نصب کردند. با آزمایش عملی، راندمان سیستم در دقت های متفاوت را بدست آورده و میزان افزایش دما در طول کلکتور را نیز اندازه گیری و در نمودار ترسیم نموده اند. با محاسبات انجام گرفته روی دما های اندازه گیری شده میزان اتلاف حرارتی در طول کلکتور را نیز محاسبه و در نمودار رسم نمودند. طبق نتایج بدست آمده، مشخص شد که اگر میزان دقت سنسورها افزایش یابد و هماهنگی با آن قطر لوله گیرنده کاهش یابد راندمان سیستم افزایش می یابد. محدودیتهایی برای کاهش قطر لوله در این سیستم وجود دارد که به دلیل همین محدودیت ها نتیجه گیری شده است که دقت سنسورها هر چه افزایش یابد و به تناسب آن قطر لوله گیرنده کاهش یابد راندمان افزایش می یابد ولی بسته به مشخصات کلکتور اگر دقت سنسورها از مقداری خاص بیشتر شود به دلیل محدودیت های ذکر شده نمی توان قطر لوله را از مقداری مشخص کمتر کرد و به همین دلیل راندمان در دقت های زیاد، با تغییر دقت سنسورها ثابت می ماند.

آقایان قلی نژاد و بیدی نیز بدنبال تحقیقات صورت گرفته در زمینه نیروگاه سهموی خطی، مقاله ای تحت عنوان آنالیز اگزرژی کلکتور سهموی خطی در یک نیروگاه خورشیدی (۱۹)، ارائه دادند که در این مقاله بر روی سیکل نیروگاه بخار به همراه مزرعه خورشیدی مجهز به

کلکتور سهموی خطی، آنالیز اگزِرژی را برای تعیین شرایط بهینه عملکردی آن انجام دادند. به این منظور سیکل بخار و مزرعه خورشیدی را مدل سازی کرده و سپس آنالیز اگزِرژی در مولفه های مختلف سیستم را انجام دادند. برای تعیین شرایط بهینه کارکرد کلکتور سهموی خطی، مزرعه خورشیدی به طول ۲۰۰۰ متر طراحی و برای شرایط تابش و دبی سیال عامل مشخص، میزان تاثیر دمای سیال عامل بر بازده اگزِرژی و بازده حرارتی مشخص شد. نتایج نشان می دهد که افزایش دمای سیال حرارتی در مزرعه خورشیدی باعث کاهش بازده حرارتی و اگزِرژی شده و این کاهش در تابش های کم، بیشتر نیز می شود. در نتیجه دمای سیال عامل باید تا حد امکان که فرایند اجازه می دهد، پایین نگه داشته شود. از طرف دیگر افزایش دمای بخار وردی به توربین خار موجب افزایش راندمان چرخه بخار می شود. برای افزایش دمای بخار باید دمای سیال حرارتی افزایش یابد. در نتیجه می توان نقطه بهینه ای برای دمای سیال حرارتی مزرعه خورشیدی تعیین کرد.

آقای کسائیان و همکارانش مقاله ای تحت عنوان افزایش انتقال حرارت در لوله کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانو سیال روغن سنتتیک $oil-al_2o_3$ (۲۰) را ارائه دادند که در این مقاله انتقال حرارت همرفتی مخلوط آشفته توسعه یافته کامل سه بعدی همراه با نانو سیال روغن سنتتیک $oil-al_2o_3$ در یک لوله کلکتور سهموی خطی با شار حرارتی غیر یکنواخت مورد بررسی عددی قرار گرفت. اثر غلظت ذرات al_2o_3 در روغن سنتتیک بر نرخ انتقال حرارت لوله جاذب نیز بررسی شده است. غلظت نانو ذرات مختلف در دماهای عملیاتی ۳۰۰ و ۴۰۰ و ۵۰۰ کلوین در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفت. توزیع شار حرارتی بر روی سطح بیرونی لوله جاذب در جهت محیطی غیر یکنواخت است اما در جهت محوری

یکنواخت است. شار گرمایی در جهت محیطی با استفاده از روش ردیابی اشعه مونت کارلو به دست می آید. جرم، اندازه حرکت و انرژی از معادلات ناویر استوکس سه بعدی با استفاده از FLUENT حل شده است. گسسته سازی ثانویه برای شرایط همرفتی و پخش مورد استفاده قرار می گیرد و این طرح ساده برای اتصال سرعت-فشار استفاده شده است. درجه حرارت خروجی لوله جاذب از شبیه سازی عددی جریان با داده های تجربی موجود مقایسه می شود. خطاهای مطلق کمتر از ۳,۸C نمایان می شود. نتایج عددی فعلی نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت همرفتی یک وابستگی مستقیم به غلظت حجمی نانوذرات در سیالات دارد. علاوه بر این، افزایش انتقال حرارت با توجه به نانوذرات در سیال همانطور که دمای عملیاتی در لوله جاذب افزایش می یابد، کاهش می یابد.

آقای بینسینتو^{۳۰} و همکارانش نیز مقاله ای تحت عنوان مقایسه عملکرد سالانه و کارایی مدل نیروگاه های حرارتی خورشیدی سهموی خطی با نیتروژن و روغن سینتیک به عنوان سیال انتقال حرارت (۲۲) را در کشور اسپانیا ارائه دادند. با توجه به اینکه اکثر نیروگاه های سهموی خطی در جهان با روغن سینتیک به عنوان سیال انتقال حرارت فعالیت دارند با این وجود این روغن ها که در هزینه مقرون به صرفه هستند دارای محدودیت هایی از قبیل اشتعال پذیری ، سمی بودن و محدودیت دمایی می باشند لذا نیتروژن تحت فشار به عنوان سیال انتقال حرارت پیشنهاد می شود. جهت آنالیز امکان سنجی اسن فن آوری ، مقایسه ای بین دو نیروگاه حرارتی خورشیدی سهموی خطی کاملاً مشابه ۵۰ مگاواتی با ۶ ساعت ذخیره سازی حرارتی که یکی با سیال نیتروژن و دیگری با سیال روغن سینتیک فعالیت می کردند را صورت دادند و میدان

³⁰ Biencinto

های خورشیدی، سیستم ذخیره سازی حرارتی و بلوک قدرت را در نرم افزار Trnsys شبیه سازی نمودند. در این مقاله توصیف مشخصات، طراحی و اندازه میدان مغناطیسی خورشیدی، استراتژی اساسی عملیات را در هر دو مدل بیان می کند. هر دو شبیه سازی با توجه به همان محل (اسپانیا) و تحت یک شرایط آب و هوایی انجام گرفته است. به طور خلاصه نتایج نشان می دهند که تولیدات الکتریکی سالیانه در نیروگاه های سهموی خطی می تواند در مساحت های مختلف بانیتروژن یا روغن سیستیک بدست آید.

محقق چانگ^{۳۱} به همراه همکارانش در همین سال مقاله ای تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی و عددی ویژگی های انتقال حرارت در لوله های جاذب حرارتی خورشیدی با شار حرارتی غیر یکنواخت محیط (۲۳) را در کشور چین ارائه دادند که در این مقاله مطالعات تجربی و عددی انتقال حرارت آشفته در لوله های جاذب حرارتی خورشیدی ارائه شده است. لوله جاذب جزء مهمی در یک سیستم قدرت حرارتی خورشیدی است. با این حال، عملکرد انتقال حرارت لوله از لوله های دیگر متفاوت است، تنها نیمی از سطح بیرونی لوله جاذب با شار حرارتی غیر یکنواخت گرم می شود و نیم دیگر عایق است. شار حرارتی غیر یکنواخت در یک لوله جاذب می تواند تا $21/5 \text{ MW}$ باشد و اختلاف تولید درجه حرارت های مختلف و تنش های حرارتی قابل توجه است. مطالعه حاضر با استفاده از دینامیک سیالات تجربی و محاسباتی عملکرد انتقال حرارت همرفتی آشفته در لوله جاذب خورشیدی در طیف وسیعی از عدد رینولدز $1/0 \times 10^4$ به $3/5 \times 10^4$ را بیان می کند. نتایج نشان می دهد که توزیع دما سیال و دیواره لوله در جهت محوری، شعاعی و به سمت محیط بسیار ناهموار است. درجه

³¹ Chang

حرارت دیوار لوله ی داخلی یک پارامتر مهم برای جلوگیری از تجزیه سیال انتقال حرارت است. معادله Dittus-Boelter قابل اجرا برای محاسبه انتقال حرارت در لوله مدور با شار حرارتی غیر یکنواخت است، اما برای محاسبه توزیع دما دیوار در این شرایط مناسب نیست. توزیع دما دیوار از یک لوله دایره ای با شار حرارتی غیر یکنواخت در هر زاویه دایره ای از سطح مقطع متفاوت است و این مطالعه همبستگی را بیان می کند.

مقاله ی دیگری از محقق دل کل^{۳۲} و همکارانش تحت عنوان مطالعه آزمایشگاهی و عددی یک سیستم cpvt سهموی خطی (۲۴) در کشور ایتالیا ارائه گردید که در این مقاله عملکرد الکتریکی و حرارتی سیستم فتوولتائیک حرارتی متمرکز کننده سهموی خطی (HCPVT) فعال در پادووا (شمال ایتالیا) به صورت تجربی بررسی شده است. سیستم در دو محور حرکت می کند و نرخ تمرکز هندسی در حدود ۱۳۰ می باشد. نمونه گیرنده در خط تمرکز نمایش داده شده یک اپتیک ثانویه ساخته شده از دو آینه تخت که برخی از تابش های منعکس شده را جمع آوری می کند قرار داده شده است و به منظور کمک به شار متمرکز کننده در دو خط محل اتصال سه گانه سلول های فتوولتائیک در زیر لایه سرامیکی متصل شده است. زیر لایه در تماس گرمایی با یک مبدل حرارتی آلومینیومی با کانال جریان آب برای خنک سلول های PV می باشد. در طول اجرای آزمون ، دمای آب ورودی حدود ۲۰ تا ۸۰ درجه سانتی گراد و عملکرد حرارتی از نرخ سرعت جریان و درجه حرارت اندازه گیری جرم در حالی که یک رئوستات و آنالایزر قدرت به ترمینال های برق برای ارزیابی برق تولیدی متصل است به دست می آید. تابش طبیعی مستقیم (DNI) توسط یک گرماسنج و نیرو سنج

³² Del Col

خورشیدی نصب شده بر روی یک ردیاب خورشیدی اندازه گیری می شود. نتایج تجربی برای یک مدل عددی گیرنده خورشیدی و طیف های مختلف استفاده می شود.

مقاله دیگری این بار در کشور ترکیه توسط محققین ایلماز^{۳۳} و سویلمز^{۳۴} تحت عنوان مدل سازی حرارتی _ ریاضی کلکتورهای سهموی خطی (۳۲) ارائه گردید که در این مقاله بوسیله ارتباط دیفرانسیل و جبر غیرخطی؛ پارامترهای سیستم واقعی، خورشیدی، نوری و مدل های حرارتی را توسعه داده و آنالیز حرارتی _ ریاضی کاملی را برای کلکتور های سهموی خطی انجام دادند و تمام نتایج را با آزمایشگاه ملی سان دیا مقایسه کرده و نتایج مطلوبی را بدست آوردند. در نهایت مدل فعلی با یک ماژول ptsc برای آنالیز ویژگی های تحت شرایط مختلف عملیاتی ادغام می شود.

در ادامه محقق ژانگ^{۳۵} و همکارانش مقاله ای تحت عنوان تجزیه و تحلیل انتقال حرارت تجربی و عددی از یک جاذب V-حفره برای کلکتور سهموی خطی خورشیدی (۳۳) را در کشور چین ارائه دادند که در این مقاله، یک جاذب V-حفره با باله های مستطیل شکل که می تواند در سیستم کلکتور سهموی خطی (PTC) استفاده شود، پیشنهاد شده و از لحاظ نظری و تجربی بررسی شده است. عملکرد نوری جاذب با استفاده از روش ردیابی مونت کارلو، (MCRT) مورد مطالعه قرار گرفت. یک مدل تعادل انرژی و یک مدل عددی سه بعدی با جزئیات بیشتر برای تجزیه و تحلیل ویژگی های جریان و انتقال حرارت ارائه شده است. علاوه بر این، تست آزمایشی برای اعتباربخشی به تحلیل نظری ساخته شد. یک توافق منطقی

³³ Yilmaz

³⁴ Söylemez

³⁵ Zhang

بین نتایج نظری و تجربی به دست آمد که امکان و قابلیت اطمینان مدل ها را ثابت می کند. نتایج نشان می دهد که نور خورشید می تواند بارها و بارها به شکل مثلث و تقریباً بدون هیچ گریزی منعکس شود. جاذب با باله های مستطیل شکل با درجه حرارت خروجی بالاتر سیال انتقال حرارت (HTF)، درجه حرارت پایین تر سطح گرمایش و از دست دادن حرارت کمتر دارای یک عملکرد انتقال حرارت بهتر نسبت به جاذب بدون پره خواهد بود. اثر توزیع شارحرارتی، نرخ دبی جرمی و تابش نرمال مستقیم بر عملکرد انتقال حرارت بیشتر مورد بحث قرار گرفت. علاوه بر این، تغییرات ضریب انتقال حرارت در امتداد جهت محوری Z با نرخ های مختلف جریان توده نیز محاسبه و برپایه نتایج عددی استوار بود.

محقق هوانگ^{۳۶} و همکارانش نیز مقاله ای تحت عنوان مقایسه عملکرد خورشیدی سیستم سهموی خطی با شیشه و فیلم بازتابنده (۲۶) را در کشور چین ارائه دادند که این مقاله فرایند انتقال خطای سطح شکست در مدل عملکرد نوری و همچنین خطای سطح منعکس کننده در سیستم خطی خورشیدی را شامل می شود. مدل نوری را از طریق مقایسه نتایج محاسبه شده با داده های تجربی را معتبر می دانیم. پارامترهای طراحی بهینه سازی شده بر اساس به حداکثر رساندن راندمان متوسط حرارت خالص سالانه می باشند. نتایج نشان می دهد که خطای نسبی ماکزیمم از ۲۰٪ راندمان نوری ممکن است تولید شود حتی اگر روند انتقال خطای سطح شکست نادیده گرفته شود. این نشان می دهد که خطای سطح شکست و همچنین خطای سطح منعکس کننده باید در پیش بینی عملکرد سیستم خطی خورشیدی به ویژه برای بازتابنده های شیشه ای در نظر گرفته شود. ما مدل را برای مقایسه عملکرد سیستم سهموی خطی خورشیدی

³⁶ Huang

با گیرنده لوله خلاء تحت دو نوع منعکس کننده، که یکی آینه ی شیشه ای و دیگری آینه ی فیلم است به کار می بریم. نتایج نشان می دهد که هر دو سیستم سهموی خطی با یک گیرنده لوله خلاء و سیستم ردیابی محور شمال به جنوب در روز زمستان نسبتا ناکارآمد هستند، و خروجی خالص انرژی در نقطه بحرانی زمستانی کمتر از یک ششم از فصل تابستان است. در صورتیکه طراحی و پارامترهای دو سیستم یکسان باشند راندمان حرارت خالص سیستم خطی خورشیدی با آینه ی فیلم ۵۰٪ کمتر از سیستم با آینه های شیشه ای در ظهر نقطه بحرانی زمستانی و عرض جغرافیایی ۴۰ می باشد. نتایج نشان داد که بازتابنده فیلم به خصوص در عرض جغرافیایی بالا، به بازتابنده های شیشه ای ترجیح داده می شود اگر آنها مشخصات نوری یکسان داشته باشند.

در سال ۹۴ آقای محمد زاده و همکارانش مقاله ای تحت عنوان الگوریتم بهینه سازی هیبرید برای آنالیز حرارتی در یک کلکتور سهموی خطی بر پایه ماده نانو سیال (۲۱) را در کشور ایران ارائه دادند که در این مقاله نظریه ای بر پایه ی توسعه بهینه سازی و شبیه سازی موثر و کارآمد کلکتورهای خورشیدی ارائه نمودند. در شبیه سازی از موارد زیر استفاده شد :

مخزن گیرنده سهموی خطی با تغییر دائمی گرمای غیر یکنواخت، جریان همرفت مخلوط بسیار توسعه یافته و سیال $oil-al_2o_3$ به عنوان ماده سیال پایه. بهینه سازی تحلیلی حرارتی در یک گیرنده سهموی خطی خورشیدی با استفاده از سیال نانو به صورت محاسبه ای غیر خطی و روندی فشرده دارد که به منظور غلبه بر این مشکلات، از روش بهینه سازی هیبرید که دربر دارنده GA و SQP می باشد، استفاده شده است. در این تحلیل که اعداد رینولدز و ناسلت و برنامه های مطلب، فلوئنت و گمبیت نیز در آن به کار برده شده اند، نشان داده شده است که

افزایش ارتقای انتقال دما رابطه مستقیم با نسبت تمرکز ذرات نانو و رابطه معکوس با دمای عملکرد سیستم دارد و این نشان دهنده ی آنست که طرح بهینه سازی هیبرید یک راه موثر در مورد آنالیز حرارتی کلکتورهای سهموی خطی می باشد .

در سال ۲۰۱۵ محققین دسای^{۳۷} و باندیوپادهای^{۳۸} مقاله ای تحت عنوان بهینه سازی تمرکز نیروگاه خورشیدی حرارتی بر پایه ی کلکتور های سهموی خطی (۲۵) رادر کشور هند ارائه دادند که در این مقاله به تجزیه و تحلیل اقتصادی نیروگاههای خورشیدی حرارتی بر پایه ی کلکتور های سهموی خطی بدون ذخیره ساز پرداخته اند و تاثیرات فشار ورودی توربین، دمای ورودی توربین، طراحی تابش اشعه ها، اندازه نیروگاه و تغییرات مختلف سیکل رانکین در بهره وری کلی و نیز هزینه انرژی را مورد بررسی قرار دادند. انرژی و هزینه مناسب فشارهای ورودی توربین برای یک نیروگاه یک مگاواتی با سیکل رانکین پایه به ترتیب $7/5 \text{ mpa}$ – $4/5$ و $7/5 \text{ mpa}$ – $3/5$ می باشد. در این بررسی نشان داده شد که با افزایش دمای ورودی توربین ، اندازه نیروگاه ها و مولفه های مختلف سیکل رانکین و کارایی کلی ، افزایش یافته و هزینه انرژی کاهش می یابد.

در همین سال محقق جیان یو^{۳۹} و همکارانش مقاله ای تحت عنوان اثر پوشش شیشه ای در توزیع شار حرارتی برای گیرنده لوله سیستم کلکتور سهموی خطی (۲۷) را نیز در کشور چین ارائه نمودند که در این مقاله یک گیرنده خورشیدی برای عمل تحت ، شار حرارتی نا همگون ، آب و هوا چرخه ای، و ابر تحت شرایط چرخه گذرا، که می تواند تنش های حرارتی بزرگ

³⁷ Desai

³⁸ Bandyopadhyay

³⁹ Jianyu

و حتی نارسایی گیرنده را ایجاد کند، طراحی شده است. در این مطالعه، اثرات یک پوشش شیشه ای (GC) بر توزیع شار حرارتی توسط روش ردیابی اشعه مونت کارلو (MCRT) تجزیه و تحلیل می شود. به منظور به حداقل رساندن گرادیان شار حرارتی، که به نوبه خود می تواند تنش حرارتی گیرنده لوله را کاهش دهد، یک GC با مقطع عبوری بیضی-دایره هدف این مطالعه قرارداد شده است. اثرات انکسار و پارامترهای مشخصه در توزیع شار حرارتی نیز بررسی شده است. نتایج عددی نشان می دهد که اندازه و توزیع شار حرارتی وقتی نور خورشید از طریق GC با سطح مقطع عبوری دایره ای متمرکز می شود فقط کمی تحت تاثیر قرار می گیرد، و اتخاذ GC با مقطع بیضی دایره ای برای لوله ی گیرنده می تواند به طور موثر گرادیان شارحرارتی را کاهش دهد و اوج کاهش شار حرارتی تا ۳۲/۳٪ است.

از مقالات دیگر ارائه شده در این سال می توان به مقاله ی مطالعه عددی افزایش انتقال حرارت در یک لوله گیرنده کلکتورسهموی خطی خورشیدی همراه با فرورفتگی، برآمدگی و باله های حلزونی (۲۹) که توسط محقق لی^{۴۰} و همکارانش در کشور چین ارائه شد اشاره داد که در این مقاله گیرنده لوله خلاء که جزء اصلی کلکتور سهموی خطی خورشیدی (PTCs) می باشد را مورد بررسی قرار داده اند. به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت از تابش خورشیدی به سیال انتقال حرارت (HTF)، یکی از روش های موثر بهبود انتقال حرارت همرفتی در داخل لوله ی داخلی می باشد. در این مطالعه، ما به انتقال حرارت از سمت HTF متمرکز می کنیم. یک شبیه سازی عددی جریان آشفته توسعه یافته کامل و انتقال حرارت در لوله ی داخلی با و بدون باله های حلزونی، برآمدگی و فرورفتگی بیان شده است. نتایج نشان

⁴⁰ li

می دهد که لوله گیرنده با فرورفتگی عملکرد بهتری در تقویت انتقال حرارت در مقایسه با برآمدگی یا باله حلزونی دارد. سپس، اثر اندازه ی هندسی و ترتیبات فرورفتگی بر عملکرد انتقال حرارت همرفتی، مورد مطالعه قرار می گیرد. طرح بهبود عملکرد تکنیک های افزایش انتقال حرارت نشان می دهد که فرورفتگی با عمق عمیق تر، زمین باریک تر و تعداد بیشتر به سمت محیط، برای بهبود عملکرد افزایش انتقال حرارت مفیدتر است در حالیکه ترتیبات متنوع هیچ تاثیر آشکار و مفیدی ندارد.

محقق وسیگی⁴¹ و همکارانش نیز در همین سال مقاله ای تحت عنوان بهینه سازی ترمودینامیک گیرنده کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانو سیال مصنوعی oil- Al_2O_3 (۳۰) رادر کشور آفریقای جنوبی ارائه دادند که در این مقاله به تحلیل ترمودینامیکی یک مخزن گیرنده سهموی خطی با استفاده از روش کاهش تولید آنتروپی و استفاده از یک نانو سیال مصنوعی به عنوان ماده سیال گرمایی در گردش، پرداخته اند. سیستم مخزن سهموی خطی با حاشیه ۸۰ درجه و نسبت تمرکز ۸۶ مورد استفاده قرار گرفت. دمای سیال نانو نیز بین ۶۰-۳۵۰ کلوین می باشد. مولفه های فیزیکی سیال نانو به دما بستگی دارد. عدد رینولدز از ۳۵۶۰ تا ۱۱۵۱۰۰۰ متغیر می باشد و این فاکتور بسته به دمای مدنظر و میزان تکه های ذرات نانو در ماده سیال پایه تغییر می کند و در مقیاس ۸-۰٪ مورد استفاده قرار گرفته است. میزان تولید آنتروپی محلی بر اساس جریان سیال و انتقال دما به میزان زیادی مشخص شده و از آن در تحلیل ترمودینامیکی استفاده شده است. این بررسی نشان می دهد که استفاده از ماده سیال نانو راندمان حرارتی دریافت کننده را تا ۶٪/۷ افزایش می دهد. عدد رینولدز مطلوب در هر دمای

⁴¹ Mwesigye

ورودی و در میزان ذرات لازم برای تولید آنتروپی ، حداقل می باشد که با افزایش میزان ذرات ، کاهش می یابد.

محقق سونگ^{۴۲} و همکارانش در سال ۲۰۱۶ مقاله ای تحت عنوان یک الگوریتم برای توزیع شار بیشتر جاذب تخت کلکتور سهموی خطی (۳۱) در کشور کره جنوبی ارائه دادند که در این مقاله بر اساس تقارن در سیستم متمرکزکننده ی سهموی خطی و تابش خورشیدی، یک الگوریتم بعدی نزولی با یک پیچیدگی محاسباتی $O(N^2)O(N2)$ را توسعه دادند تا جایی که از روش ردیابی پرتو مونته کارلو (MCRT) و روش المان محدود $O(N^4)O(N4)$ ، فرمول هایی که تابع انرژی $\psi(\theta)$ هستند را برای برش دیسک خورشیدی برای حل یکپارچه سازی توزیع شار ساخته شدند. نتایج عددی نشان داد که نتایج به دست آمده توسط الگوریتم ارائه شده توافق خوبی با نتایج تولید شده توسط MCRT داشته و در عین حال زمان CPU لازم الگوریتم در حدود چند ثانیه، بسیار کوتاه تر از MCRT می باشد. فرمول ها برای محاسبه تعدادی از ردیابی بازتاب اشعه در یک هموزنایزر و مختصات دقیق محل فرود اشعه ها در جاذب از نظر هندسی می باشد. اثر هموزنایزر برای چگالی شار یکسان است که به وضوح مشخص می شود.

محقق جیان یو^{۴۳} و همکارانش در همین سال مقاله ای تحت عنوان لوله راه راه گیرنده سهموی خطی برای بهبود انتقال حرارت و ویژگی های تغییر شکل حرارتی (۲۸) رادر کشور چین ارائه دادند که در این مقاله یک طراحی لوله های راه راه محدب بیرونی متقارن برای گیرنده سهموی خطی با هدف افزایش عملکرد انتقال حرارت و قابلیت اطمینان معرفی شده

⁴² song

⁴³ Jianyu

است. یک روش توسعه یافته برای جفت کردن متوالی نوری حرارتی ساختاری برای تجزیه و تحلیل عملکرد انتقال حرارت و تغییر شکل حرارتی پوشش شیشه ای و لوله های فلزی گیرنده سهموی خطی. روش کوپل توسعه داده شده با نتایج تجربی انجام شده در مرکز آزمون DISS در اسپانیا تایید شده است. نتایج عددی نشان داد که طراحی لوله های راه راه محدب بیرونی متقارن برای لوله های فلزی گیرنده سهموی خطی معرفی می شود که به طور موثر می تواند موجب افزایش انتقال حرارت و کاهش کرنش حرارتی شود. ضریب انتقال حرارت موثر می تواند تا ۸/۴٪ افزایش یابد و حداکثر کرنش حرارتی لوله های فلزی می تواند تا ۱۳/۱٪ کاهش یابد وقتی لوله های راه راه محدب بیرونی متقارن در شرایط $P/D \ 4/3$, $Re = 81728$ استفاده شود. علاوه بر این، همبستگی برگشت در جهت پیدا کردن ضریب انتقال حرارت موثر و عدد ناسلت موثر برای جریان سیال در گیرنده سهموی خطی رو به جلو قرار داده شده است.

فصل چهارم

روش تحقیق

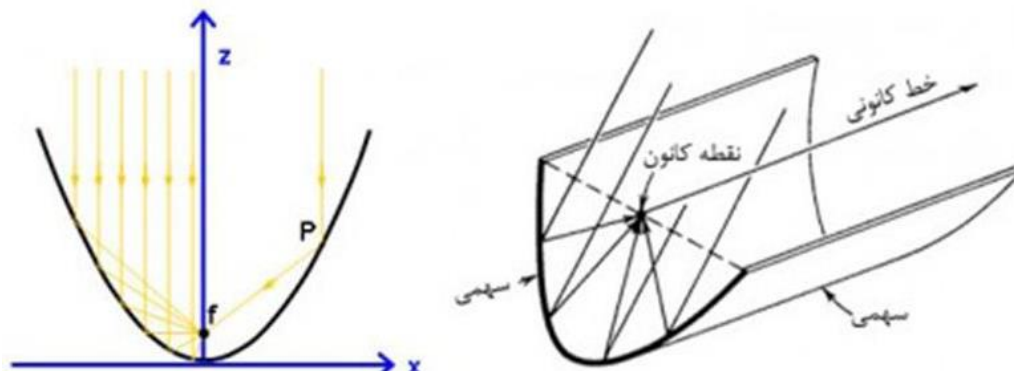
۴-۱ مقدمه

در این فصل، مدل سازی ریاضی کلکتور سهموی خطی و تحلیل ترمو-ریاضی آن انجام خواهد شد.

۴-۲ طراحی کلکتور خورشیدی

یک کلکتور سهموی خطی، یک آینه ی ساده ی سهمی شکل است که اشعه ی خورشید را از محور طبیعی اش به محور خودش منحرف می کند (مانند شکل (۴-۱)). مقطع آینه، یک منحنی سهمی شکل است و علت نام گذاری آن به خاطر همین موضوع است. شعاع انحنای این آینه ها حدود ۱ تا ۴ برابر فاصله کانونی است و نسبت تمرکز متداول، چیزی حدود ۸۰ می باشد ولی با استفاده از مقیاس های بزرگتر، این مقدار می تواند بیشتر نیز باشد. این آینه ی سهمی شکل در امتداد محوری کشیده شده است که در واقع، خط کانون سهمی است. در محل محور مذکور یک کلکتور نصب می گردد که لوله ی جاذب نام دارد. آینه ها و لوله ها روی یک سازه ی فولادی نصب می گردند تا محکم در جای خود قرار گیرند (به شکل (۴-۱) توجه شود). این

سازه هر روز خورشید را از شرق به غرب دنبال می‌کند تا این اطمینان حاصل شود که پرتوهای خورشید به دریافت کننده‌ی خطی می‌تابد. (۹)



شکل (۴-۱): تصویر تابش خورشید و انعکاس آن (۹)



شکل (۴-۲): کلکتور خورشیدی (۹)

مایع داخل لوله‌ی جاذب که به اختصار HTF نامیده شده است معمولاً روغن ترکیب- گرم می‌شود، بنابراین، انرژی ذخیره شده از طریق گردش این مایع به مبدل حرارتی تخلیه می‌شود. انرژی تخلیه شده به آب موجود در یک چرخه‌ی بخار (رنکین) معمولی داده می‌شود

که به این روند، تولید بخار غیرمستقیم گویند که دو مرحله‌ای است. یک روش دیگر نیز وجود دارد که روش تک مرحله‌ای است و در آن، مستقیماً از آب استفاده می‌شود. (۹)

۴-۳ قسمتهای اصلی کلکتورهای سهموی:

۴-۳-۱ آینه ها (پانل های بازتابش نور خورشید)

این پانل ها از جنس شیشه بوده و بصورت گرم شکل دهی می‌گردند. خاصیت آینه ای، با نقره کاری در سطح زیرین آن تأمین می‌گردد. جنس شیشه ها از نوع شیشه Float می باشد که با فرآیند صنعتی خاصی با استفاده از یک حوضچه ی قلع مذاب تهیه می‌گردند. میزان ناخالصی آهن موجود در این شیشه کمتر از ۰/۰۱۵ درصد می‌باشد. خلوص شیشه باعث بالا بردن ضریب بازتابش می‌گردد. ضریب تمرکز این آینه ها ۲۶ است. کیفیت ساختن آینه ها به گونه ای پیش بینی شده که ضریب انعکاس آینه ۹۴ درصد باشد و ۹۷ درصد انرژی منعکس شده را روی لوله گیرنده در کانون سهمی متمرکز نماید.

۴-۳-۲ گیرنده (لوله جاذب نور خورشید)

گیرنده خورشیدی شامل یک لوله فولادی به قطر ۴۲ میلیمتر است که روی آن از پوشش مخصوص کرم سیاه پوشیده شده است. در اطراف این لوله فولادی یک لوله شیشه‌ای به قطر ۷۰ میلیمتر قرار دارد که این لوله دارای ضریب عبور بالایی است. بین لوله شیشه‌ای و لوله فولادی خلا ایجاد می‌گردد تا اتلاف گرما از طریق جابجایی طبیعی به حداقل ممکن برسد. لوله شیشه‌ای در دو انتها بوسیله یک قطعه آکاردئونی و یک برش واسط به لوله فولادی متصل است.

وظیفه این قطعه آکاردئونی جبران اختلاف انبساط ناشی از تغییر دمای لوله فولادی و شیشه ای است. اتصال شیشه به قطعه آکاردئونی طوری است که خلاء ایجاد شده بین دو لوله هیچ گونه راهی برای نفوذ هوا ندارد. در نقاطی که لوله شیشه‌ای با پایه های فلزی به سازه کلکتور متصل است حلقه‌ای به ضخامت ۲۵ میلیمتر از جنس مواد نسوز وجود دارد که از خیز بیش از حد مجموعه گیرنده جلوگیری می نماید. پوشش مخصوص روی لوله از جنس کرم سیاه می باشد که در طیف نور قابلیت رؤیت دارای ضریب جذبی حدود ۹۴ درصد می‌باشد. این پوشش در دمای حدود ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دارای ضریب صدور حدود ۲۵ درصد می‌باشد.

۴-۳-۳ سیستم ردیابی خورشید

یک سیستم کنترل با سیکل بسته که دستورات خود را از یک سنسور خورشیدی می گیرد وظیفه ردیابی کلکتور را بعهدہ دارد. نور تمرکز یافته خورشید همواره بایستی روی لوله گیرنده تجمع داشته باشد تا بیشترین راندمان برای سیستم حاصل گردد. دستورات از سنسور خورشیدی که دارای یک عدسی محدب برای تمرکز نور خورشید در ناحیه‌ای بین دو فتورزیستوست، به کامپیوتر ارسال می‌گردد هرگاه نور متمرکز شده از بین دو فتورزیستور خارج گردد دستوری مبنی بر حرکت کلکتور ازطرف کامپیوتر صادر می گردد و فرمان‌های لازم به مدار هیدرولیکی ارسال می گردد در نتیجه فرمان، موتور الکتریکی AC روشن گردیده است و پمپ هیدرولیکی به کار می افتد. روغن پرفشار پس از ۴ ثانیه از روشن شدن موتور الکتریکی به کمک دستوری که ازطریق کامپیوتر برای باز شدن شیر سلونوئیدی هیدرولیک صادر می گردد، به جکهای هیدرولیکی هدایت می گردند. وظیفه این جک ها چرخش کلکتور

و سمت دهی مناسب آن در جهت خورشید می‌باشد. بطور کلی سیستم‌های ردیابی خورشید وظیفه دارند برای بهره‌گیری از حداکثر راندمان، کلکتورها را در وضعیتی قرار دهند.

که نور خورشید همواره به صورت عمودی بر سطح آنها بتابد و برای دستیابی به این منظور دو نوع سیستم ردیابی خورشید وجود دارد:

- سیستم‌های ردیاب تک محوره
- سیستم‌های ردیاب دو محوری

در کلکتورها با ردیاب دو محوره، همواره نور خورشید بر سطح کلکتور عمود بوده و بنابراین بنظر می‌رسد که از حداکثر انرژی خورشیدی استفاده می‌شود. این در حالی است که تحقیقات و تجربیات بدست آمده از نیروگاه ساخته شده در اسپانیان نشان می‌دهد که علاوه بر نیاز به سطح زمین بیشتر برای کلکتورهای دو محوره، ساعات خرابی و تلفات حرارتی از لوله‌های رابطین کلکتورها نسبت به کلکتورهای یک محوره زیادتر بوده و نهایتاً مقدار حرارت جمع آوری شده توسط کلکتورهای دو محوره کمتر از کلکتورهای یک محوره می‌باشد. کلکتورهای خورشیدی با ردیاب یک محوره را می‌توان در راستای شمالی جنوبی یا شرقی غربی نصب نمود. (۹)

۴-۴ مفهوم انرژی و راندمان انرژی کلکتور

انرژی به عنوان یکی از مفاهیم مهم قانون دوم ترمودینامیک عبارت از حداکثر کار مفیدی است که به لحاظ تئوری از یک جریان ماده و یا انرژی قابل حصول می‌باشد. از آنجائیکه تحلیل انرژی کلکتور را نمی‌توان بدون مدلسازی از عملکرد حرارتی و اپتیکی آن

انجام داد و این دو مسئله کاملاً با یکدیگر مرتبط می‌باشند، لذا ابتدا به تحلیل و مدلسازی حرارتی و اپتیکی کلکتور پرداخته شده است. سپس روابطی برای مؤلفه‌های مختلف معادله تعادل انرژی کلکتور بدست آورده شده است که توسط این روابط، معادله راندمان انرژی کلکتور بر حسب یک سری از پارامترها بدست آمده است. (۱۶)

۴-۵ تحلیل حرارتی

جهت اختصار از آوردن اثبات روابط حاکم بر عملکرد حرارتی کلکتور خودداری می‌شود. در این روابط اغلب پارامترهایی که می‌توانند تغییر کنند به عنوان متغیر فرض می‌شوند.

با نوشتن رابطه تعادل انرژی بر حسب دماهای ورودی و خروجی می‌توان حرارت مفید جذب شده Q_u را بدست آورد:

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (۱-۴)$$

که در رابطه فوق T_{in} و T_{out} به ترتیب دمای ورود و خروج سیال از کلکتور و C_p و \dot{m} به ترتیب ظرفیت حرارتی و دبی جرمی سیال می‌باشند. از طرف دیگر با در نظر گرفتن اتلاف حرارتی کلکتور به محیط مجدداً می‌توان رابطه انرژی را به صورت زیر بدست آورد:

$$Q_u = A_p F_R [S - U_l (T_{in} - T_a)] \quad (۲-۴)$$

در رابطه فوق T_a دمای محیط است و F_R ضریب برداشت حرارت^{۴۴} می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

^{۴۴}. Heat Removal Factor

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{U_l A_p} [1 - \exp(-F' U_l A_p / \dot{m} C_p)] \quad (3-4)$$

که در این رابطه، F' ضریب راندمان کلکتور^{۴۵} می‌باشد و بصورت زیر بدست می‌آید:

$$F' = 1 / \left(W U_l \left[\frac{1}{U_l [(W - D_o)\phi + D_o]} + \frac{\delta_a}{k_a D_o} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right] \right) \quad (4-4)$$

$$\phi = \tanh \left[\frac{(U_l / k_p \delta_p)^{1/2} (W - D_o) / 2}{(U_l / k_p \delta_p)^{1/2} (W - D_o) / 2} \right] \quad (5-4)$$

ϕ میزان تأثیر صفحه^{۴۶} است. تعادل انرژی در حالت دائم برای صفحه جذب‌کننده رابطه زیر را می‌دهد:

$$Q_u = A_p S - U_l A_p (T_p - T_a) \quad (6-4)$$

در روابط اخیر W فاصله مجاری چسبیده به صفحه جذب‌کننده، D_o و D_i به ترتیب قطر خارجی و قطر داخلی مجاری، h_f ضریب انتقال حرارت جابجایی درون مجاری، δ_a و δ_p به ترتیب ضخامت متوسط صفحه جذب‌کننده و چسب متصل‌کننده مجاری به صفحه جذب‌کننده، k_a و k_p به ترتیب ضریب هدایت گرمایی صفحه جذب‌کننده و چسب متصل‌کننده مجاری به صفحه جذب‌کننده، T_p دمای متوسط صفحه جذب‌کننده و A_p مساحت سطح کلکتور می‌باشند. U_l ضریب افت حرارت کلی می‌باشد که در تمامی مطالعات انجام شده در قبل، این ضریب را ثابت یا تأثیر آن را اندک انگاشته‌اند در صورتیکه ثابت نمی‌باشد. این پارامتر بر حسب $W/m^2.K$ می‌باشد و شامل سه جمله ضریب افت حرارتی از بالا U_t ، پایین U_b و سطوح جانبی کلکتور U_e می‌باشد.

⁴⁵. Collector Efficiency Factor

⁴⁶. Plate Effectiveness

$$U_l = U_t + U_b + U_e \quad (۷-۴)$$

$$U_b = k_i / \delta_b \quad (۸-۴)$$

که k_i ضریب هدایت گرمایی عایق و δ_b ضخامت عایق پایین کلکتور می‌باشند.

$$U_e = (L_1 + L_2) L_3 k_i / L_1 L_2 \delta_e \quad (۹-۴)$$

$$L_3 = \delta_1 + \delta_2 + \delta_b \quad (۱۰-۴)$$

که در این روابط $L_1, L_2, L_3, \delta_1, \delta_2$ و δ_e به ترتیب طول، عرض، ارتفاع، فاصله پوشش اول، فاصله پوشش دوم و ضخامت عایق جانبی کلکتور می‌باشند. با فرض اینکه صفحه جذب‌کننده و پوشش‌های شیشه‌ای یک سیستم صفحات موازی بینهایت را تشکیل دهند، جریان حرارت یک بعدی و دائم باشد، افت دما در سراسر ضخامت پوشش‌ها و همچنین اثر متقابل تابش خورشیدی ورودی جذب شده توسط پوشش‌ها و اتلاف خروجی صرف نظر شوند و برای بازتابش خارج شونده که دارای طول موج بلند است، پوشش‌های شیشه‌ای همانند جسم سیاه باشند، دستگاه سه معادله، سه مجهول غیرخطی زیر برای بدست آوردن ضریب افت حرارتی از بالا، بدست می‌آید:

$$Q_t / A_p = h_{p-c1} (T_p - T_{c1}) + \frac{\sigma (T_p^4 - T_{c1}^4)}{(1/\varepsilon_p + 1/\varepsilon_c - 1)} \quad (۱۱-۴)$$

$$Q_t / A_p = h_{c1-c2} (T_{c1} - T_{c2}) + \frac{\sigma (T_{c1}^4 - T_{c2}^4)}{(1/\varepsilon_c + 1/\varepsilon_c - 1)} \quad (۱۲-۴)$$

$$Q_t / A_p = h_w (T_{c2} - T_a) + \sigma \varepsilon_c (T_{c2}^4 - T_{sky}^4) \quad (۱۳-۴)$$

$$U_t = \frac{Q_t / A_p}{(T_p - T_a)} \quad (۱۴-۴)$$

$$T_{sky} = T_a - 6 \quad (۱۵-۴)$$

در این معادلات σ ، T_{sky} ، T_{c2} ، T_{c1} ، h_w ، h_{c1-c2} ، h_{p-c1} ، Q_i/A_p و ε_p و ε_c به ترتیب نرخ اتلاف حرارت از بالا بر واحد سطح کلکتور، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین صفحه جذب‌کننده و پوشش اول، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش اول و پوشش دوم، ضریب انتقال حرارت جابجایی بین پوشش دوم و هوای اطراف، دمای پوشش شیشه‌ای اول و دوم، دمای مؤثر آسمان، ثابت استفان-بولتزمن^{۴۷}، ضریب صدور صفحه جذب‌کننده برای تابش طول موج بلند و ضریب صدور پوشش‌های شیشه‌ای برای تابش طول موج بلند می‌باشند. دستگاه سه معادله، سه مجهول غیرخطی را برای بدست آوردن پارامترهای نامشخص T_{c2} و T_{c1} ، Q_i/A_p پس از جایگذاری مقادیر h_w ، h_{c1-c2} ، h_{p-c1} و سایر پارامترها حل می‌کنند. شایان ذکر است که ضرایب انتقال حرارت اخیر از یکسری روابط تجربی محاسبه می‌شوند و همچنین برای ضریب افت حرارت از بالای کلکتور علاوه بر مدلسازی انتقال حرارت، روابط تجربی نیز پیشنهاد شده است. روابط اخیر نشان می‌دهند که در نهایت ضریب افت حرارت کلی U_1 ، تابعی از پارامترهایی مثل دمای پوشش‌های شیشه‌ای، خواص هوا در بیرون و داخل پوشش‌های شیشه‌ای، خواص و ابعاد سطوح جانبی و سطح انتهایی، دمای محیط، دمای آسمان، دمای متوسط صفحه جذب‌کننده، سرعت وزش باد و خواص تابشی سطوح می‌باشد. در ضمن مساحت سطح کلکتور، حاصلضرب طول در عرض کلکتور است و قطر خارجی مجاری ۱۰ درصد بیشتر از قطر داخلی در نظر گرفته شده است.

$$A_p = L_1 L_2 \quad (۱۶-۴)$$

$$D_o = D_i + 0.1 D_i \quad (۱۷-۴)$$

⁴⁷. Stefan-Boltzmann Constant

راندمان حرارتی کلکتور توسط معادله زیر داده می شود: (۲۹)

$$\eta_{Th} = Q_u / A_p I_T \quad (۱۸-۴)$$

۴-۶ تحلیل اپتیکی

تمام تابش رسیده به کلکتور توسط صفحه جذب کننده جذب نمی گردد. در رابطه های

فوق پارامتر S مقدار شار تابشی جذب شده توسط صفحه جذب کننده به صورت زیر است:

$$S = (\tau\alpha) I_T \quad (۱۹-۴)$$

I_T شدت تابش خورشید است و $(\tau\alpha)$ در کلکتورهای صفحه تخت همان راندمان

اپتیکی η_o^{48} است. (۶)

۴-۷ تحلیل انرژی

برای تعیین قسمتی از انرژی حرارتی که می تواند به کار مؤثر تحت شرایط آرمانی تبدیل

شود، نیاز به تحلیل انرژی سیستم می باشد. بدست آوردن راندمان انرژی یا راندمان قانون

دوم، کیفیت انرژی را برای ما مشخص می سازد. در حالت کلی انرژی به دو طریق با سیستم

کلکتور مبادله می شود. یکی از طریق جریان سیال عامل و دیگری از طریق انتقال حرارت.

انرژی همراه هر جریان سیال تراکم ناپذیر که در دمای T و دارای اختلاف فشار ΔP با

محیط باشد، با رابطه زیر مشخص می شود:

$$\dot{E} = \dot{m} C_p (T - T_a - T_a \ln(T/T_a)) + \dot{m} \Delta P / \rho \quad (۲۰-۴)$$

⁴⁸. Optical Efficiency

و اگزرژی مبادله شده از طریق مقدار انتقال حرارت \dot{Q} بین دمای گرم T_h و سرد T_c ، توسط رابطه زیر بدست می آید:

$$\dot{E} = \int_{T_c}^{T_h} \dot{Q} \frac{T_a}{T^2} dT \quad (۲۱-۴)$$

رابطه تعادل اگزرژی در حالت کلی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{E}_i + \dot{E}_s + \dot{E}_o + \dot{E}_l + \dot{E}_d = 0 \quad (۲۲-۴)$$

که \dot{E}_i و \dot{E}_s و \dot{E}_o و \dot{E}_l و \dot{E}_d به ترتیب اگزرژی ورودی، ذخیره شده، خروجی، نشتی و تخریب شده می باشند

اگزرژی ورودی برای کلکتور شامل دو قسمت می باشد. اگزرژی وارد شده همراه جریان:

$$\dot{m}C_p(T_{in} - T_a - T_a \ln(T_{in}/T_a)) + \dot{m}\Delta P_{in}/\rho \quad (۲۳-۴)$$

و اگزرژی تابش جذب شده توسط کلکتور که عموماً در کارهای قبلی از رابطه زیر طبق نظریه پتلا برای محاسبه آن استفاده شده است، به راحتی می توان نشان داد که این رابطه برای چنین سیستم هایی قانون دوم ترمودینامیک را نقض می کند.

$$\eta_o I_T A_p \left[1 - \frac{4}{3} T_a/T_s + \frac{1}{3} (T_a/T_s)^4 \right] \quad (۲۴-۴)$$

در رابطه قبل عبارت داخل براکت راندمان پتلا η_P می باشد. رابطه صحیح با فرض اینکه خورشید یک منبع حرارتی بینهایت است به صورت زیر می باشد:

$$\eta_o I_T A_p (1 - (T_a/T_s)) \quad (۲۵-۴)$$

که مقدار راندمان اپتیکی بصورت $\eta_o = S/I_T$ است. حاصل جمع دو رابطه (۲۳) و (۲۵) کل اگزرژی ورودی به کلکتور را تشکیل می دهد.

اگرژی ذخیره شده در حالت شرایط پایدار برابر صفر می باشد.

اگرژی خروجی فقط شامل اگرژی جریان خروجی است:

$$-\dot{m}C_p(T_{out}-T_a-T_a\ln(T_{out}/T_a))-\dot{m}\Delta P_{out}/\rho \quad (26-4)$$

در روابط (23) و (26)، ΔP_{in} و ΔP_{out} اختلاف فشار سیال عامل با محیط در ورود و

خروج از کلکتور می باشند.

اگرژی نشتی شامل نشت حرارت از صفحه جذب کننده به محیط می باشد:

$$-U_l A_p (T_p - T_a)(1 - T_a/T_p) \quad (27-4)$$

اگرژی تخریب شده به سه قسمت عمده تقسیم می گردد. اگرژی تخریب شده به سبب

افت فشار در داخل لوله:

$$-\frac{\dot{m}\Delta P}{\rho} \frac{T_a \ln(T_{out}/T_a)}{T_{out}-T_{in}} \quad (28-4)$$

اگرژی تخریب شده بدلیل اختلاف دمای خورشید با سطح صفحه جذب کننده:

$$-\eta_o I_T A_p T_a \left(\left(1/T_p \right) - \left(1/T_s \right) \right) \quad (29-4)$$

دمای مؤثر خورشید می باشد که مقدار آن ۰/۷۵ دمای جسم سیاه خورشید ($T_s = 4350 K$)

است و اگرژی تخریب شده به سبب اختلاف دمای صفحه جذب کننده با سیال

عامل :

$$-\dot{m}C_p T_a \left(\ln(T_{out}/T_{in}) - (T_{out}-T_{in})/T_p \right) \quad (30-4)$$

با جایگزینی روابط (23) تا (30) در معادله تعادل اگرژی (22) و مرتب سازی بدست می آید:

$$\left(\dot{m}C_p(T_{out}-T_{in}) - \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho} \right) \left(1 - \frac{T_a \ln(T_{out}/T_{in})}{T_{out}-T_{in}} \right) = I_T A_p (1-T_a/T_s) - \{ (1-\eta_o) I_T A_p (1-T_a/T_s) +$$

$$+ \eta_o I_T A_p T_a (1/T_p - 1/T_s) + U_l A_p (T_p - T_a) (1-T_a/T_p) + \dot{m}C_p T_a (\ln(T_{out}/T_{in}) - (T_{out}-T_{in})/T_p) \}$$

(۳۱-۴)

با توجه به تعریف راندمان اگزرژی برای کلکتور که عبارتست از افزایش اگزرژی جریان سیال به اگزرژی تابش اولیه توسط منبع تابش و رابطه (۴۵) معادله راندمان اگزرژی کلکتور بدست می‌آید:

$$\eta_E = \frac{\dot{m} \left[C_p (T_{out} - T_{in} - T_a \ln T_{out}/T_{in}) - \frac{\Delta P}{\rho} \right]}{I_T A_p (1 - T_a/T_s)} = 1 - \left\{ (1 - \eta_o) + \frac{\eta_o T_a}{(1 - T_a/T_s)} (1/T_p - 1/T_s) + \right.$$

$$+ \frac{\dot{m}\Delta P}{\rho I_T A_p (1 - T_a/T_s)} \frac{T_a \ln(T_{out}/T_a)}{T_{out} - T_{in}} + \frac{\dot{m}C_p T_a (\ln(T_{out}/T_{in}) - (T_{out} - T_{in})/T_p)}{I_T A_p (1 - T_a/T_s)} +$$

$$\left. + \frac{U_l}{I_T (1 - T_a/T_s)} (T_p - T_a) (1 - T_a/T_p) \right\}$$

(۳۲-۴)

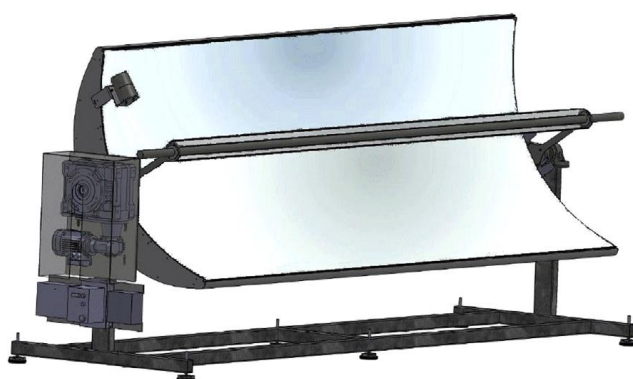
جملات داخل کروشه سمت راست رابطه (۳۲)، افت‌های اگزرژی را نشان می‌دهند. جمله اول افت اگزرژی به سبب تلفات اپتیکی می‌باشد. جمله دوم افت اگزرژی به سبب اختلاف دمای خورشید و صفحه جذب‌کننده می‌باشد. جمله سوم اگزرژی تخریب شده به سبب افت فشار سیال داخل لوله می‌باشد. جمله چهارم اگزرژی تخریب شده به سبب اختلاف دمای سطح جذب‌کننده و دمای سیال عامل می‌باشد و جمله پنجم اگزرژی تخریب شده به سبب تلفات حرارتی از صفحه جذب‌کننده می‌باشد. ΔP ، افت فشار درون مجاری با توجه به دبی

جرمی، قطر داخلی مجرا، خواص سیال و ضریب اصطکاک و دیاگرام مودی^{۴۹} بدست می‌آید. (۱۱)

۴-۸ مدل ترمو-ریاضی کلکتور خورشیدی سهموی خطی

۴-۸-۱ توضیح سیستم

یک کلکتور سهموی خطی خورشیدی با استفاده از یک مکانیزم رهگیری کار می‌کند که جهت کلکتور را همواره به سمت خورشید می‌چرخاند. اشعه‌های خورشید به یک گیرنده لوله‌ای برخورد کرده که انرژی حرارتی ناشی از این برخورد جذب و به سیال در حال گردش در لوله‌های جاذب که در راستای خط کانونی قرار گرفته‌اند، انتقال داده می‌شود. لوله جاذب، معمولاً با یک پوشش شیشه‌ای محصور شده تا اتلاف حرارتی نیز کاهش یابد. شماتیک کلکتور ذکر شده برای تحلیل ترموریاضی نشان داده شده است. همچنین در جدول زیر، مشخصات این کلکتور ذکر شده است. (۹)



شکل (۴-۳): شماتیک کلکتور سهموی خطی با سامانه رهگیر خورشیدی (۹)

⁴⁹. Moody Diagram

جدول (۴-۱): مشخصات ماژول کلکتور سهموی خطی (۹)

تک محوره	حالت در حال حرکت
3000 mm	طول سهموی
1140 mm	عرض سهموی
358 mm	فاصله کانونی
32 mm	قطر داخلی جاذب
35 mm	قطر خارجی جاذب
54 mm	قطر داخلی پوشش
60 mm	قطر خارجی پوشش
0.85	ضریب نشر آینه
0.95	ضریب جذب جاذب
0.15	ضریب نشر جاذب
0.88	ضریب نشر پوشش
فولاد ضد زنگ پوشش داده شده	مواد تشکیل دهنده جاذب
شیشه DURAN	مواد تشکیل دهنده پوشش
MIRO-SUN	مواد تشکیل دهنده ی آینه
پر شده با هوای محیط	شرایط خلا

۴-۸-۲ مدل تابش خورشیدی بر روی سیستم رهگیر

با توجه به این که موقعیت خورشید نسبت به زمین به طور لحظه‌ای تغییر می‌کند، زاویه نصب سطح کلکتور براساس موقعیت خورشید محاسبه می‌شود. بنابراین، روابط هندسی بین یک صفحه متحرک نسبت به زمین و خورشید در طی محاسبات تعریف می‌گردد تا انرژی جذب شده توسط کلکتور محاسبه گردد. این محاسبات برای منطقه گازیان تپه در ترکیه انجام شده است که دارای طول جغرافیایی ۳۷/۰۲ شمالی و عرض جغرافیایی ۳۷/۱۹ شرقی می‌باشد. علاوه بر این، تحلیل‌های خورشیدی با در نظر گرفتن این فرض انجام شده است که جهت کلکتور در راستای محور شمال، جنوب تنظیم شده است. زیرا راستای شمالی - جنوب موجب می‌شود که کلکتور در فصل تابستان بیشترین انرژی را جذب نماید.

زمان خورشیدی در همه روابط زاویه - خورشید استفاده شده است اما این زمان مطابق با زمان ساعتی نمی‌باشد. بنابراین، لازم است تا زمان استاندارد به زمان خورشیدی تبدیل

شود. (۱۸)

زاویه زنیت θ_z ، به صورت زاویه باریکه نور خورشیدی با صفحه افقی تعریف می‌گردد.

زاویه زنیت برای مازول کلکتور سهموی قرار گرفته بر روی صفحه افقی برابر است با:

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (33-4)$$

مقدار تابش خورشیدی قرار گرفته روی یک صفحه متحرک به شدت به زاویه نصب

وابسته است. مهمترین وظیفه سیستم رهگیری خورشیدی جهت دادن به کلکتور برای تنظیم

جهت آن به سمت خورشید است. این امر زاویه بین شعاع باریکه نور و سیستم رهگیر را

مینیمم و مقدار انرژی دریافتی را ماکزیمم می‌نماید. انتخاب جهت کلکتور با جهت‌های محلی

بسیار مهم است تا اتلافات کسینوسی را در طی فرایند رهگیری کاهش دهد. زاویه نصب برای

صفحه چرخشی حول یک محور شمال- جنوب افقی با یک محور رهگیری تنها به شکل زیر

محاسبه می‌شود. (۱۸)

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sqrt{\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \sin^2 \omega}) \quad (34-4)$$

۴-۸-۳ آنالیز اپتیکی

تحلیل اپتیکی برای تخمین بازده اپتیکی که به صورت نسبت انرژی جذب شده توسط

گیرنده به انرژی رهگیری شده تعریف می‌شود، مورد نیاز خواهد بود. بازده اپتیکی به طور

اساسی از ویژگی‌های اپتیکی ماده سازنده، نحوه ساخت و جهت کلکتور تاثیر می‌پذیرد. علاوه

بر این، اتلافات کسینوسی در طی فرایند رهگیری رخ می‌دهد. زیرا مسیر رهگیری شده با مسیر

طی شده توسط کلکتور همیشه منطبق نخواهد بود. همه این عوامل بر بازده اپتیکی تاثیر

می‌گذارد، به گونه‌ای که در رابطه زیر مشخص شده است.

$$\eta_0(\theta) = \rho \tau \alpha \gamma k \varepsilon' \cos \theta \quad (35-3)$$

بازده اپتیکی کلکتور به خواص اپتیکی و نسبی صفحه دریافت کننده و بازتاب کننده بستگی دارد. (۶)

۴-۸-۴ آنالیز حرارتی دستگاه گیرنده

آنالیز حرارتی یک کلکتور خورشیدی برای تعریف بازده حرارتی بسیار مهم بوده و ضریب حرارتی مفیدی خواهد بود. یک تحلیل حرارتی با جزئیات در این بخش ارائه شده است. ویژگی‌های اصلی مورد بررسی عبارتند از:

- کلکتور سهموی در شرایط پایا کار می‌کند، به عبارت دیگر هیچ تغییری در خواص ترمودینامیکی با زمان به وجود نخواهد آمد زیرا، دمای سطح به صورت متوسط دمای ورودی و خروجی سیستم گیرنده و ثابت در نظر گرفته شده است.
- انتقال حرارت یک بعدی است. زیرا تغییرات دمایی محسوسی در راستای شعاعی وجود ندارد. تابش خورشیدی در راستای شعاعی به گیرنده می‌رسد و سطح مقطع گیرنده نسبتاً از طول آن کوتاه‌تر می‌باشد. بنابراین، تغییر دمای در راستای محوری می‌تواند نادیده گرفته شود. (۲۹)

۴-۸-۵ تحلیل اتلاف حرارتی

تحلیل حرارتی، تخمینی از اتلاف حرارتی از گیرنده و ضریب حرارتی مفید انتقال یافته به سیال کاری را ارائه می‌دهد. شرایط حرارتی سطح گیرنده با شار حرارتی ثابت در روی کلکتور در نظر گرفته شده است. دمای متوسط سیالی که فرایند انتقال حرارت را انجام می‌دهد،

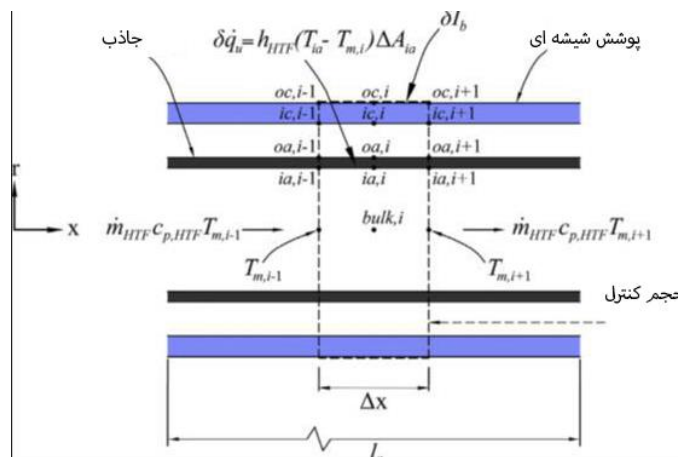
T_m به صورت خطی در جهت سیال در حالت شار حرارتی ثابت زیاد می‌شود، زیرا سطح در راستای جهت سیال زیاد می‌گردد.

در منطقه‌ای از سیال که کاملاً توسعه یافته است، دمای سطح داخلی جاذب، به صورت خطی افزایش می‌یابد. اگر تعادل انرژی به حجم کنترل نشان داده شده در شکل زیر اعمال گردد، فرم عمومی رابطه ۳-۳۶، برای حالت پایا، می‌تواند به وسیله گسسته‌سازی گیرنده با تقسیم بر عدد N به دست آید. شار حرارتی شعاعی به صورت یکنواخت و عمود بر سطح در هر المان در نظر گرفته شده است. همچنین دمای مرکزی هر المان به صورت متوسط دمای

گوشه چپ و راست آن المان در نظر گرفته می‌شود یعنی $T_{m,i} = \frac{T_{m,i-1} + T_{m,i+1}}{2}$ می‌باشد.

دمای طولی به صورت خطی و ضریب هدایت جابجایی نیز ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین، ترم‌های مربوط به سمت چپ و راست معادله حذف شده و فقط سیال انتقال حرارتی

انرژی را در جهت طولی انتقال می‌دهد. (۲۷)



شکل (۴-۴) آنالیز انتقال حرارت برای یک حجم کنترل در گیرنده (۲۷)

$$\sum_{i=1}^N \delta \dot{q}_{u,i} p_{ia} \Delta x = \dot{m}_{HTF} \left[\left(h + \frac{u_m^2}{2} \right)_{i+1} - \left(h + \frac{u_m^2}{2} \right)_{i-1} \right] \quad (36-4)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N$$

که در آن، $h \cong c_p T$ برای سیال تراکم ناپذیر است. $\delta \dot{q}_u$ انرژی تفاضلی مفید است که توسط سطح داخلی جاذب به دست می‌آید ($\Delta A_{ia} = p_{ia} \Delta x$) و محیط داخلی لوله جاذب است.

تحلیل حرارتی، براساس روش مقاومت حرارتی در شکل نشان داده شده است تا دماهای گره‌ها به دست آید. اتلاف حرارتی مجموع از لوله گیرنده ناشی از اختلاف دمای ظاهر شده در جهت شعاعی است. به منظور تعریف دمای روی گیرنده، معادلات انرژی حاکم بین نقاط گرهی شبکه مقاومتی نوشته شده است. این روابط تعادل انرژی با سه معادله به شکل زیر بیان می‌شود: (27)

$$\dot{q}_{conv,HTF} = \dot{q}_{cond,a} \quad (37-4)$$

$$\dot{q}_{cond,a} = \dot{q}_{conv,an} + \dot{q}_{rad,an} + \dot{q}_{cond,r} \quad (38-4)$$

$$\dot{q}_{cond,c} = \dot{q}_{conc,air} + \dot{q}_{rad,r-s} + \dot{q}_{conv,r} + \dot{q}_{rad,r} \quad (39-4)$$

۴-۸-۶ آنالیز انتقال حرارت در سیال کاری

جریان در داخل لوله جاذب با هدایت حرارت اجباری به دلیل پمپاژ سیال تعریف

می‌شود. رژیم سیال براساس عدد رینولدز مشخص می‌شود که نشان‌دهنده آرام یا مغشوش بودن جریان سیال می‌باشد. جریان سیال در لوله زمانی آرام محسوب می‌شود که مقدار عدد رینولدز در حالت بحرانی زیر ۲۳۰۰ می‌باشد. دبی جرم سیال HTF با استفاده از رابطه زیر تحت شرایط پایا محاسبه می‌گردد. خواص حرارت متداول سیال HTF که در این تحلیل ذکر شده است، در جدول زیر ارائه شده است. (۲۱)

$$\dot{m}_{HTF} = \rho_{HTF} A_d u_{m,HTF} \quad (4-40)$$

جدول (۴-۲) مشخصات فنی سیال ۳۲۰ Renolin Therm (۲۱)

(-) عدد پراتل	ویسکوزیته سینماتیک (m ² /s × 10 ⁻⁶)	رسانایی گرمایی (W/m °C)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg °C)	دانسیته (kg/m ³)	درجه حرارت (°C)
6543	535	0.134	1864	879	0
385	28.6	0.131	2078	848	50
96	6.5	0.127	2293	816	100
26	1.5	0.120	2721	750	200
13.4	0.7	0.113	3151	685	300
11.8	0.6	0.111	3236	672	320

برای جریان آرام کاملاً توسعه یافته در لوله تحت شارژ حرارتی سطحی ثابت، عدد ناسلت نیز ثابت و برابر مقدار زیر می‌باشد.

$$Nu_{HTF} = 4.364 \quad (4-41)$$

زمانی که عدد رینولدز بالاتر از ۱۰۰۰۰ باشد، جریان معمولاً مغشوش و کاملاً توسعه یافته

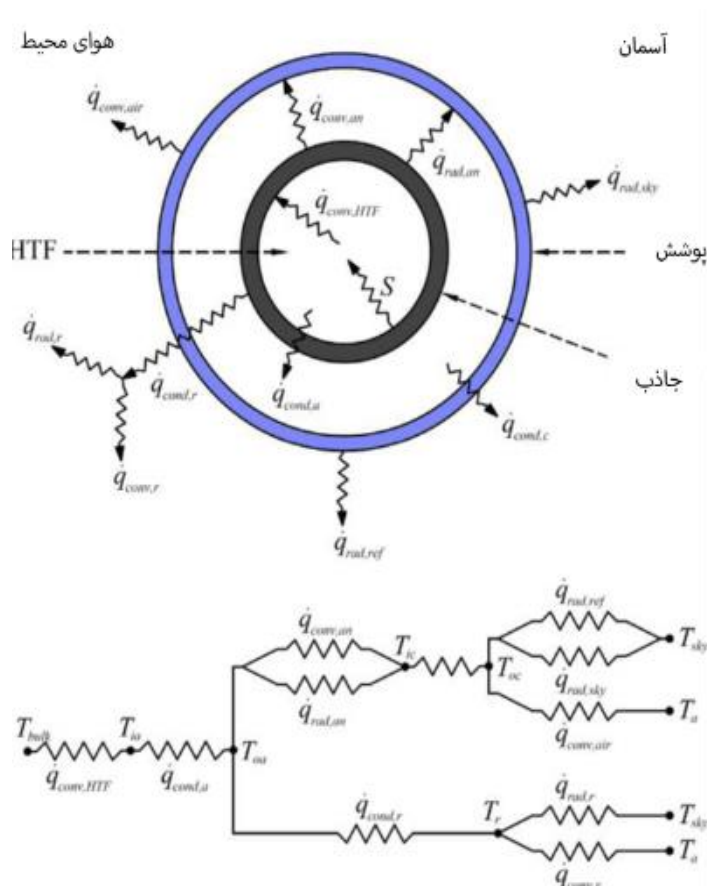
است. در این حالت، رابطه ناسلت به صورت زیر است.

$$Nu_{HTF} = \frac{\sqrt{f/8} Re_{HTF} Pr_{HTF}}{12.48 Pr_{HTF}^{2/3} - 7.853 Pr_{HTF}^{1/3} + 3.613 \ln(Pr_{HTF}) + 5.8 + C} \quad 0.5 \leq Pr \leq 2000, 10^4 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (4-42)$$

که در آن، $C = 2.78 \ln(\sqrt{f} / 8 \text{Re}_{HTF} / 90)$ و f ضریب اصطکاک است که برای

$$f = (0.79 \ln \text{Re}_{HTF} - 1.64)^{-2}$$

لوله‌های صاف عبارتست از



شکل (۵-۴) سطح مقطع لوله گیرنده و شبکه مقاومتی آن (۲۱)

ضریب انتقال حرارت در داخل لوله‌های جاذب از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$h_{HTF} = Nu_{HTF} \frac{k_{HTF}}{D_{ia}} \quad (۴۳-۴)$$

سپس، انتقال حرارت جابجایی در لوله‌های جاذب براساس قانون سرمایش نیوتون تعریف می‌گردد

$$\dot{q}_{conv,HTF} = h_{HTF} p_{ia} (T_{ia} - T_{bulk}) \quad (۴۴-۴)$$

پارامتر $T_{bulk}=T_{m,i}$ دمای سیال متوسط حجمی بین ورودی و خروجی هر بخش است. برای جریان داخلی، دمای متوسط سیال به صورت خطی در راستای جریان افزایش می‌یابد. (۲۱)

۴-۸-۷ رسانش حرارتی از داخل جاذب

انتقال حرارت از ضخامت دیوار یک سیلندر نازک، رسانش خالص تعریف می‌شود. نرخ انتقال حرارت رسانشی در جهت شعاعی لوله جاذب با استفاده از قانون هدایت رسانشی فوریه می‌باشد.

$$\dot{q}_{cond,a} = \frac{2\pi k_a}{\ln(D_{0a}/D_{ia})} (T_{0a} - T_{ia}) \quad (4-45)$$

جاذب از فولاد ضدزنگ ۳۰۴ ساخته شده و وابستگی دمایی آن به صورت رابطه خطی زیر تعریف می‌شود.

$$k_a = 0.013T_{ave,a} + 15.2 \quad (4-46)$$

که در آن،

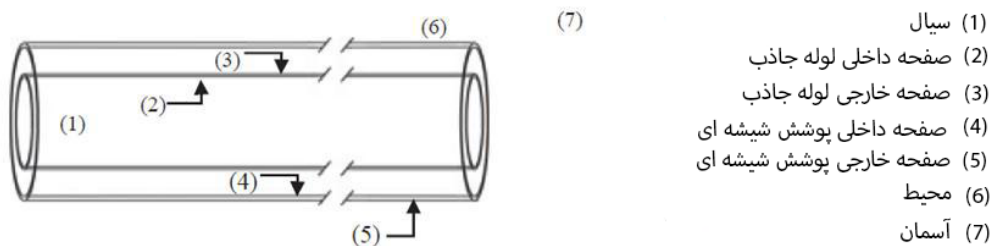
$$T_{ave,a} = (T_{oa} + T_{ia}) / 2 \quad (4-47)$$

می‌باشد. (۲۷)

۴-۸-۸ انتقال حرارت در لوله جاذب

آنالیز انتقال حرارت می‌تواند با یک مدل تک‌بعدی در جهت شعاعی انجام شده و سپس

به یک مدل دو بعدی در جهت جریان سیال و نیز شعاعی تعمیم داده شود. در مدل تک بعدی فرض می‌گردد که تمامی دماها، شارهای حرارتی و خواص ترمودینامیکی حول محیط المان کلکتور یکنواخت می‌باشد. در شکل زیر، شمایی از لوله جاذب دیده می‌شود. (۲۹)



شکل (۶-۴) شمای لوله جاذب (۲۹)

انتقال حرارت جابجایی یکی از فرایندهای انتقال حرارت در لوله جاذب می‌باشد. این فرایند بین سیال داخل لوله جاذب و پوشش لوله و نیز بین پوشش شیشه‌ای و هوای محیط رخ می‌دهد. قانون سرمایش نیوتون به صورت $h = \text{Nu } K/D$ در این مدل قابل استفاده است:

$$\dot{q}'_{conv} = hD\pi(T_{hot} - T_{cold}) \quad (۴۸-۴)$$

انتقال حرارت جابجایی بین سیال و محیط اطراف آن به عدد ناسلت در شرایط آرام ($\text{Nu} = 4/11$) یا مغشوش بستگی دارد. رابطه مربوط به عدد ناسلت به عدد پرانتل و رینولدز بستگی دارد.

$$\text{Nu} = \frac{f / 8(\text{Re} - 1000) \text{Pr}_1}{1 + 12.7(f / 8)^{1/2} (\text{Pr}_1^{1/3} - 1)} (\text{Pr}_1 / \text{Pr}_2)^{0.11} \quad (۴۹-۴)$$

ضریب اصطکاک (f) می‌تواند با رابطه پتوخوف برای رینولدز در بازه ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ محاسبه شود:

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (50-4)$$

بیرون پوشش شیشه‌ای، انتقال حرارت جابجایی اجباری به دلیل وجود باد رخ می‌هد. در این حالت رابطه زاکاسکاس برای اعداد پراتل در بازه بین ۰/۷ تا ۵۰۰ و رینولدز در بازه ۱ تا ۱۰۰۰۰۰ قابل استفاده است. برای اعداد پراتل زیر ۱۰، عدد n برابر ۰/۳۷ و برای اعداد بالای ۱۰، عدد n برابر ۰/۳۶ خواهد بود.

$$\overline{Nu} = C Re^m Pr_6^n \left(\frac{Pr_6}{Pr_5} \right)^{1/4} \quad (51-4)$$

اگر باد وجود نداشته باشد، با انتقال حرارت آزاد مواجه خواهیم بود:

$$\overline{Nu} = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.559 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (52-4)$$

انتقال حرارت جابجایی بین سطح خارجی لوله جاذب و سطح داخلی پوشش شیشه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{q}'_{34conv} = \frac{2.425k (T_3 - T_4)(Pr Ra / (0.861 + Pr))^{1/4}}{(1 + (D_3 / D_4)^{3/5})^{5/4}} \quad (53-4)$$

همچنین، انتقال حرارت رسانشی بین این دو آیتم برابر است با:

$$\dot{q}_{34cond}' = \frac{2\pi k (T_{hot} - T_{cold})}{\ln(D_{inner} / D_{outer})} \quad (54-4)$$

انتقال حرارت تشعشعی بین سطح بیرونی لوله جاذب و سطح داخلی پوشش شیشه‌ای از رابطه

زیر به دست می‌آید: [۲۹]

$$\dot{q}_{34rad}' = \frac{\sigma \pi D_3 (T_3^4 - T_4^4)}{1/\varepsilon_3 + (1 - \varepsilon_4) D_3 / (\varepsilon_4 D_4)}$$

در فصل بعد، نتایج مربوط به مدل‌سازی ارائه خواهد گردید.

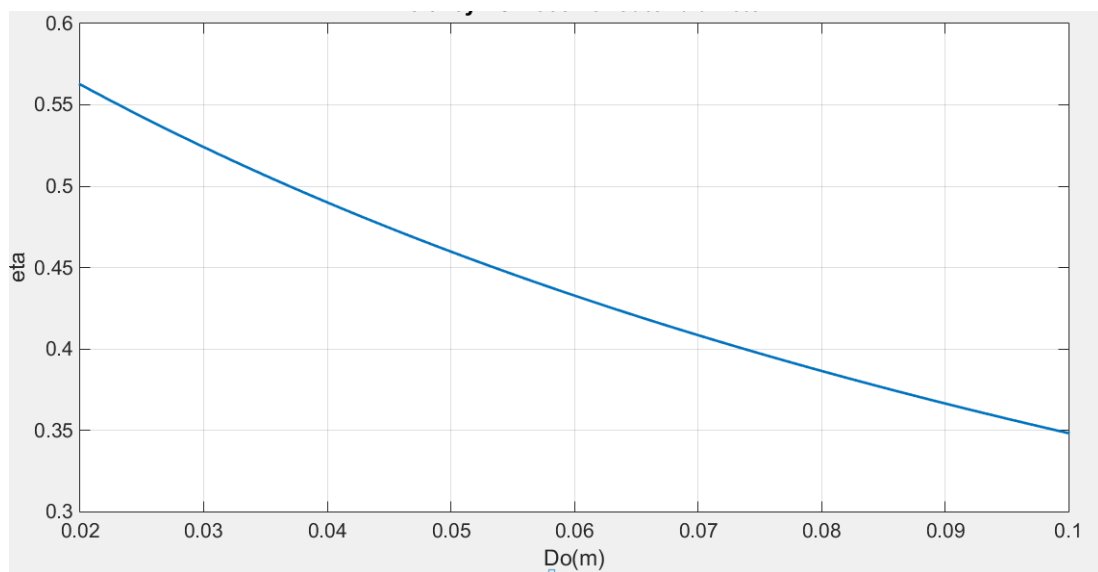
فصل پنجم

نتایج

در این فصل، نتایج مربوط به شبیه‌سازی لوله جاذب کلکتور در نرم افزار متلب ارائه گردیده است. در این بخش، ابتدا اثر پارامترهای فیزیکی لوله جاذب بر روی راندمان بررسی گردیده و در نهایت، پارامترها برای رسیدن به راندمان ماکزیمم با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه خواهند شد.

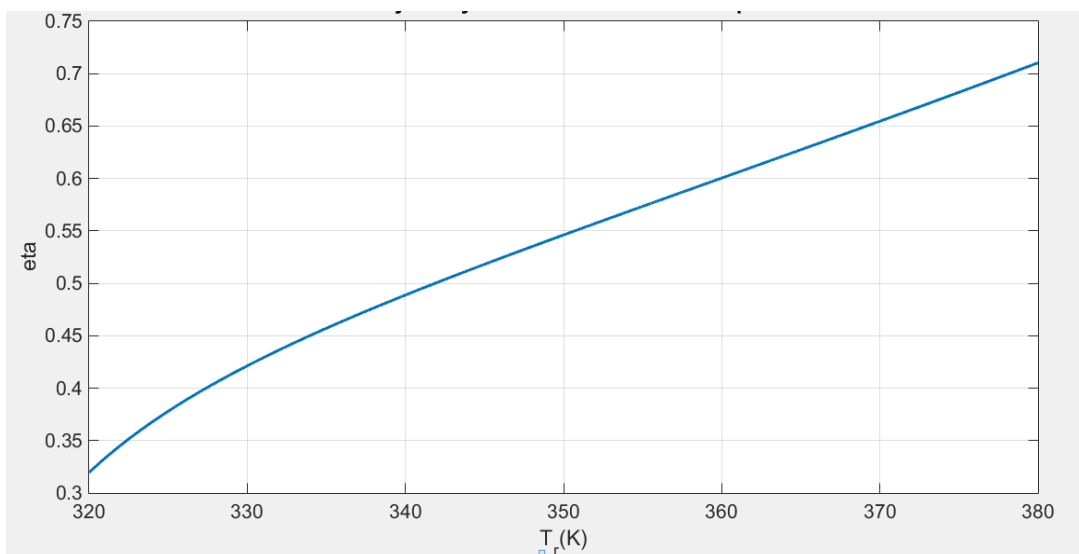
۵-۱ نتایج شبیه‌سازی

در شکل زیر، تغییرات بازده لوله جاذب برحسب قطر خارجی آن دیده می‌شود. شبیه‌سازی قطر خارجی در بازه ۲ سانتی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر انجام شده است. براساس نمودار، با افزایش قطر خارجی لوله جاذب، بازده آن تقریباً به صورت خطی کاهش می‌یابد. بر طبق نمودار اگر قطر خارجی به میزان ۸ سانتی‌متر افزایش یابد، راندمان حدود ۰/۲ کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که قطر خارجی بر پارامتر بازده، بسیار تاثیرگذار خواهد بود.



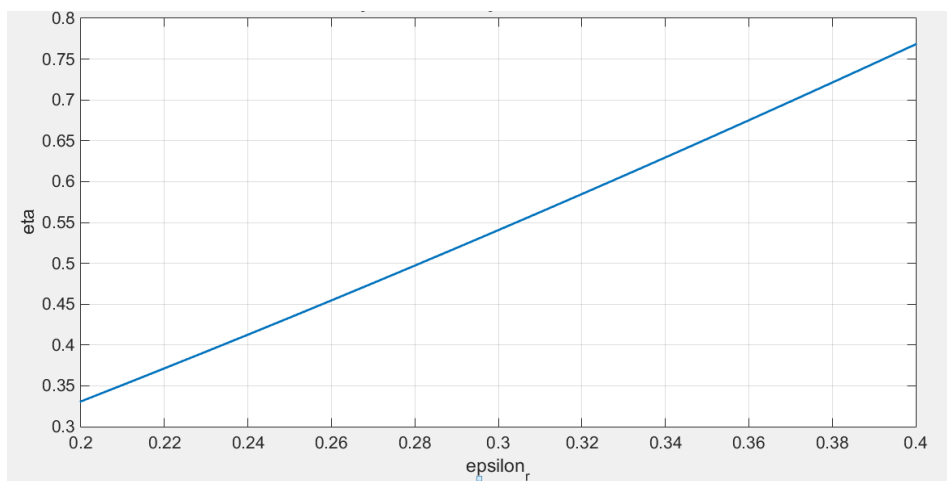
شکل (۵-۱) تغییرات بازده لوله جاذب برحسب قطر خارجی

در شکل زیر، تغییرات بازده لوله جاذب برحسب دمای رسیور آن دیده می‌شود. در این شبیه‌سازی، دما از ۳۲۰ کلوین تا ۳۸۰ کلوین تغییر داده شده است. همانطور که در نمودار زیر دیده می‌شود، با تغییر دما، بازده ابتدا به صورت غیرخطی و سپس به صورت خطی زیاد می‌شود. براساس نمودار به ازای تغییرات دما به میزان ۱۸/۷۵ درصد، ۰/۳۸ افزایش می‌یابد. اما باید توجه داشت که رسیدن به دمای ۳۸۰ کلوین به راحتی ممکن نبوده و در بسیاری موارد غیر اقتصادی خواهد بود اما به طور کلی پارامتر دما نیز بازده را به طور محسوسی دستخوش تغییر می‌کند.



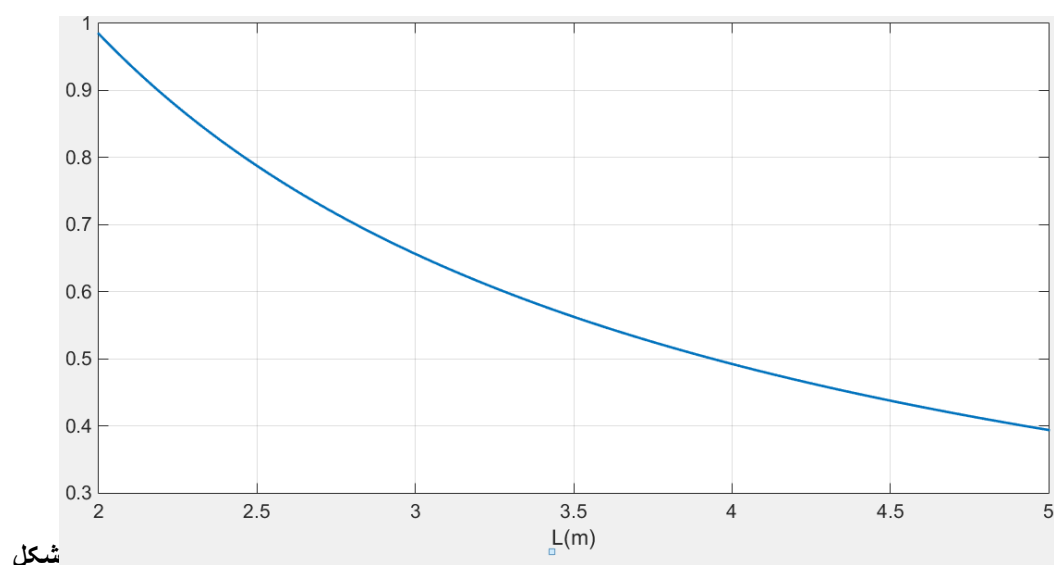
شکل (۵-۲) تغییرات بازده لوله جاذب برحسب دمای رسیور لوله جاذب

در شکل ۵-۳، تغییرات بازده با ضریب گسیل پذیری لوله جاذب دیده می شود. در این شبیه سازی، ضریب گسیل پذیری از $0/2$ تا $0/4$ افزایش می یابد. همانطور که در شکل زیر دیده می شود، با افزایش ضریب گسیل پذیری، بازده به صورت خطی زیاد می شود. در واقع با افزایش ضریب گسیل پذیری، توانایی لوله جاذب در انتقال حرارت و کاهش دمای سیستم بیشتر شده و به همین جهت راندمان بالاتر می رود. اما باید توجه داشت که افزایش ضریب گسیل پذیری به دلیل آنکه به ویژگی های ساختاری ماده بستگی دارد، کار بسیار دشواری است و سال ها طول می کشد که ضریب گسیل پذیری یک ماده به میزان $0/01$ افزایش یابد.



شکل (۳-۵) تغییرات بازده لوله جاذب برحسب ضریب گسیل پذیری لوله جاذب

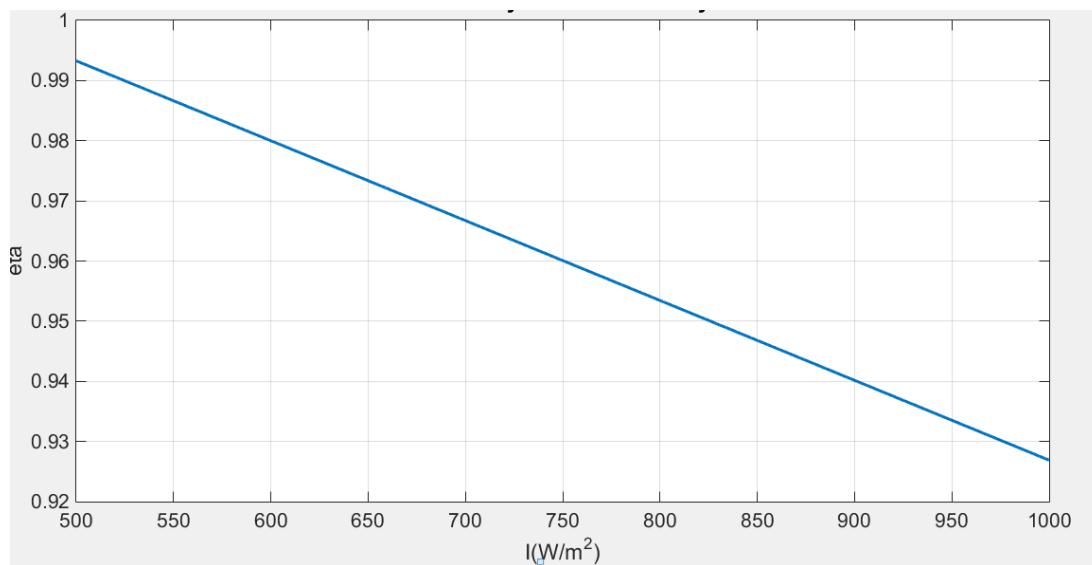
در شکل، زیر اثر طول لوله جاذب بر روی بازده دیده می‌شود. در این شبیه‌سازی طول لوله جاذب از ۲ تا ۵ متر تغییر می‌کند. براساس نمودار زیر، بازده لوله جاذب با افزایش طول آن به صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. دلیل این امر کاملاً واضح است، هرچه طول لوله بیشتر افت‌های ناشی از اصطکاک و نیز افت‌های ناشی از اضمحلال انرژی بیشتر شده و بازده کاهش می‌یابد. اما باید توجه داشت که طول لوله براساس میزان انرژی مورد نیاز تعیین می‌گردد و بنابراین، بازده به مقادیر بالا نمی‌رسد.



شکل

(۴-۵) تغییرات بازده لوله جاذب برحسب طول لوله جاذب

در شکل زیر، اثر شدت تابش خورشیدی بر بازده مورد بررسی قرار گرفته است. در شبیه‌سازی انجام شده، شدت تابش خورشیدی از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ وات بر متر مربع تغییر کرده است. براساس نمودار زیر، با افزایش شدت تابش، بازه به صورت خطی کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش شدت تابش به دلیل وجود ضریب گسیل‌پذیری میزان بیشتری از انرژی تلف شده و در نتیجه بازده کاهش می‌یابد. همانطور که در شکل زیر دیده می‌شود در شدت تابش ۵۰۰ وات بر متر مربع بازده بسیار زیاد است. این مقدار تابش در اوایل و اواخر روز رخ می‌دهد. اما باید توجه داشت که میزان شدت ۵۰۰ وات بر متر مربع به هیچ وجه نمی‌تواند یک سیستم سرمایش یا گرمایش خورشیدی را اداره کند. بنابراین باید با قبول کاهش بازده به مقادیر بالاتر شدت تابش فکر شود.

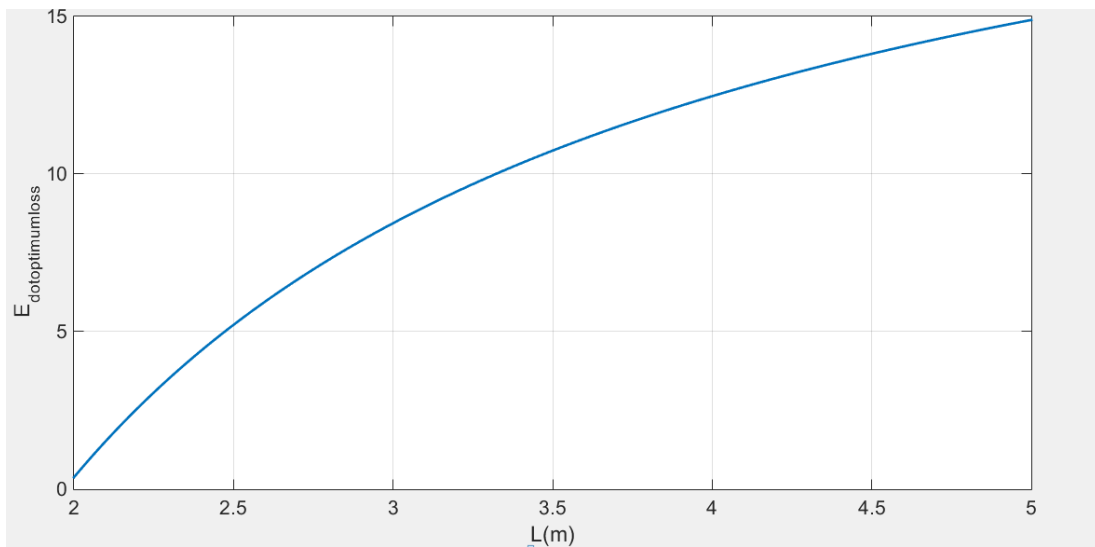


شکل (۵-۵) تغییرات بازده لوله جاذب برحسب شدت تابش

۵-۲ نتایج مربوط به تحلیل انرژی

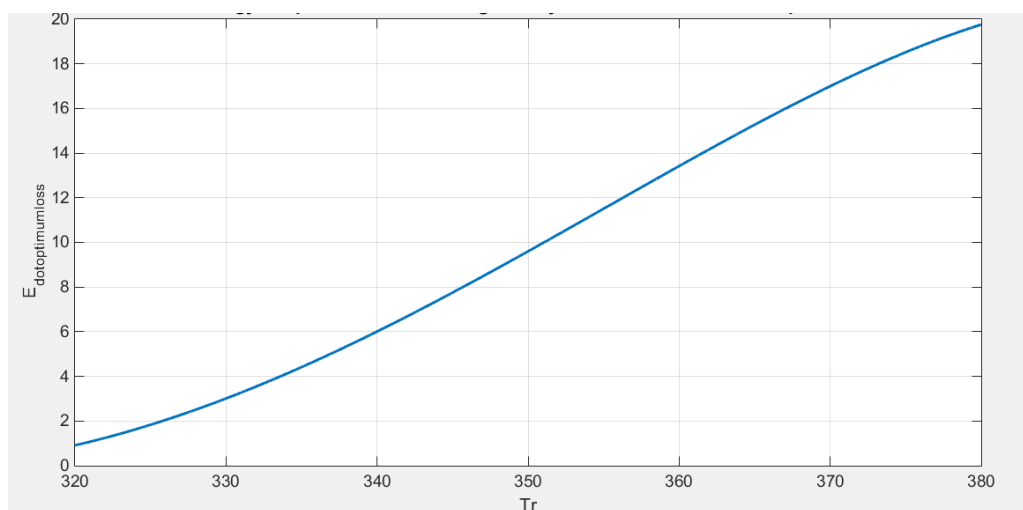
در شکل‌های زیر نتایج بخش تحلیل انرژی دیده می‌شود. در شکل ۵-۶، نمودار تغییر انرژی اتلاف بهینه برحسب طول لوله جاذب دیده می‌شود. براساس نمودار زیر، با افزایش

طول لوله جاذب آگزرژی اتلاف با رابطه‌ی زیادی می‌گردد. با توجه به روند نمودار، احتمالاً مقدار آگزرژی به یک مقدار ثابت همگرا خواهد شد. در این نمودار طول لوله از ۲ تا ۵ متر تغییر کرده است.



شکل (۵-۶) تغییرات آگزرژی اتلاف بهینه برحسب طول لوله جاذب

بر طبق نمودار زیر، هرچه دمای لوله جاذب بیشتر شود، میزان آگزرژی اتلاف بهینه بیشتر خواهد شد.



شکل (۵-۷) تغییرات آگزرژی اتلاف بهینه برحسب دمای رسیور لوله جاذب

۵-۳ فرایند بهینه سازی

الگوریتم ژنتیک یکی از زیر مجموعه های محاسبات تکامل یافته می باشد که رابطه مستقیمی با مبحث هوش مصنوعی دارد در واقع الگوریتم ژنتیک یکی از زیر مجموعه های هوش مصنوعی می باشد. الگوریتم ژنتیک را می توان یک روش جستجوی کلی نامید که از قوانین تکامل بیولوژیک طبیعی تقلید می کند. الگوریتم ژنتیک بر روی یکسری از جواب های مساله به امید بدست آوردن جواب های بهتر قانون بقای بهترین را اعمال می کند. در هر نسل به کمک فرآیند انتخابی متناسب با ارزش جواب ها و تولید مثل جواب های انتخاب شده به کمک عملگرهایی که از ژنتیک طبیعی تقلید شده اند، تقریب های بهتری از جواب نهایی بدست می آید. این فرایند باعث می شود که نسل های جدید با شرایط مساله سازگارتر باشد.

محدوده کاری الگوریتم ژنتیک بسیار وسیع می باشد و هر روز با پیشرفت روزافزون علوم و تکنولوژی استفاده از این روش در بهینه سازی و حل مسائل بسیار گسترش یافته است. به طور کلی، الگوریتم های ژنتیکی از اجزاء زیر تشکیل می شوند:

۵-۳-۱ کروموزوم

در الگوریتم های ژنتیکی، هر کروموزوم نشان دهنده یک نقطه در فضای جستجو و یک راه حل ممکن برای مسئله مورد نظر است. خود کروموزوم ها (راه حل ها) از تعداد ثابتی ژن (متغیر) تشکیل می شوند. برای نمایش کروموزوم ها، معمولاً از کدگذاری های دودویی (رشته های بیتی) استفاده می شود.

۵-۳-۲ جمعیت

مجموعه ای از کروموزوم ها یک جمعیت را تشکیل می دهند. با تاثیر عملگرهای ژنتیکی

بر روی هر جمعیت، جمعیت جدیدی با همان تعداد کروموزوم تشکیل می‌شود.

۵-۳-۳ تابع برازندگی

به منظور حل هر مسئله با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی، ابتدا باید یک تابع برازندگی برای آن مسئله ابداع شود. برای هر کروموزوم، این تابع عددی غیر منفی را برمی‌گرداند که نشان دهنده شایستگی یا توانایی فردی آن کروموزوم است. (۳۱)

۵-۳-۴ روند کلی الگوریتم‌های ژنتیکی

قبل از این که یک الگوریتم ژنتیکی بتواند اجرا شود، ابتدا باید کدگذاری (یا نمایش) مناسبی برای مسئله مورد نظر پیدا شود. معمولی‌ترین شیوه نمایش کروموزومها در الگوریتم ژنتیک به شکل رشته‌های دودویی است. هر متغیر تصمیم‌گیری به صورت دودویی در آمده و سپس با کنار هم قرار گرفتن این متغیرها کروموزوم ایجاد می‌شود. گرچه این روش گسترده‌ترین شیوه کدگذاری است اما شیوه‌های دیگری مثل نمایش با اعداد حقیقی در حال گسترش هستند. همچنین یک تابع برازندگی نیز باید ابداع شود تا به هر راه حل کدگذاری شده ارزشی را نسبت دهد. در طی اجرا، والدین برای تولید مثل انتخاب می‌شوند و با استفاده از عملگرهای آمیزش و جهش با هم ترکیب می‌شوند تا فرزندان جدیدی تولید کنند. این فرآیند چندین بار تکرار می‌شود تا نسل بعدی جمعیت تولید شود. سپس این جمعیت بررسی می‌شود و در صورتی که ضوابط همگرایی رآورده شوند، فرآیند فوق خاتمه می‌یابد. (۳۱)

```

BEGIN
    t=0;
    Initialize P(t);           {جمعیت اولیه ایجاد می‌شود}
    Evaluate P(t);           {عناصر P(0) توسط مقادیر برازندگی نشاندار می‌شوند}

    WHILE شرایط خاتمه ارضا نشده DO
        BEGIN
            t=t+1;
            Select P(t) from P(t-1); {اجرای عملگر انتخاب و لیست والدین فراهم می‌شود}
            Crossover P(t);          {اجرای عملگر کروسور و لیست فرزندان فراهم می‌شود}
            Mutation P(t);           {اجرای عملگر جهش و لیست جمعیت جدید حاصل می‌شود}
            Evaluate P(t);           {عناصر P(t) توسط مقادیر برازندگی نشاندار می‌شوند}

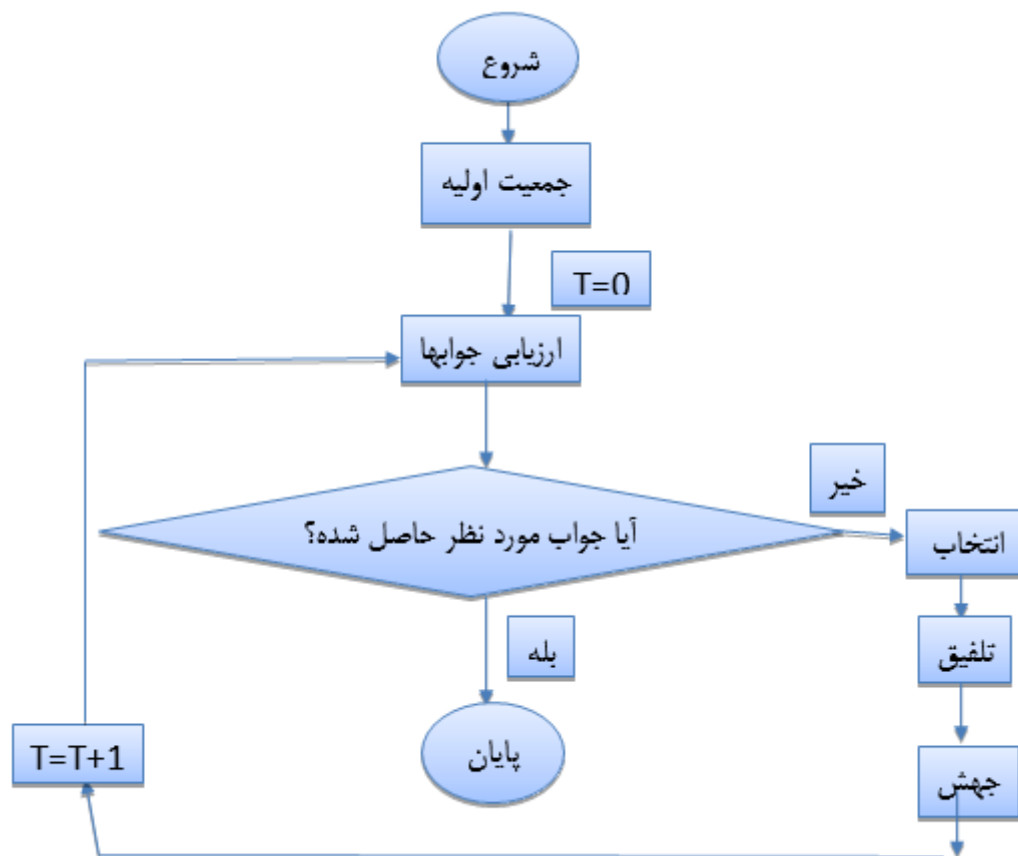
        END
    END.

```

شکل (۵-۸) کد برنامه مجازی الگوریتم ژنتیک ساده و فلوچارت آن (۳۱)

۵-۳-۵ روند کلی بهینه سازی و حل مسائل در الگوریتم ژنتیک

- شروع : تولید تصادفی یک جمعیت که شامل تعداد زیادی کروموزم (روشهای حل مسئله است) می باشد.
- صحت و درستی : ارزیابی صحت برای تابع $f(x)$ به ازای هر کروموزوم x در جمعیت.



شکل (۵-۹) نحوه ارزیابی تابع شایستگی در چرخ رولت (۳۱)

- ایجاد یک جمعیت جدید : تولید یک جمعیت جدید با انجام تمامی زیر گروههای زیر تا آنکه یک جمعیت جدید ایجاد گردد.
- انتخاب : انتخاب کروموزومهای پدر و مادر از جمعیت قبلی با توجه به صحت و درستی آن بطوریکه هر چه **Fitness** بهتر باشد (دقت جواب در همگرایی بیشتر باشد) شانس بیشتری برای انتخاب دارد.
- تولید مثل: انجام زاد و ولد و ایجاد یک نسل جدید.
- جهش: مشخص شدن مکان فرزند تولید شده در کروموزوم.
- پذیرش : جا دادن فرزند جدید در داخل جمعیت.

- جایگزینی : جایگزینی جمعیت جدید به جای جمعیت قبلی و مورد استفاده قرار

دادن جمعیت جدید در مراحل بعدی الگوریتم.

- امتحان : اگر شرایط مطلوب در حل مسئله ارضا شد اعلام میکنیم که به بهترین

جواب رسیده ایم و از الگوریتم خارج می شویم در غیر این صورت به مرحله ۲

یعنی Fitnessess میرویم و دوباره همین روند را تکرار می کنیم.(۳۱)

۵-۳-۶ شرط پایان الگوریتم

چون که الگوریتم های ژنتیک بر پایه تولید و تست می باشند، جواب مساله مشخص

نیست و نمی دانیم که کدامیک از جواب های تولید شده جواب بهینه است تا شرط خاتمه را

پیدا شدن جواب در جمعیت تعریف کنیم. به همین دلیل، معیارهای دیگری را برای شرط

خاتمه در نظر می گیریم:

۱. تعداد مشخصی نسل: می توانیم شرط خاتمه را مثلاً ۱۰۰ دور چرخش حلقه اصلی

برنامه قرار دهیم.

۲.عدم بهبود در بهترین شایستگی جمعیت در طی چند نسل متوالی

۳. بهترین شایستگی جمعیت تا یک زمان خاصی تغییری نکند.

شرایط دیگری نیز می توانیم تعریف کنیم و همچنین می توانیم ترکیبی از موارد فوق را به

عنوان شرط خاتمه به کار ببندیم.(۳۱)

پارامترهای در نظر گرفته شده در فرایند بهینه سازی عبارتند از:

- قطر خارجی لوله جاذب

- دمای گیرنده سهموی

- گسیل پذیری لوله گیرنده سهموی

- طول متمرکز کننده سهموی

- گرمای ویژه سیال

در این برنامه جمعیت هر نسل با `popsize` نشان داده می شود. `Keep` تعداد

کروموزوم هایی است که مستقیماً به نسل بعد می روند. هر نسل با ماتریس `popl` نشان داده

می شود. `pc` و `pm` نیز احتمال پیوند و جهش هستند.

با استفاده از تابع `rand` اولین نسل را تولید می کنیم .

وارد حلقه اصلی `while` می شویم تعداد تکرار این حلقه بیانگر تعداد نسل ها می باشد.

```
popsize=200;
keep=40;
pm=0.08;
pc=.85;
popl=round(rand(popsize,60));
Do=0.02+(0.1-0.02)*rand(popsize,1);
Tr=320+(380-320)*rand(popsize,1);
epssilon_r=0.2+(0.4-0.2)*rand(popsize,1);
L=2+(5-2)*rand(popsize,1);
Cp=3600+(4200-3600)*rand(popsize,1);
```

فرایند انتخاب با استفاده از روش چرخ طیار انتخاب انجام می شود. دستورات لازم به این

شکل است.

```
odd=[0 cumsum(fit(1:popsize)'/sum(fit(1:popsize)))];
pick=rand(popsize,1);
```

```

for j=1:popsize
for i=1:popsize
if pick(j,1)>odd(i,1) && pick(j,1)<=odd(i+1,1)
for p=1:60
select(j,p)=popl(i,p);
end
end
end
end
end
for i=1:popsize
for j=1:3
x(i,j)=0;
end
end
end

```

به منظور ارسال رشته‌های برتر به نسل بعد، در این مرحله به تعداد **keep** رشته با

بیشترین برازش از میان رشته‌های انتخابی مستقیماً به نسل بعد راه می‌یابند.

```

d=fit;
for q=1:keep
[u,v]=max(d);
nextgener(q,:)=select(v,:);
d(v,1)=d(v,1)-d(v,1);
end

```

در مرحله پیوند به طور تصادفی به تعداد **M** رشته برای انجام عمل پیوند انتخاب می‌شوند.

مکان جفت رشته‌های انتخابی برای پیوند در نسل در ماتریس **picros** ذخیره می‌شود.

و ماتریس **crosp** نقطه برش را تعیین می‌کند.

```

for i=1:M
while picros(1,i)==picros(2,i)
picros(1,i)=ceil(rand*popsiz);
picros(2,i)=ceil(rand*popsiz);
end
end

crosp=ceil(rand(1,M)*39);

```

عمل پیوند توسط دستورات زیر صورت می گیرد.

```

for k=1:M
for j=crosp(1,k):39

res(1,j)=select(picros(1,k),j);
select(picros(1,k),j)=select(picros(2,k),j);
select(picros(2,k),j)=res(1,j);
end
end

```

با احتمال pm به تعداد nmut بیت در کل نسل برای جهش انتخاب می شود.

عمل جهش به این صورت شکل می گیرد

```

nmut=ceil(popsiz*39*pm);
murow=ceil(rand(1,nmut)*popsiz);
mucol=ceil(rand(1,nmut)*39);

for i=1:nmut
if select(murow(1,i),mucol(1,i))==1
select(murow(1,i),mucol(1,i))=0;
else
select(murow(1,i),mucol(1,i))=1;
end
end

```

نسل بعدی پس از اینکه تعدادی از رشته ها مستقیما به نسل بعد راه یافتند. پس از جهش و

پیوند روی رشته های انتخابی نسل قبل تشکیل می شود. nextgener ماتریسی است که در

بر دارنده ی نسل بعد است.

```

for i=(keep+1):popsize
nextgener(i,:)=select(i,:);
popl=nextgener;
end
h=h+1;
end

```

در نهایت رشته ای که بیشترین مقدار برازش را دارد از میان تمامی نسل ها انتخاب می شود.

(x_1, x_2, \dots, x_5) مربوط به این رشته برتر با Xmaximum و مقدار تابع بیشینه تابع

fitmaximum نام دارد.

با تکرار آزمایش به نظر می رسد که جمعیت هر نسل تاثیر زیادی در جواب دارد. جمعیت را

۲۰۰ (popsiz=200) در نظر می گیریم و تعداد تکرار نسل ها را ۲۰۰۰۰ در نظر می گیریم.

اگر به میزان کافی تکرار انجام شود نتیجه به این صورت است.

```

Xmaximum =

    1.0e+03 *

    0.0000    0.3714    0.0003    0.0049    4.1018

fitmaximum =

    0.6660

;>>

```

بنابراین، با توجه به تابع در نظر گرفته شده و محدودیت های آن مقادیر بهینه پارامترها در

جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۱) مقادیر بهینه به دست آمده از الگوریتم ژنتیک

پارامتر	مقدار
قطر لوله	۰/۰۸
دمای گیرنده سهموی	۳۷۱/۴
گسیل پذیری لوله گیرنده سهموی	۰/۳
طول متمرکز کننده سهموی	۴/۹
گرمای ویژه سیال	۴۱۰۱

مقدار بازده ماکزیمم به دست آمده ۰/۶۶ است.

۴-۵ نتیجه گیری

در این پایان نامه، به بررسی و بهینه سازی پارامترهای لوله جاذب یک کلکتور سهموی خطی پرداخته شده است. در این تحقیق، ابتدا انواع کلکتورها و سیستم های سرمایش خورشیدی بررسی گردیده و سپس، مدل ریاضی انتقال حرارت در لوله جاذب کلکتور براساس مراجع معتبر ارائه گردیده است. در ادامه کد حل عددی در نرم افزار متلب تدوین و به واسطه آن اثر پارامترهای فیزیکی لوله جاذب بر روی بازده آن بررسی شده است. در انتها نیز با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پارامترهای فیزیکی لوله جاذب برای رسیدن به راندمان ماکزیمم براساس قیدهای موجود بهینه گردیده است. براساس نتایج این پایان نامه:

۱- افزایش طول لوله جاذب اثر نامطلوب بر روی راندمان لوله جاذب داشته و با افزایش

طول لوله جاذب، راندمان آن کاهش می‌یابد. این کاهش به طور غیر خطی خواهد بود.

۲- با افزایش ضریب گسیل‌پذیری نیز، میزان بازده به دلیل افزایش انتقال حرارت بالاتر می‌رود. البته این پارامتر به دلیل آن که به جنس و ساختار مولکولی ماده وابسته است، نمی‌تواند پارامتر مناسبی برای افزایش راندمان باشد.

۳- با افزایش قطر لوله نیز میزان اتلاف انرژی به دلیل افزایش اصطکاک زیاد شده و راندمان کاهش می‌یابد.

۴- با افزایش شدت تابش نیز، میزان هدر رفت انرژی افزایش یافته و راندمان کاهش می‌یابد. البته با توجه به این که انرژی خورشیدی از منابع تجدیدپذیر بوده و انرژی خورشیدی همواره در روز دسترس است، باید به مقادیر بالای شدت تابش برای افزایش انرژی فکر کرد و مساله راندمان برای این پارامتر در اولویت بعدی است.

۵- با افزایش دمای رسیور لوله جاذب نیز راندمان افزایش می‌یابد، اما افزایش دما خود مستلزم صرف انرژی است و نمی‌توان دما را بیش از حد زیاد نمود.

۶- با افزایش طول و قطر لوله، انرژی اتلاف بهینه زیاد می‌شود.

۷- با انجام بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک بازده بهینه ۰/۶۶ به دست آمده است.

فهرست منابع و مآخذ

۱. مجیدی، م [و دیگران]. بهینه سازی ترموآکونومیک، مدل دینامیکی نیروگاه خورشیدی هیبریدی. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی سیستم های انرژی دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات. ۱۳۹۲.

۲. مختاری، ا و یعقوبی و چگینی. راه های کاهش قیمت برق تولیدی نیروگاه های گرمایی خورشیدی با کلکتور سهموی خطی. بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز و سازمان انرژی های نو ایران. ۱۳۹۲.

۳. شمس، م [و دیگران]. مروری بر فناوری های تولید برق از انرژی خورشیدی و مقایسه آماری بزرگترین نیروگاه های خورشیدی جهان. فصلنامه توسعه تکنولوژی صنعتی. ۱۳۹۲.

4. Sivareddy V., S. K. Tyagi, N. L. Panwar, K. R. Ranjan, S. C. Kaushik, M. K. Gupta. Thermodynamic performance evaluation of solar and other thermal power generation systems ;A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, volume 50, p:567-582.

5. Rahman H.A., W. Z. W. Omar, S. O. Fadhl, D. A. Baharoon. Historical development of concentrating solar power technologies to generate clean electricity efficiently ;A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, volume 41, p:996-1027.

6. Guven H.M., R. B. Bannerot. Derivation of universal error parameters for comprehensive optical analysis of parabolic troughs. Solar engineering, 1985, p: 168-174.

7. Guven H.M., R. B. Bannerot. A comprehensive methodology for the analysis and design of parabolic trough collectors for solar energy a plication in india. Solar engineering, 1986, p: 221-253

8. Rabl A., P. Bend, H. W. Gaul. Optimization of parabolic troughs Solar collector. Solar energy, 1982, volume 29, no 5, p:407-417.

۹. یعقوبی، م و درودگر. ۱۳۷۵. طراحی کلکتور خورشیدی از نوع سهموی خطی نیروگاه ۲۵۰ کیلوواتی. نشریه انرژی ایران، شماره ۱، ص ۵۴-۶۷.

10. Incropera F. P. , D. P. Dewitt. Fundamentals of heat and mass transfer . john wiley & sons, 3rd Ed, 1990, p 408-411,p 561-567.

11. Fujiwara M. Exergy analysis for the performance of solar collector. Journal of solar energy engineering, 1983, volume 105, p 163-167.

12. Scholten W. B. Exergy based comparition of solar collectors efficiency curves. Solar engineering . 1984, p 297-301.

13.Saunders E. A. D.. Heat exchanger, selection, design & construction. john wiley & sons, 1st Ed, 1988, p 164-178,p 232-239.

14. Bijan A. Advanced engineering thermodynamics. john wiley & sons, 3rd Ed, 1988, p 111-142,p 488-491.

۱۵. رضایی مقدم، ا. آنالیز پارامتریک عوامل محیطی و تکنولوژیک بر کارایی دریافت کننده سهموی خطی خورشیدی. چهارمین کنفرانس بین المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی. ۱۳۹۲.

۱۶. کریمی صادقیانی، ا [و دیگران]. آنالیز انرژی و انرژی کلکتورهای سهموی خطی. اولین همایش ملی انرژی های نو و پاک. ۱۳۹۲.

۱۷. صالحی، م [و دیگران]. بررسی تاثیر دبی های متفاوت بر روی راندمان کلکتور سهموی خطی. ششمین همایش علمی تخصصی انرژی های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد. ۱۳۹۳.

۱۸. صالحی، م [و دیگران]. بررسی تیپیرات راندمان و دمای خروجی از کلکتورهای سهموی خطی بر اثر تیپیر دقت سیستم ردیاب خورشیدی. ششمین همایش علمی تخصصی انرژی های تجدیدپذیر، پاک و کارآمد. ۱۳۹۳.
۱۹. قلی نژاد، م و بیدی. آنالیز انرژی کلکتور سهموی خطی در یک نیروگاه خورشیدی. بیست و نهمین کنفرانس بین المللی برق. ۱۳۹۳.

20. Kasaeian A.B., T. Sokhansefat, F. Kowsary. Heat transfer enhancement in parabolic trough collector tube using Al₂O₃/synthetic oil nanofluid. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Volume 33, p:636–644.
21. Mohammad Zadeh, P., T. Sokhansefat, A.B. Kasaeian, F. Kowsary and A. Akbarzadeh. Hybrid optimization algorithm for thermal analysis in a solar parabolic trough collector based on nanofluid. Energy, Volume 82, 15 March , 2015, p:857-864.
22. Biencinto M., L. Gonzalez, E. Zarza , L.E. Diez, J. Munoz-anton. performance model and annual yield comparison of parabolic-trough solar thermal power plants with either nitrogen oil as heat transfer fluid. Energy Conversion and Management, Volume 87, November, 2014, p:238-249.
23. Chang C., X. Li., Q.Q. Zhang. Experimental and numerical study of the heat transfer characteristics in solar thermal absorber tubes with circumferentially non-uniform heat flux. Energy Procedia, 2014, Volume 49, p:305–313.
24. Del Col D., M. Bortolato., A. Padovan., M. Quaggia. Experimental and numerical study of a parabolic trough linear CPVT system. Energy Procedia, 2014, Volume 57, p:255 – 264.
25. Desai N., S. Bandyopadhyay. Optimization of concentrating solar thermal power plant based on parabolic trough collector. Journal of cleaner production, 15 february, 2015, Volume 89, p:262-271.
26. Huang W., Q. Xu, L. Li, H. Li, Y. Li. Performance comparison of solar parabolic trough system with glass and film reflector. Energy Conversion and Management, 2014, Volume 85, p: 581–590.

27. Jianyu T., W. Fuqiang, M. Lanxin, W. Chengchao. Effects of glass cover on heat flux distribution for tube receiver with parabolic trough collector system. *Energy Conversion and Management*, November, 2015, Volume 90, p: 47–52.
28. Jianyu T., W. Fuqiang, L. Qingzhi, H. Huaizhi. Parabolic trough receiver with corrugated tube for improving heat transfer and thermal deformation characteristics. *Applied Energy*, 2016, Volume 164, p:411–424.
29. Li Z.Y., Z. Huang, G.L. Yu, W.Q. Tao. Numerical study on heat transfer enhancement in a receiver tube of parabolic trough solar collector with dimples, protrusions and helical fins. *Energy Procedia*, 2015, Volume 69, p:1306 – 1316.
30. Mwesigye A., Zh. huan , J.R. meyer. Thermodynamic optimization of the performance of a parabolic trough receiver using synthetic oil- nanofluid. *Applied Energy*, 15 October, 2015, Volume 156 , p:398-412.
31. Song J., Z. Zhou, K. Tong. An algorithm for the flux distribution over the flat absorber of a parabolic trough concentrator. *Solar Energy*, 2016, Volume 125, p:32–42.
32. Yilmaz I.H., M. Soylemez. Thermo-mathematical modeling of parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*. September, 2014, Volume 88, p:768-784.
33. Zhang P., X. Xiao, D.D. Shao, M. Li. Experimental and numerical heat transfer analysis of a V-cavity absorber for linear parabolic trough solar collector. *Energy Conversion and Management*, May, 2014, Volume 86, p: 49–59.

Abstract :

Numerical optimization of physical parameters of the absorber pipe of parabolic trough concentrator systems to increase efficiency

This study is aimed to investigate and optimize the physical parameters of absorber of parabolic trough collectors. First, various types of solar collectors have been investigated, then parabolic trough collectors have deeply been considered and the mathematical model of heat transfer in absorber pipe of collector has been presented on the basis of valid sources. In continue, equations related to absorbent pipe are numerically solved by using MATLAB software and also effect of physical parameters on the output has been investigated. Finally, physical parameters of absorbent pipe has been optimized by using genetic algorithm to reach the maximum efficiency on the basis of current conditions. Results pointed out that increasing the length of absorber pipe has unsuitable effect on its efficiency and the latter decreases by increasing the length of absorbent pipe. This decrease will be nonlinear.

Keywords: absorber pipe, parabolic trough concentrator, efficiency
exergy



Energy Institute For Higher Education Faculty Of Engineering

Department Of Mechanical Engineering – Energy Conversion Thesis For Degree
Of Master Of Science (M.Sc)

Title:

Numerical optimization of physical
parameters of the absorber pipe of parabolic
trough concentrator systems to increase
efficiency

Supervisor :

Dr. Ali Shamel

advisors :

Dr. Raza Alaei

Dr. Eskandar Jamali

By :

Sayed Mohammad Javed Tahami

06/2017

