

بررسی پارامترهای هندسی و نوری سامانه‌های حرارتی خورشیدی مبتنی بر متمرکز کننده‌های فرنل خطی

نام و نام خانوادگی سعید نوروزی^{۱*}، علی ملکی^۲، شاهین بشارتی^۳

۱. دانشجوی کارشنای ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسامانه دانشگاه شهرکرد. (saidnorozi@gmail.com)

۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسامانه دانشگاه شهرکرد. (maleki.ali2000@gmail.com)

۳. مربی، گروه مهندسی مکانیک بیوسامانه دانشگاه شهرکرد. (shahin-besharati@yahoo.com)

چکیده

نسل جدید جمع کننده‌های خورشیدی بازتابنده‌های متمرکز خورشیدی هستند. از این میان می‌توان بازتابنده‌های فرنل خطی را نام برد که به دلیل ساده بودن طراحی کلی، کم هزینه بودن و استفاده بهینه از مساحت زمین برای نصب، مورد توجه هستند. در صورت استفاده از یک بازتابنده ثانویه از نسبت چگالی نوری بالایی برخوردار هستند. مهمترین مشکل بازتابنده‌های فرنل خطی تلفات نوری زیاد در مقایسه با بازتابنده سهموی خطی است. به منظور رفع این مشکل راه‌حلهایی مطرح و بررسی شده است. هدف از این مطالعه مروری بر طراحی بازتابنده فرنل خطی و مشخص نمودن پارامترهای بهینه در طراحی یک سامانه با حداکثر بهره‌وری نوری است. بدین منظور یک سامانه آزمایشی فرنل خطی با مساحت ۱۸ متر مربع میدان برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده است. این نوع جمع کننده باعث تغییر زیاد شار تابش خورشید در خط کانونی جاذب می‌شوند. لذا، ساختارهایی برای آینه‌های اولیه، نحوه قرارگیری و زوایای مناسب با هدف تمرکز و پخش شار تابش به صورت یکنواخت بر روی جاذب معرفی می‌شود و زاویه شیب و شعاع انحنای آینه‌های فرنل بررسی شده، علاوه بر این، طرح‌هایی برای متمرکز کننده ثانویه ارائه می‌گردد، که همراه با مفهوم ردیابی موقعیت خورشیدی است. نتایج نشان می‌دهد طراحی بهینه ارائه شده توانایی رسیدن به بیشینه بازده نوری ۷۱ درصد را دارد که در مقایسه نوع بازتابنده سهموی خطی قابل رقابت خواهد بود.

کلمات کلیدی:

فرنل خطی، بازتابنده، کلکتور-متمرکز، بازده-نوری،

مقدمه

امروزه همچنان از نفت، زغال سنگ، گاز طبیعی و انواع دیگر انرژی‌های فسیلی در سراسر جهان استفاده می‌شود. با این وجود، استفاده از سوخت‌های فسیلی چالش‌های مختلفی مانند: آلودگی‌های زیست محیطی، کمبود انرژی و گرمایش جهانی ایجاد می‌کند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بهترین گزینه برای حل چنین مشکلاتی است [۵].

انرژی تجدیدپذیر به عنوان انرژی به دست آمده از منابع طبیعی و پلیدار تعریف می‌شود. اثر آلاینده فعلی دی اکسید کربن با افزایش نیاز روز افزون انرژی، اهمیت منابع تجدیدپذیر را افزایش می‌دهد. در مقایسه با سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر دارای مزایای اقتصادی و زیست محیطی بسیاری هستند. از جمله این انرژی‌ها می‌توان به انرژی خورشیدی اشاره کرد [۲].

خورشید منبع اصلی انرژی سیارات در مدار است. همچنین منبع ضروری برای ادامه‌ی زندگی در جهان است. بخش عمده‌ای از منابع مختلف انرژی در زمین نتیجه تحولات پدیدار شده از خورشید است. انرژی حاصل از پرتوهایی با طول موج‌های مختلف تشکیل شده که تقریباً در هر مکانی یافت می‌شود، و در استفاده از آن تولید گازهایی مانند، مونوکسید کربن، گوگرد یا مواد زائد خطرناک برای انسان و محیط زیست وجود ندارد. از انرژی خورشیدی می‌توان برای تبدیل مستقیم به برق (با تبدیل فتوولتائیک) و هم چنین انرژی گرمایی استفاده کرد [۲۰]. انرژی گرمایی خورشیدی سازگار با محیط زیست است و در دهه اخیر توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است. برای چند دهه محققان تلاش کردند، تا کارایی کلکتورهای خورشیدی را به طور موثری بهبود بخشند [۱۸]. تحقیقات نشان می‌دهد این نوع انرژی قادر به تولید گرمای مفید در سطح دمای متوسط و بالا (۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس) است [۳]. هم چنین می‌تواند به طور کامل یا قسمتی از نیازهای انرژی را در زمینه‌های مختلف از جمله فرآیندهای صنعتی، خشک‌کن‌ها، سامانه‌های تولید برق، سامانه تولید مثل گرمایی، سامانه‌های خنک کننده جذبی و سامانه نمک زدایی برآورده کند. نمونه‌های معرفی شده تنها بخشی از کاربردهای وسیع این فناوری هستند [۲۱].

سامانه‌های خورشیدی به دو دسته تقسیم می‌شوند. کلکتورهای حرارتی و انواعی که تولید مستقیم انرژی الکتریکی را فراهم می‌کنند. انرژی حرارتی خورشیدی مقرون به صرفه و سازگار با محیط زیست است و در مناطق مختلفی در دسترس است. از انرژی حرارتی خورشیدی در کارخانه‌ها، مدارس و بیمارستان‌ها استفاده می‌شود، تا نیازهای آب گرم و گرمایش فراهم شود. بسته به دمای آب تأمین شده توسط انرژی حرارتی، تولید برق با تجهیزات مختلف تبدیل نیز امکان پذیر است [۱۱].

کلکتورهای خورشیدی انواع خاصی از مبدل‌های حرارتی هستند که انرژی تابش خورشید را به انرژی مفید قابل استفاده تبدیل می‌کنند. جز اصلی هر کلکتور، جمع کننده خورشیدی است، که تابش

خورشیدی ورودی را جذب و آن را به گرما تبدیل می کند، سپس گرما را به سیالی (معمولاً هوا، آب یا روغن حرارتی) در جریان می دهد [۱۰].

کلکتورهای خورشیدی دارای دو نوع اساسی کلکتورهای غیر متمرکز و کلکتورهای متمرکز هستند. مقدار کل انرژی دریافتی توسط زمین در یک ساعت از خورشید، بیشتر از انرژی مورد استفاده انسان‌ها در یک سال است. فناوری های انرژی خورشیدی متمرکز می توانند از نور مستقیم خورشید استفاده کنند و قادرند چندین بار نور را متمرکز کنند تا چگالی نوری بیشتری را در خط کانونی این سامانه‌ها بدست آورند. انرژی خورشیدی متمرکز (CSP)^۱ به دلیل استفاده از مواد ایمن و غیر قابل اشتعال با استفاده از سامانه‌ی انرژی تولید می کند که پاک، کم خطر و بدون سر و صدا است [۷].

کلکتورهای متمرکز در محدوده دمایی متوسط و بالا کار می کنند و قادر به تامین انرژی حرارتی مورد نیاز فرآیندهای صنعتی نیز می باشند. کلکتورهای متمرکز به انواع سهموی (PTC)^۲، بازتابنده فرنل خطی (LFR)^۳، نقطه کانونی و برج خورشیدی تقسیم می شود. در میان آن‌ها، متداول ترین سامانه‌های تولید گرما فناوری های جاذب خطی هستند، مانند انواع سهموی و کلکتور فرنل که عملکرد تقریباً یکسانی دارند [۲۳].

یکی از انواع کلکتورهای خورشیدی متمرکز کننده بازتاب کننده خورشیدی فرنل خطی است، که می تواند انرژی حرارتی در محدوده دمایی بین ۸۰ تا ۲۶۰ درجه تهیه کند [۲۲].

با این حال، کلکتورهای فرنل خطی در مقایسه با نوع سهموی بازده نوری کمتری دارد و این یک محدودیت مهم است که باید مورد توجه قرار گیرد تا این فناوری رایج تر شود. دلایل زیادی برای کاهش کارایی نوری سامانه وجود دارد که در زیر [۲] آورده شده است:

۱- نیاز به متمرکز کننده ثانویه در طرح وجود دارد که باعث از تلفات نوری اضافی می شود.

۲- وجود فاصله بین بازتابنده‌های باعث می شود تا تلفات نوری افزایش یابد.

۳- در طول ردیابی خورشید، بازتابنده‌های اولیه حرکت می کنند و موقعیت نسبی آنها تغییر می کند. نتیجه این حرکت بوجود آمدن سایه در بین آینه‌ها است.

۴- گیرنده در فاصله‌ای چند متری از بازتابنده‌های اولیه (معمولاً ۳ تا ۴ متر) قرار دارد و بنابراین تلفات نوری ناشی از زاویه ارتفاع خورشید شدیدتر است، به ویژه در کلکتورهای با طول کم و در فصل زمستان.

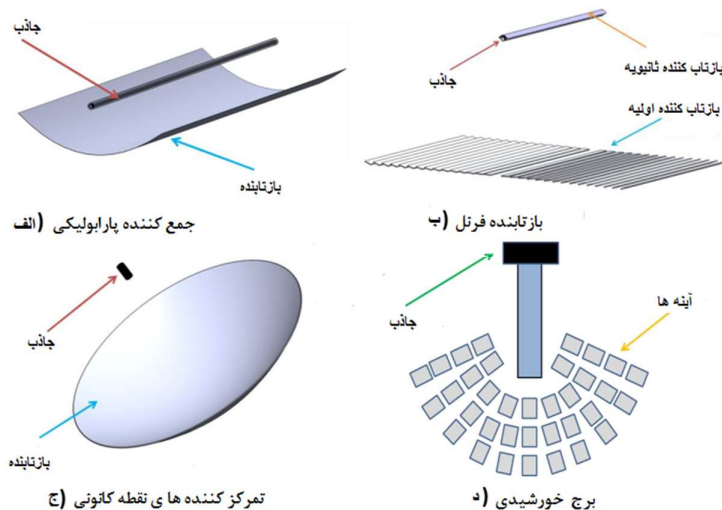
¹ Concentrating Solar Power

² parabolic trough collector

³ linear fresnel reflector

سامانه حرارتی خورشیدی با استفاده از متمرکز کننده LFR، یکنواختی توزیع چگالی شار خورشیدی روی جمع کننده لوله گیرنده حرارتی معمولاً کم است، که باعث ایجاد اختلاف دما در طول محیط جاذب می‌شود که باعث تغییر شکل گیرنده و حتی شکستن کاور شیشه‌ای می‌شود که منجر به از دست رفتن خلاء درون لوله می‌شود [۱۳].

کلکتورهای متمرکز کننده را می‌توان به صورت زیر طبقه بندی کرد: فرنل خطی، سهموی یا پارابولیکی، نقطه کانونی و برج خورشیدی (شکل ۱). در این میان، سامانه فرنل خطی با طراحی ویژه یک سامانه ارزان برای کاربردهای با دمای متوسط است. عملکرد سامانه فرنل خطی به طور قابل توجهی به طراحی گیرنده بستگی دارد. [۸].



شکل ۱- طبقه بندی فناوری های متمرکز کننده خورشید: سهموی یا پارابولیکی، فرنل خطی، نقطه کانونی و برج خورشیدی [۲].

چنین سامانه هایی شامل چیدمان آینه ها یا میدان آینه (به نام آینه های اولیه)، که تابش های خورشیدی را روی یک لوله منعکس می کند برای رشد نسبت چگالی نوری از بازتابنده های ثانویه استفاده می شود. برای دستیابی به بهترین میزان انتقال حرارت، نانوسیالات بهترین و کارآمدترین گزینه هستند [۱۹]. از دیگر روش هایی که برای افزایش کارایی کلکتور فرنل خطی می توان انجام داد، ایجاد یک انحنای کوچک در آینه ها (حدود ۲ میلی متر) که باعث افزایش عملکرد نوری می شود [۴]. استفاده از یک گیرنده با جاذب تخلیه شده دارای کارایی نوری بیشتر به منظور کاهش تلفات حرارتی در نظر گرفته می شود [۱۶].

برای افزایش توان حرارتی سامانه فرنل خطی نیاز به افزایش نسبت تراکم نوری است، که با افزودن بازتابنده‌های اضافی قابل حل خواهد بود. با این حال، نسبت تراکم نوری بالاتر در فرنل خطی با کاهش بازده نوری همراه است. فضاهای بین آینه‌های اولیه فرنل خطی و نیاز به یک بازتابنده ثانویه (معمولاً به شکل ذوزنقه یا سهموی) ممکن است، خود تلفات نوری را اضافه کند. علاوه بر این، تلفات نهایی معمولاً در فرنل خطی شدیدتر هستند، زیرا فاصله کانونی بیشتری نسبت به نوع پارابولیکی دارد. همچنین تلفات سایه زنی در طرح‌های مختلف فرنل خطی وجود دارد که در بازتابنده‌های اولیه یا ثانویه و در طراحی گیرنده تغییر ایجاد می‌کند. با تنظیم متغیرهای مختلف در طراحی میتوان ساختار را بهینه کرد [۱۴].

در یکی دیگر از مطالعات کلکتور فرنل که با بازتابنده ثانویه‌ی ذوزنقه‌ای بررسی شده بود، بازده نوری پیکربندی پیشنهادی حداکثر نزدیک به ۷۵٪ بود که یک مقدار مناسب قابل رقابت با انواع سهموی است [۹]. کلکتور فرنل نیاز به بازتابنده‌های ثانویه دارد تا تلفات نوری به حداقل برسد از بین طرح‌های پیشنهاد شده نوع بازتابنده ثانویه با شکل سهموی، کارآمدتر از بازتاب مربوطه با هندسه ذوزنقه است [۱۲]. در تحقیقی دیگری که نوع فرنل با بازتابنده ثانویه سهموی با نمک مذاب کار می‌کرد حداکثر بازده سامانه برابر با ۶۵٪ گزارش شد [۱۷].

بررسی مقالات ارائه شده نشان می‌دهد که اکثر مطالعات بر خصوصیات نوری و حرارتی فرنل خطی متمرکز شده‌اند. علاوه بر این، فرنل خطی در کاربردهای مختلفی مانند تولید برق، تولید بخار، خنک کننده‌ها و نمک زدایی امکان استفاده را دارند. با این حال، کمبود مطالعات دقیق در مورد عملکرد و خصوصیات روزمره فرنل خطی و همچنین سایر فناوری‌های متمرکز وجود ندارد. بنابراین، بدیهی است که نیاز به مطالعات بیشتر در مورد ارزیابی سامانه‌های متمرکز و به ویژه متمرکز کننده‌های فرنل خطی ضروری است.

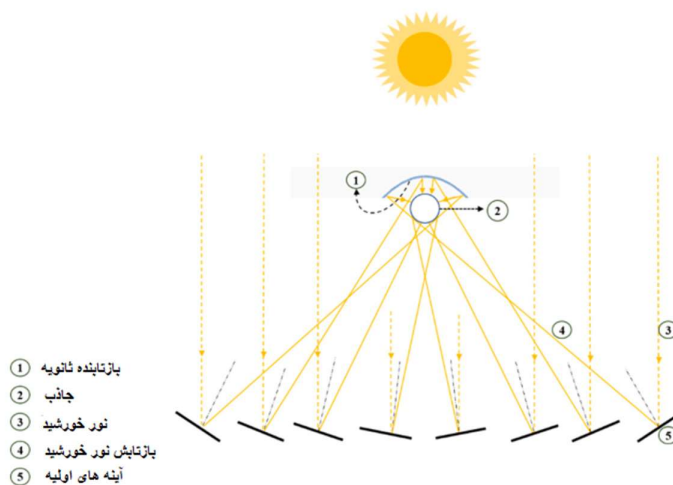
مواد و روشها

مطالعه انجام شده در طراحی کلکتور فرنل خطی مورد بررسی قرار گرفته، سپس عبارات مربوط به طراحی هندسی کلکتور فرنل خطی، قرار گیری بازتابنده‌های اولیه، معرفی طرح‌های ثانویه و بازدهی نوری هر کدام بیان می‌شود. و در نهایت یک سامانه فرنل خطی با ۱۲ بازتابنده اولیه و طرح بازتابنده ثانویه سهموی طراحی و بازدهی کلی نوری سامانه بر اساس زاویه‌ی اصلاح تابش خورشیدی بررسی می‌شود.

بازتابنده فرنل خطی

بازتابنده فرنل خطی دارای لوله یا لوله‌های گیرنده است، که از نقطه کانونی عبور کرده و در ارتفاع ثابت قرار دارند. عمل بازتاب نور خورشید توسط آینه‌های تخت در ردیف‌های موازی انجام می‌شود.

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، کلکتور فرنل خطی دارای یک میدان آینه است، تا نور خورشید را روی یک جاذب ثابت واقع در خط کانونی مشترک بازتابنده‌ها متمرکز کند. کلکتور شامل یک یا چند لوله جاذب است. انرژی گرمایی خورشیدی از طریق جاذب به آب منتقل می‌شود. سپس از طریق مبدل حرارتی انرژی استخراج شده، برای تولید گرما، نیرو، و یا سایر کاربردهای تجاری استفاده خواهد شد [۶]. فناوری فرنل خطی به دلیل سادگی در طراحی سازه و هزینه پایین ساخت، به عنوان یک روش آینده نگر برای انرژی خورشیدی متمرکز، گرمایش صنعتی خورشیدی و خنک کننده خورشیدی در نظر گرفته شده است. به طور کلی، یک کلکتور فرنل خطی از سه جز اصلی تشکیل شده است: میدان آینه، گیرنده و سامانه ردیابی. تابش مستقیم خورشید را می‌توان با آرایه‌ای از آینه‌های موازی به یک خط کانونی ثابت که گیرنده در آن سوار است منعکس کرد [۱۱].



شکل ۲. طرح متمرکز کننده فرنل خطی همراه با نمایش بخش‌های اصلی: بازتابنده ثانویه، جاذب، بازتابنده اولیه

- کلکتورهای فرنل هنگام استفاده در کاربردهای صنعتی، در مقایسه با سایر فناوری‌های متمرکز انرژی خورشیدی (انرژی خورشیدی متمرکز) چندین مزیت را نشان می‌دهند، از جمله:
- ۱- قابلیت تولید بخار مستقیم (امکان استفاده در سایر فناوری‌های انرژی خورشیدی متمرکز، اما به ندرت استفاده می‌شود)، از بین بردن نیاز به مبدل‌های حرارتی که هزینه‌های کارخانه را افزایش و کارایی تولید انرژی گرمایی را کاهش می‌دهند.
 - ۲- دما و فشار بسیار متغیر که می‌تواند بسته به کاربرد صنعتی سازگار شود.
 - ۳- دلیل نوع طراحی فضای کمتری برای نصب و راه اندازی نیاز دارد و مناسب برای استفاده در صنایع نیازمند بخار مانند صنایع غذایی است.

۴- فرنل خطی به دلیل تعداد کم قطعات متحرک و کاهش هزینه های بهره برداری و نگهداری ، یک فناوری کم هزینه است. گیرنده در ارتفاعاتی از سطح زمین قرار دارد (معمولاً در حدود ۲-۵ متر) و ثابت طراحی می شود. علاوه بر این ، بازتابنده های اولیه فرنل خطی نزدیک زمین هستند ، که منجر به کاهش بارهای ناشی از باد و مشکلات مکانیکی و نگهداری در طول عملیات می شود.

۵- مدولار بودن بالا ، از چند صد کیلووات تا چند مگاوات.

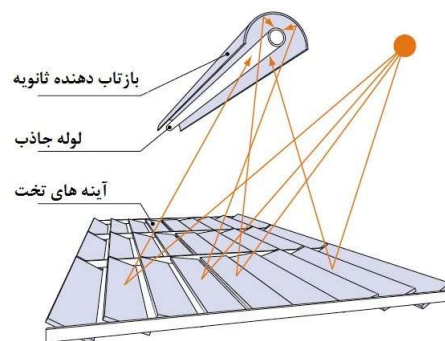
۶- اثرات زیست محیطی کم به دلیل استفاده محدود از مواد اولیه و حذف مایعات مصنوعی.

۷- کمترین هزینه ی تولید انرژی به دلیل طراحی ساده و کارآمد .

ادغام بالقوه فناوری فرنل خطی برای طیف وسیعی از صنایع که از بخار برای کاربردهای حرارتی استفاده می کنند ، مورد مطالعه قرار گرفته است. کمک به صنایع بالادستی مانند نفت ، گاز ، پتروشیمی ها ، معادن و صنایع غذایی، با استفاده از کلکتور های متمرکز خورشیدی امکان پذیر است.

مشخصات سامانه گرمایشی فرنل خطی

شکل ۳ نمای کلی سامانه مورد بررسی را نشان می دهد. بهتر است از پوشش های شیشه ای با ضریب جذب کم مورد استفاده قرار گیرد. زیرا هدر رفت انرژی تابشی خورشید به میزان کمتری خواهد بود. سامانه فوق دارای آینه های بازتابنده اولیه ، آینه بازتابنده ثانویه، جاذب و فریم (شاسی) که اجزا روی آن نصب می شود تشکیل شده است. بازتابنده ثانویه هم میتواند از آینه یا استیل براق ساخته شود. لوله جاذب از جنس مس، همراه با پوشش شیشه ای انتخاب شده است. مخزن ذخیره سازی و لوله ها عایق کاری میشوند تا میزان تلفات حرارتی کمترین مقدار باشد.

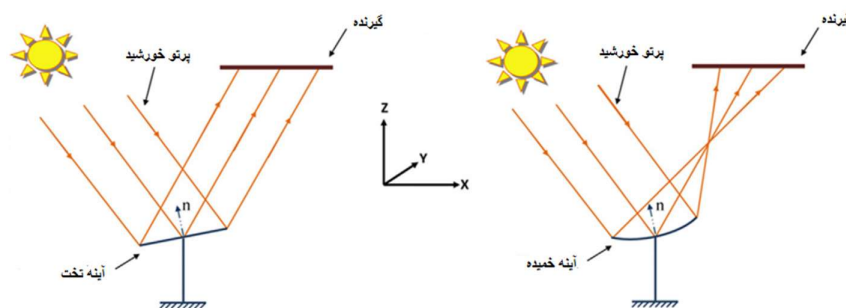


شکل ۳ نمای کلی سامانه سامانه گرمایشی فرنل خطی و موقعیت آینه ها نسبت به خورشید و بازتاب به سمت جاذب. استفاده از بازتابنده ی دایره ای شکل [۶].

آینه های اصلی

ینه های اصلی متمرکز کننده نور بر روی گیرنده هستند. این آینه ها توسط یک سامانه ردیابی به منظور تمرکز نور تنظیم می شوند. تکنولوژی تولید این آینه ها جهت دستیابی به عملکرد نوری بالا توسعه

یافته است. در حالت ایده آل، آینه‌ها باید ارزان و با دوام بوده و نیاز چندانی به نگهداری نداشته باشند. تحت شرایط سخت بیابان، انتظار می‌رود آینه‌ها حداقل ۲۰ سال دوام بیاورند. طبق آخرین تکنولوژی‌ها، قدرت بازتاب آینه‌ها بین ۹۳ تا ۹۵ درصد است و انتظار می‌رود بین ۲۰ تا ۲۵ سال بدون تخریب، دوام بیاورند. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده است، بازتاب دهنده‌های اصلی (میدان آینه‌ها) می‌توانند صاف یا منحنی باشند. بازتابنده‌های مسطح ارزان قیمت هستند، اما تلفات نوری بالاتری را ایجاد می‌کنند. آینه‌های خمیده شکل پارابولیکی دارند و می‌توانند بازتابده نوری کلی را افزایش دهند. اما بازتابنده‌های خمیده به دلیل نیاز به آینه‌های خمیده هزینه ساخت بیشتری دارند [۳].



شکل ۴. بازتاب دهنده‌های اولیه فرنل خطی - آینه‌های مسطح (چپ)، آینه‌های خمیده (راست) [۴].

بازتابنده ثانویه

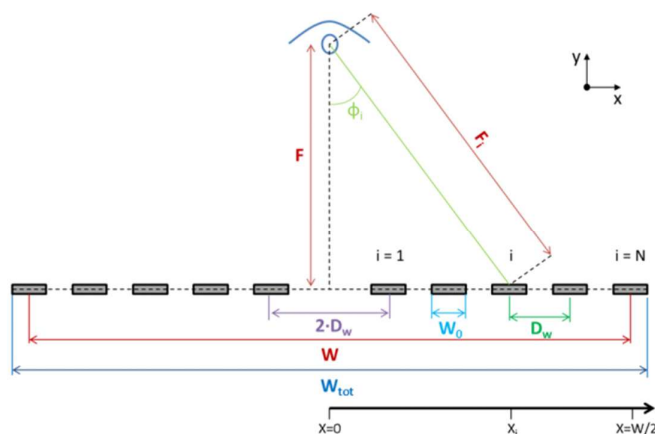
شکل طراحی بر اساس اصول اپتیکی و تصویرسازی تمامی پرتوهای بازتاب بر لوله جاذب انجام می‌گیرد. با استفاده از این کار، مکان هندسی کلیه نقاطی که بازتابش پرتوهای ورودی از آینه‌های اولیه روی لوله‌ی جاذب است، بصورت یک زوج سهموی بدست خواهد آمد. که در ادامه توضیح داده خواهد شد. جاذب در کانون پرتوهای منعکس شده از آینه‌های اصلی قرار گرفته است. متداول‌ترین نوع گیرنده تک لوله‌ای دوجداره، که شامل آینه یا بازتابنده پارابولیک به همراه لوله جاذب از جنس فلز است. لایه بیرونی آن پوششی بسیار نازک از جنس فلزی با ضریب جذب بالا دارد در نهایت یک پوشش شیشه‌ای به دور لوله جاذب کشیده شده که از هدر رفت انرژی جلوگیری کند بین پوشش و جاذب می‌توان با سیال گازی مانند آرگون پر کرد.

مدل سازی ریاضی اساسی فرنل خطی

بازتابنده های فرنل خطی معمولاً ۲-۳ متر بالاتر از بازتاب کننده اولیه قرار دارد. در فرنل خطی هدف به حداکثر رساندن راندمان نوری و بهینه سازی متغیرها است. به این منظور، عرض بازتابنده اصلی، فاصله بین بازتابنده های اولیه و فاصله کانونی به عنوان پارامترهای بهینه سازی در نظر گرفته می شود.

مدل توسعه یافته پیشنهادی

مدل مناسب برای یک هندسه فرنل معمولی در شکل ۵ با جزئیات ارائه شده است. این طرح از کلکتور فرنل دارای آینه های اولیه صاف با عرض (W_0) و فاصله بین مراکز آینه (D_w) است. استفاده از آینه های مسطح یک فرض اساسی از این کار است. علاوه بر این، فرض بر این است که فاصله بین دو آینه مرکزی ($2 * D_w$) است. همچنین باید اظهار داشت که شکاف بین آینه های اولیه یکسان است و این نیز ساده سازی مدل مورد بررسی است. با این حال، تغییر شکافها زیاد نیست بنابراین این فرض منطقی است. فاصله کانونی (F) و فاصله هر آینه (F_i) و زاویه (ϕ_i) نیز پارامترهای مهم مدل توسعه یافته هستند. گیرنده به عنوان جاذب لوله ای با یک بازتابنده ثانویه سهموی به تصویر کشیده شده است.



شکل ۵ نمایی از هندسه و زوایای مورد استفاده در طراحی یک سامانه فرنل خطی [۳].

با استفاده از شکل ۵ پارامترهای طراحی به صورت زیر تعریف می شوند. عرض کلی کلکتور از رابطه ۱ قابل محاسبه است [۳].

$$W_{tot} = W + W_0 \quad (1)$$

که در آن W_0 عرض آینه و W در مدل سازی فعلی عرض جمع کننده، اصلی ترین پارامتر مورد بررسی است در کل می توان نوشت:

$$W = 2.N.D_w \quad (2)$$

مقدار N برابر با شماره آینه ها و D_w فاصله ی بین مراکز آینه ها است. محل هر آینه (X_i) به شرح زیر محاسبه می شود:

$$X_i = i.D_w \quad (3)$$

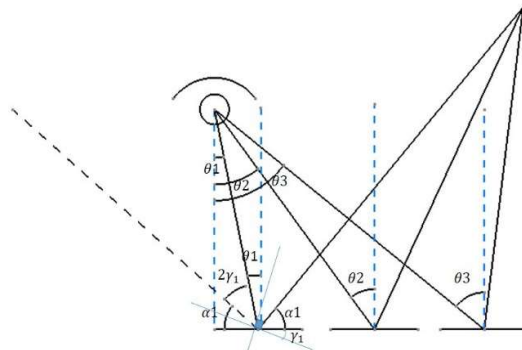
فاصله هر آینه تا جاذب (F_i) با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می شود:

$$F_i = \sqrt{F^2 + (i.D_w)^2} \quad (4)$$

مقدار F برابر با فاصله عمودی آینه ها تا جاذب است. زاویه (ϕ_i) را می توان با رابطه ۵ بیان کرد:

$$\cos(\phi_i) = \left[1 + i^2 \cdot \left(\frac{D_w}{F} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

با توجه به شکل ۶ برای محاسبه دقیق مقدار چرخش هر آینه با توجه به زاویه تابش خورشیدی از روابط ۷ و ۶ استفاده می شود.



شکل ۶ طرح بندی چرخش آینه های اولیه برای متمرکز کردن بازتاب پرتو بر دهانه جاذب.

در رابطه ۶، α_i زاویه ی تابش خورشید نسبت به افق است. δ_i زاویه ی هر آینه نسبت به افق و θ_i زاویه ی مرکز هر آینه نسبت به نقطه ی کانونی مورد نظر (همان لوله ی جاذب) است. (مبنای مثبت و منفی بودن i ها بر اساس زاویه تابش خورشید است. اگر زاویه تابش کمتر از 90° ، i های سمت راست محور مرکزی مثبت و در غیر این صورت اندیس های i سمت چپ محور مثبت هستند).

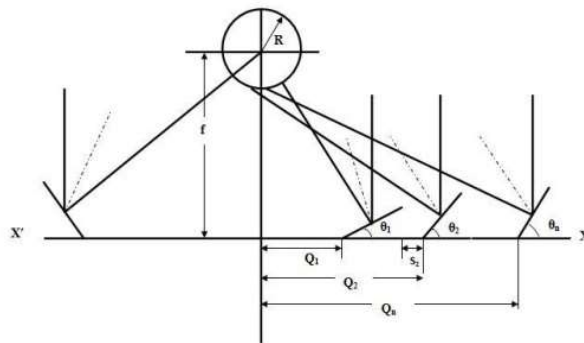
$$\alpha_i + 2\delta_i + \theta_i = \frac{\pi}{2} \quad (6) \quad (\text{برای } i \text{ های مثبت})$$

$$\alpha_i + 2\delta_i - \theta_i = \frac{\pi}{2} \quad (7) \quad (\text{برای } i \text{ های منفی})$$

یکی از المان‌های مهم بررسی فرنل خطی میتوان به بازدهی نوری اشاره کرد که هرچقدر بازده نوری بیشتر باشد میتواند بازده کلی سامانه را افزایش دهد. بدین منظور می‌توان از تعداد بیشتری آینه (بازتابنده اولیه) استفاده کرد.

روش طراحی:

شکل ۷ طرح تابش عمودی کلکتور فرنل خطی را نمایش می‌دهد که به صورت تعدادی آینه موازی از هم قرار گرفته‌اند. طول آینه‌ها و تعداد آن‌ها بسته به نیاز حرارتی متغیر است. عرض آینه‌ها باید طوری انتخاب شود که با بازتاب روی بازتابنده‌ی ثانویه موجب اتلاف پرتوی نوری نشود. فاصله‌ی بین آینه‌ها باید طوری انتخاب شود که فرایند سایه زنی روی آینه‌های مجاور اتفاق نیفتد. شکل زیر نمایی از ساختمان پیشنهادی یک فرنل خطی را نمایش می‌دهد، که برای طراحی سامانه‌ی بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۷ هندسه تابش عمودی بر روی آینه‌ها و فاصله‌های بین آینه‌ها برای جلوگیری از پدیده‌ی سایه زنی در بازتابنده‌ی فرنل خطی.

با استفاده از رابطه ۸ میتوان مقادیر θ_n ، زاویه هر آینه نسبت به خط افق را محاسبه کرد [۶].

$$\theta_n = \frac{1}{2} \left[\left(Q_n + \left(\frac{W}{2} \right) \cos \theta_n \right) / \left(F - \left(\frac{W}{2} \right) \sin \theta_n \right) \right] \quad (8)$$

در رابطه ۸ مقادیر W اندازه آینه‌ها، F فاصله عمودی آینه‌ها تا جاذب است. مقدار Q_n ، فاصله هر آینه تا مرکز سامانه مورد نظر است که با عبارت ۹ تعریف می‌شود.

$$Q_n = Q_{n-1} + W \sin \theta_{n-1} + S_n \quad (9)$$

برای جلوگیری از پدیده‌ی سایه زنی پارامتری به نام S_n ، رابطه ۱۰ تعریف می‌شود. که برابر با فاصله‌ای است که با کمترین اثر سایه زنی از آینه‌ی قبل میتوان آینه‌ی بعدی را نصب کرد.

$$S_n = W \sin \theta_{n-1} \cdot \tan(2\theta_n + \alpha) \quad (10)$$

S_n ، فاصله‌ی بهینه بین آینه‌ها برای جلوگیری از سایه زنی و افزایش تلفات نوری است.

بازده نوری

بازده نوری به وسیله‌ی پارامترهایی مانند ضریب جذب گیرنده (α)، ضریب بازتاب آینه‌ها (ρ)، ضریب انتقال پوشش (τ) و عامل رهگیری (γ) محاسبه می‌شود. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن تغییر بازده نوری برای موقعیت‌های مختلف خورشید، از یک پارامتر اضافی، اصلاح کننده زاویه بازتاب خورشید (IAM یا K) استفاده می‌شود. بنابراین، می‌توان نوشت [۳]:

$$\eta_{opt} = a \cdot \tau \cdot \rho \cdot \gamma \cdot k \quad (11)$$

a ضریب جذب گیرنده، τ ضریب انتقال پوشش، عامل رهگیری γ به عنوان کسری از تابش منعکس شده در جاذب به کل تابش منعکس شده تعریف می‌شود، k نیز اصلاح کننده زاویه بازتاب خورشیدی است.

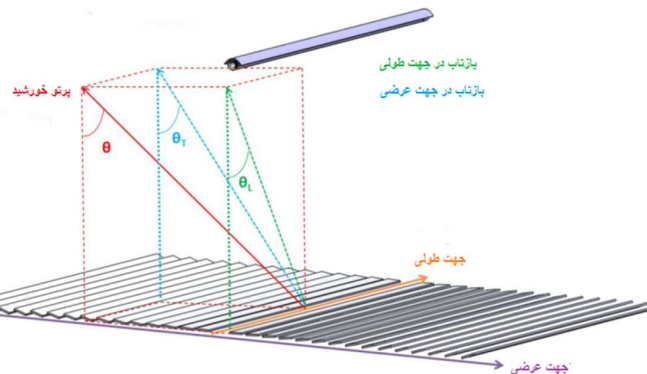
اصلاح کننده های زاویه بازتاب

برای یک آرایش شمال - جنوب، زوایای اصلاح عرضی و طولی با روابط زیر قابل محاسبه هستند. معمولاً اصلاح کننده زاویه بازتاب به دو نوع تقسیم می‌شود، یکی برای جهت طولی (KL) و دیگری برای جهت عرضی (KT)، (شکل ۸). این دو مقدار برای محاسبه کاهش بازده نوری در ارتباط با انحراف زاویه تابش خورشیدی در سطوح عرضی و طولی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، مطابق رابطه ۱۲ می‌توان نوشت:

$$\eta_{opt}(\theta_L, \theta_T) = K(\theta_L, \theta_T) \cdot \eta_{opt.max} \quad (12)$$

در رابطه ۱۲ مقدار η_{opt} بازده اپتیکال برابر است با مقدار بیشینه بازده نوری در اصلاح کننده زاویه بازتاب. که حداکثر بهره‌وری نوری برای زاویه بازتاب صفر حاصل می‌شود ($\theta = \theta_L = \theta_T = 0$ درجه).

$$\eta_{opt.max} = \eta_{opt}(\theta_L = 0, \theta_T = 0)$$



شکل ۸ زاویه بازتاب در راستای طولی θ_L و راستای عرضی θ_T [۱].

⁴ Incident Angle Modifier

اصلاح کننده زاویه تابش را می توان با ضرب اصلاح کننده زاویه تابش در جهت عرضی $IAM(\theta)$ و اصلاح کننده زاویه تابش در جهت طولی $IAM(L)$ محاسبه کرد.

$$IAM(\theta) = IAM(\theta_L) \cdot IAM(\theta_T) \quad (13)$$

برای محاسبه دقیق مقدار LAM طولی میتوان از رابطه ۱۴ استفاده کرد:

$$K_L(\theta_L) = \cos(\theta_L) \cdot \frac{F}{L} \cdot \frac{1}{\cos(\varphi_m)} = \sqrt{1 + \left(\frac{w}{4F}\right)^2} \quad (14)$$

در رابطه ۱۴ مقدار θ_L برابر است با زاویه تابش در جهت طولی است. مقدار L برابر با طول کلکتور است. مقدار φ_m برابر با زاویه ی آینه ها است. مقدار اصلاح زاویه عرضی از رابطه ۱۵ محاسبه می شود.

$$K_t(\theta_t) = \cos\left(\frac{\theta_t}{2}\right) - \frac{w/4}{F + \sqrt{F^2 + (w/4)^2}} \sin\left(\frac{\theta_t}{2}\right) \quad (15)$$

مقدار θ_t برابر است با زاویه تابش در جهت عرضی است. پارامتر D_w فاصله ی بین مراکز آینه ها است. باتوجه به رابطه بالا مقدار θ از رابطه ۱۶ و ۱۷ بدست می آید.

$$\theta_T = \tan^{-1}\left(\frac{\sin \gamma_s}{\tan \alpha_s}\right) \quad (16)$$

$$\theta_L = \sin^{-1}(\cos \gamma_s \cdot \cos \alpha_s) \quad (17)$$

در رابطه بالا زاویه تابش خورشید نسبت به سطح افق (α) و زاویه سمت خورشید یا زاویه آزیموت (γ) است. می توان به صورت تقریبی از رابطه ۱۸ برای محاسبه ضریب اصلاح تابش خورشیدی استفاده کرد [۵].

$$k_{IAM} = \cos(\theta_z) \quad (18)$$

پارامتر θ_z زاویه تابش خورشیدی است. اعتبارسنجی بین مدل و نتایج تجربی باعث می شود که دقت این روش در حد قابل قبولی باشد. علاوه بر این، مهم است که سامانه ردیابی برای گرفتن تلفات نوری ناچیز ناشی از زاویه خورشیدی عرضی، به اندازه کافی دقیق باشد. کسینوس زاویه تابش خورشیدی از رابطه ۱۹ محاسبه می شود.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cos \omega \quad (19)$$

با استفاده از مشاهدات آزمایشی می توان میانگین ضریب اصلاح کننده تابش روزانه را به صورت زیر تخمین زد.

$$k_{mean-IAM} = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \frac{\sin(0.8 * \omega_s)}{0.8 * \omega_s} \quad (20)$$

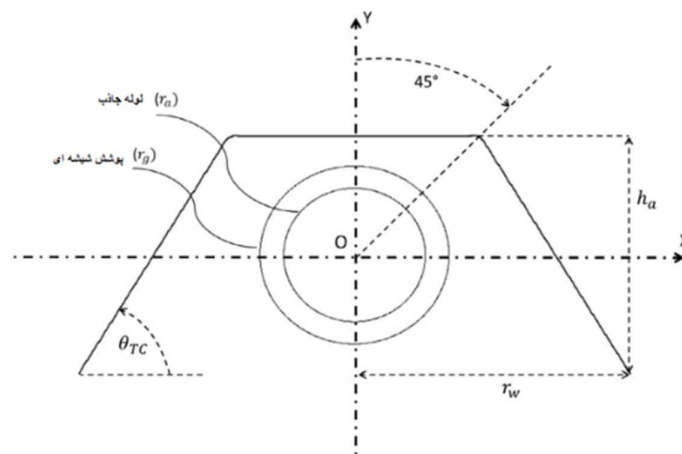
در رابطه ۲۰، ϕ عرض جغرافیایی محل، δ زاویه انحراف، ω زاویه ساعت خورشیدی، و ω_s زاویه ساعت غروب خورشیدی است.

بازتابنده های ثانویه

انواع بسیاری از طراحی بازتابنده‌های ثانویه وجود دارد مثل نوع ذوزنقه ای، پارابولیک و پروانه ای، همراه با لوله های جاذب تخلیه شده که گزینه‌های معمول برای بهره برداری از تابش خورشیدی از بازتاب دهنده‌های اولیه هستند.

بازتابنده های ذوزنقه ای

طرح ذوزنقه‌ای به دلیل طراحی ساده و سهولت در ساخت و ساز بسیار مشهور است. این طرح ممکن است با تعدادی لوله جاذب مورد استفاده قرار گیرد که برای بهره برداری در دماهای بالا (تا ۴۰۰-۵۰۰ درجه سانتیگراد) است. با این حال، استفاده از لوله های تخلیه شده منفرد منجر به ضریب رهگیری زیاد نمی‌شود. بنابراین استفاده از بازتاب دهنده ثانویه معمولاً ترجیح داده می‌شود. هم چنین استفاده از گیرنده لوله تخلیه شده به همراه یک متمرکز کننده ثانویه راهی مؤثر است که توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته و ممکن است عملکرد بیشتری در گیرنده های چند لوله داشته باشد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹ طرح کلی بازتابنده ثانویه ذوزنقه‌ای همراه با پارامتر های مورد نیاز طراحی

طراحی هندسی شکل بازتابنده ثانویه ذوزنقه‌ای با رابطه ۲۱ تعریف می‌شود [۸].

$$x * \tan(\theta_{TC}), \quad -r_w \leq x \leq -\frac{h_a}{\tan(\theta_{TC})} \quad (21)$$

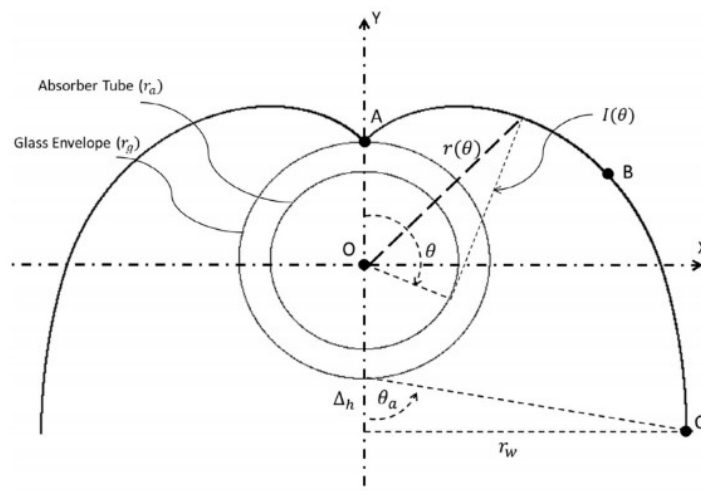
Y=

$$\left. \begin{array}{l} h_a, \\ (r_w - x) * \tan(\theta_{TC}), \end{array} \right\} \begin{array}{l} -\frac{h_a}{\theta_{TC}} < x < \frac{h_a}{\tan(\theta_{TC})} \\ \frac{h_a}{\tan(\theta_{TC})} \leq x \leq r_w \end{array}$$

در اینجا، r_w عرض دیافراگم ثانویه، h_a ارتفاع بازتابنده ثانویه، و θ_{TC} زاویه تمایل بخش جانبی شکل است.

طراحی بازتابنده پارابولیک مرکب

طراحی پارابولیک معمولاً در کلکتورهای ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرد و به دلیل فواید پذیرش نور از محدوده زاویه‌ای وسیع، گزینه‌ی خوبی برای بازتاب ثانویه خطی فرنل است. این طرح توسط دو منحنی جداگانه تعریف می‌شود: یک درگیری معمولی در نزدیکی جاذب و دیگری که لبه‌ها را مشخص می‌کند با استفاده از مختصات قطبی همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، مشخصات کلی طرح را می‌توان اینگونه تعریف نمود [۸].



شکل ۱۰ هندسه بازتابنده طرح پارابولیک مرکب [۸].

مکان هندسی نقاط مورد نظر تا مرکز جاذب $r(\theta)$ از رابطه ۲۲ محاسبه می‌شود.

$$r(\theta) = \frac{r_a}{\cos(\theta - \tan^{-1}(\frac{I_{\theta_0}}{r_a}))} \quad (22)$$

شعاع لوله جاذب r_a است، θ زاویه مختصات قطبی است و I_{θ} فاصله مماس از جذب کننده تا شکل است. درگیری ایده آل بین لوله جاذب و طرح باید طوری باشد تا کمترین فاصله را دارا باشد، اما به دلیل داشتن پوشش شیشه‌ای، معمولاً شکافی بین جاذب و طرح وجود دارد. این مورد باید توسط یک فاکتور θ_0 تنظیم شود. اگر هیچ شکافی وجود نداشته باشد، مقدار θ_0 برابر با صفر خواهد بود. طرح کلی را میتوان با روابط ۲۳ معرفی نمود.

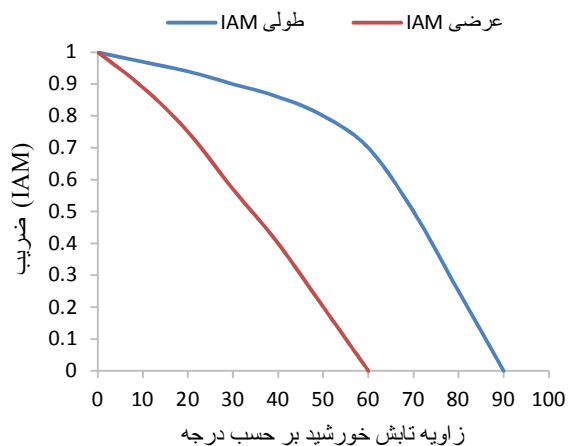
$$I_{\theta} = \begin{cases} r_a(\theta + \theta_0) & , 0 \leq \theta \leq \theta_a + \frac{\pi}{2} \\ \frac{r_a(\theta + \theta_a + \frac{\pi}{2} + 2\theta_0 - \cos(\theta - \theta_a))}{1 + \sin(\theta - \theta_a)} & , \theta_a + \frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{3\pi}{2} - \theta_a \end{cases} \quad (23)$$

$$\theta_a = \sqrt{\frac{r_g^2}{r_a^2} - 1} - \cos^{-1} \frac{r_a}{r_g} \quad (24)$$

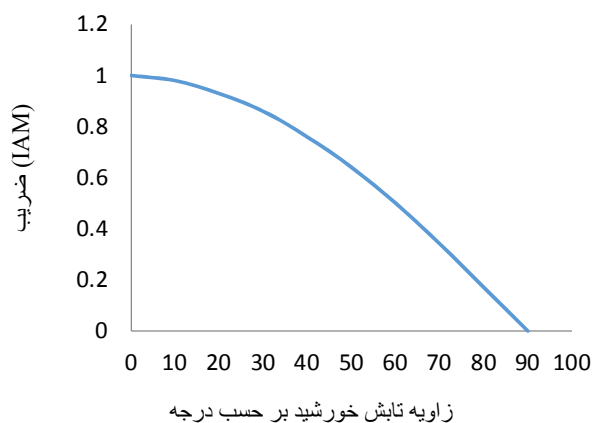
از روابط ذکر شده، مختصات قطبی را می‌توان در امتداد محور x و y به مختصات دکارتی تبدیل کرد تا شکل نهایی ایجاد شود.

بررسی نتایج

برای محاسبه بازده نوری و بدست آوردن مقادیر واقعی نیاز به محاسبه ضرایب اصلاح زاویه تابش خورشیدی داریم. همانطور که در شکل های ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده است. میزان اصلاح کننده زاویه بازتاب خورشید از روابط (۱۳ تا ۲۰) بدست می‌آید.



شکل ۱۱ مقادیر IAM یا k به ازای مقادیر زاویه خورشیدی متفاوت.



شکل ۱۲ تغییر IAM(T) را برای زاویه خورشیدی متفاوت θ_i نشان می دهد.

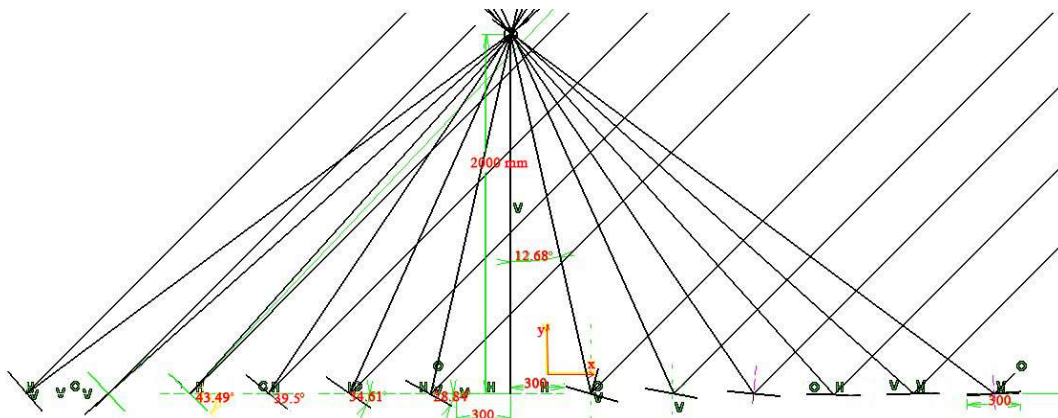
برای انجام مطالعات نمونه‌ی ۱۲ آینه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. زاویه تابش خورشید (α) برابر با ۴۵ درجه و هم چنین مقدار (F) برابر با ۲ متر در نظر گرفته شده است. مقادیر جدول ۱ از روابط ۱ تا ۷ استفاده شده. عملکرد نوری سامانه در شکل ۱۳ با توجه به مقادیر جدول امورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۱ مشخصات سامانه فرنل برای متمرکز سازی بهینه تابش خورشید.

شماره آینه (i)	محل هر آینه (Xi)	فاصله (Fi)	زاویه (θ_i)	$2\delta_i$ زاویه چرخش	δ_i زاویه آینه نسبت به افق
۶	۲/۷۰	۳/۳۶	۵۳/۴۱	-۸/۴۷	-۴/۲۳

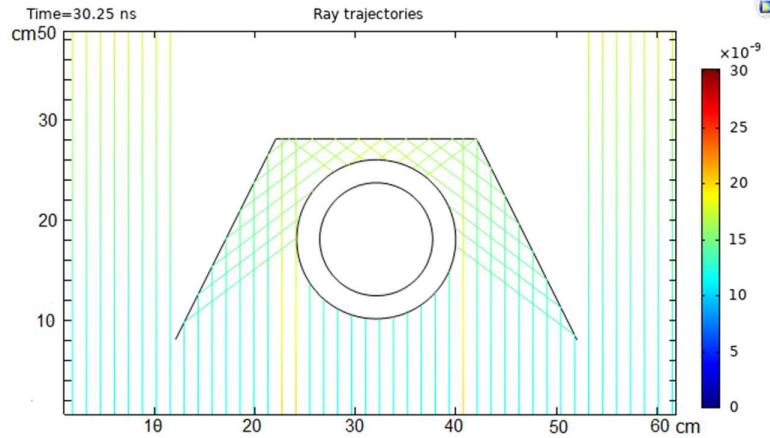
۵	۲/۲۵	۳/۰۱	۴۸/۳۶	-۳/۳۶	-۱/۶۸
۴	۱/۸۰	۲/۶۹	۴۱/۹۸	۳/۰۱	۱/۵۰
۳	۱/۳۵	۲/۴۱	۳۴/۰۱	۱۰/۹۸	۵/۴۹
۲	۰/۹	۲/۱۹	۲۴/۲۲	۲۰/۷۷	۱۰/۳۹
۱	-۰/۴۵	۲/۰۵	۱۲/۶۴	۳۲/۳۱	۱۶/۱۶
۰	۰	۰	۰	۰	۰
-۱	-۰/۴۵	۲/۰۵	۱۲/۶۴	۵۷/۶۸	۲۸/۸۴
-۲	۰/۹	۲/۱۹	۲۴/۲۲	۶۹/۲۲	۳۴/۶۱
-۳	۱/۳۵	۲/۴۱	۳۴/۰۱	۷۹/۰۱	۳۹/۵۰
-۴	۱/۸۰	۲/۶۹	۴۱/۹۸	۹۶/۹۸	۴۳/۴۹
-۵	۲/۲۵	۳/۰۱	۴۷/۳۶	۹۳/۳۶	۴۹/۶۸
-۶	۲/۷۰	۳/۳۶	۵۳/۴۱	۹۸/۴۷	۴۹/۲۳

در شکل ۱۳ تنظیمات آینه‌ها را با توجه به مقادیر جدول ۱ نمایش داده شده است. طرح بندی کلی بصورتی است که بازتابش نور توسط آینه‌ها در نقطه‌ی کانونی جمع شود. این طرح هدر رفت نوری سامانه را به حداقل می‌رساند. قرار گیری یک هندسه‌ی بازتاب ثانویه در نقطه‌ی کانونی سبب بهبود کارایی سامانه می‌شود.



شکل ۱۳ عملکرد نوری بازتابنده خطی فرنل دارای تعداد ۱۲ آینه‌ی بازتابنده اولیه.

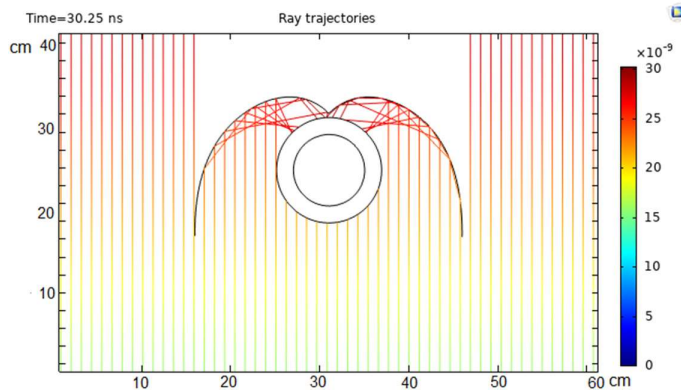
در هنگام طراحی هندسه بازتابنده ثانویه‌ی دوزنقه‌ای، ارتفاع باید بگونه‌ای انتخاب شود تا تعداد پرتوهای بازتاب جذب نشده به حداقل برسد. زوایای دوزنقه باید از مبدأ زاویه ۴۵ درجه داشته باشد تا پرتوهای از دست رفته به حداقل برسد. شکل ۱۴ انجام شبیه‌سازی طرح فوق را در نرم افزار کامسول نمایش می‌دهد.



شکل ۱۴ بررسی و شبیه سازی بازتاب نوری طرح دوزنقه‌ای در محیط نرم افزار کامسول.

طرح پارابولیک مرکب:

با توجه به شبیه سازی نرم افزاری شکل ۱۵ می‌توان قسمت بالایی طرح که با محور تقارن مرکزی شکل موازی است حذف گردد، چرا که علاوه بر کاهش چشم گیر صفحات منعکس کننده، عملکرد سامانه تغییر آن چنانی نخواهد داشت. در این پژوهش، کلکتور به شکل خطی بوده و جهت گیری کلکتور نیز به نحوی است که همیشه رو به جنوب قرار می‌گیرد و با زاویه تمایل مشخص تنظیم شده است. طرح فوق مورد بررسی نوری قرار گرفته که در شکل زیر مشاهده می‌شود.

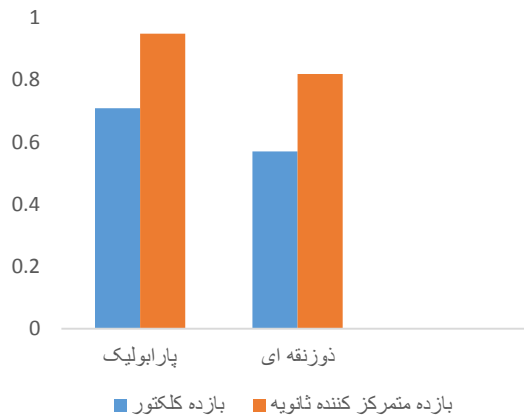


شکل ۱۵ بررسی و شبیه سازی بازتاب نوری طرح متمرکز کننده پارابولیک (CPC) مرکب در محیط نرم افزار کامسول

⁵ Compound parabolic concentrator

عرض متمرکز کننده ثانویه یک پارامتر متغیر طراحی است. که به همراه ارتفاع آن به مقدار قطر دریافت کننده و زاویه پذیرش وابسته است. از سوی دیگر طول کلکتور تاثیر مستقیمی بر روی پهنای ورودی نور به دستگاه. جنس لوله‌ی دریافت کننده مس صنعتی یا فولاد با ابعاد استاندارد انتخاب می‌شود. که با رنگ مشکی ساده مات یا لعاب‌هایی پوشیده شده است. در طراحی دو قطعه‌ی آب بندی برای دو دهانه‌ی ورودی لوله به کلکتور در نظر گرفته می‌شود تا وجود هر گونه اتلاف حرارت مستقیمی بین لوله دریافت کننده و هوای بیرون را حذف کند. برای صفحات منعکس کننده نیز از ورق استیل براق استفاده می‌شد.

مقایسه دو طرح ثانویه (سه‌موی و دوزنقه‌ای) مورد ارزیابی واقع شدند. با توجه به فاکتور رهگیری پرتو و کارایی کلی نوری جمع کننده همانطور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، طراحی سه‌موی عمل کرد نوری بهتری را نشان داده است.



شکل ۱۶. مقایسه عامل رهگیری ثانویه و بازده نوری کلکتور برای طرح مختلف بازتابنده ثانویه. ۹۴/۸٪ برای طرح پارابولیک و ۸۱/۴٪ برای طرح دوزنقه است [۸].

موردی که برای بررسی سامانه در نظر گرفته می‌شود بررسی بازدهی نوری سامانه فرنل خطی است. یافتن بازدهی نوری برای بدست آوردن بازده حرارتی سامانه و تعیین مقدار کار مفید دستگاه دارای اهمیت است. بدین منظور طبق رابطه ۱۱ متغیرهای مورد نیاز در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۲ مقادیر مربوط به بازده نوری در طراحی فرنل خطی

پارامتر	مقادیر
---------	--------

۰/۹۲	α ضریب جذب گیرنده
۰/۹۵	τ ضریب انتقال پوشش
۰/۹۴	ρ ضریب بازتاب آینه
۰/۹۵	γ عامل رهگیری
۰/۹۲	k اصلاح کننده زاویه بازتاب خورشید

با توجه به زاویه تابش خورشیدی نتایج در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. بیشینه بازده نوری سامانه برای ضریب متوسط اصلاح زاویه بازتاب به ازای زاویه بازتابش صفر درجه خورشید ۹۲ درصد، برابر با ۷۱ درصد محاسبه میشود.

نتیجه گیری

یک مدل ساده تحلیل شده و تلفات اصلی نوری در نظر گرفته شده است. ضرایب اصلاح زاویه بازتاب در جهت های طولی و عرضی محاسبه شده و در نهایت، عبارات تحلیلی ارائه می‌شوند.

۱. مدل های پیشنهادی بر اساس استفاده از پارامترهای اولیه به عنوان عرض جمع کننده، طول، فاصله کانونی، تعداد آینه ها، عرض آینه و فاصله بین آینه ها است. که میتوان در طراحی جمع کننده های فرنل خطی از آن بهره برد.

۲. مدل توسعه یافته با نتایج حاصله برای بازتابنده فرنل خطی مختلف قابل اجرا است. از این مدل می توان برای ارزیابی سریع و دقیق بازتابنده فرنل خطی استفاده کرد. علاوه بر این، می توان برای بهینه سازی با استفاده از روابط اولیه به عنوان متغیرهای بهینه سازی استفاده کرد.

۳. مدل توسعه یافته می تواند در سایر نرم افزار های شبیه سازی استفاده شود تا عملکرد نوری بازتابنده فرنل خطی را با دقت رضایت بخشی پیش بینی کند.

۴. ضرایب اصلاح زاویه تابش پیشنهادی با روابط تجربی تعیین و می توان در بررسی این نوع جمع کننده ها برای دست یابی به بازدهی نوری دقیق تر استفاده شود.

۵. استفاده از بازتابنده های ثانویه سبب افزایش چشمگیر بازده نوری سامانه می شود. در بین طرح های بیان شده نوع پارابولیک مناسب تر ارزیابی می شود.

۶. بطور کلی می توان از روابط بخش هندسه ی کلکتور فرنل خطی، برای طراحی کلی سامانه استفاده کرد. و با توجه به زوایای خورشیدی مقدار زاویه انعکاس هر آینه را تعیین نمود. می توان از مدل های عددی برای محاسبه ی زاویه تابش خورشیدی در هر ساعت استفاده کرد. میزان بازدهی نوری بدست آمده وابسته به پارامتر های فیزیکی کلکتور است. استفاده از

آینه‌های با ضریب نشر بیشتر سبب بهبود کارایی کلکتور فرنل خواهد شد. همچنین استفاده از طرح‌های بازتابنده ثانویه کمک شایانی به بهبود کارایی نوری کلکتور خواهد داشت.

مراجع

1. Ashouri, M., Vandani, A.M.K., Mehrpooya, M., Ahmadi, M.H. and Abdollahpour, A., 2015. Techno-economic assessment of a Kalina cycle driven by a parabolic Trough solar collector. *Energy conversion and management*, 105, pp.1328-1339.
2. Bellos, E., 2019. Progress in the design and the applications of linear Fresnel reflectors—A critical review. *Thermal Science and Engineering Progress*, 10, pp.112-137.
3. Bellos, E. and Tzivanidis, C., 2018. Development of analytical expressions for the incident angle modifiers of a linear Fresnel reflector. *Solar Energy*, 173, pp.769-779.
4. Benyakhlef, S., Al Mers, A., Merroun, O., Bouatem, A., Boutammachte, N., El Alj, S., Ajdad, H., Erregueragui, Z. and Zemmouri, E., 2016. Impact of heliostat curvature on optical performance of Linear Fresnel solar concentrators. *Renewable Energy*, 89, pp.463-474.
5. Eroglu, M., Dursun, E., Sevencan, S., Song, J., Yazici, S. and Kilic, O., 2011. A mobile renewable house using PV/wind/fuel cell hybrid power system. *International journal of hydrogen energy*, 36(13), pp.7985-7992.
6. Gouthamraj, K., Rani, K.J. and Satyanarayana, G., 2013. Design and analysis of rooftop linear Fresnel reflector solar concentrator. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(11).
7. Hachicha, A.A., Yousef, B.A., Said, Z. and Rodríguez, I., 2019. A review study on the modeling of high-temperature solar thermal collector systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, pp.280-298.
8. Hack, M., Zhu, G. and Wendelin, T., 2017. Evaluation and comparison of an adaptive method technique for improved performance of linear Fresnel secondary designs. *Applied Energy*, 208, pp.1441-1451.
9. Huang, F., Li, L. and Huang, W., 2014. Optical performance of an azimuth tracking linear Fresnel solar concentrator. *Solar energy*, 108, pp.1-12.
10. Kalogirou, S.A., 2009. Solar thermal power systems. *Solar Energy Engineering*, pp.521-551.
11. Lin, M., Sumathy, K., Dai, Y.J., Wang, R.Z. and Chen, Y., 2013. Experimental and theoretical analysis on a linear Fresnel reflector solar collector prototype with V-shaped cavity receiver. *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2), pp.963-972.

12. Loni, R., Kasaeian, A.B., Asli-Ardeh, E.A. and Ghobadian, B., 2016. Optimizing the efficiency of a solar receiver with tubular cylindrical cavity for a solar-powered organic Rankine cycle. *Energy*, 112, pp.1259-1272.
13. Montes, M.J., Abbas, R., Muñoz, M., Muñoz-Antón, J. and Martínez-Val, J.M., 2017. Advances in the linear Fresnel single-tube receivers: hybrid loops with non-evacuated and evacuated receivers. *Energy Conversion and management*, 149, pp.318-333.
14. Nixon, J.D., Dey, P.K. and Davies, P.A., 2013. Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology. *Journal of Cleaner Production*, 59, pp.150-159
15. Prasad, G.C., Reddy, K.S. and Sundararajan, T., 2017. Optimization of solar linear Fresnel reflector system with secondary concentrator for uniform flux distribution over absorber tube. *Solar Energy*, 150, pp.1-12
16. Pauletta, S., 2016. A solar Fresnel collector based on an evacuated flat receiver. *Energy Procedia*, 101, pp.480-487.
17. Qiu, Y., He, Y.L., Cheng, Z.D. and Wang, K., 2015. Study on optical and thermal performance of a linear Fresnel solar reflector using molten salt as HTF with MCRT and FVM methods. *Applied energy*, 146, pp.162-173.
18. Regin, A.F., Solanki, S.C. and Saini, J.S., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(9), pp.2438-2458.
19. Sidik, N.A.C., Samion, S., Ghaderian, J. and Yazid, M.N.A.W.M., 2017. Recent progress on the application of nanofluids in minimum quantity lubrication machining: A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, pp.79-89.
20. Tiwari, G.N., 2002. *Solar energy: fundamentals, design, modelling and applications*. Alpha Science Int'l Ltd.
21. Tiwari, S., Tiwari, G.N., 2016. Thermal analysis of photovoltaic-thermal (PVT) single slope roof integrated greenhouse solar dryer. *Sol. Energy* 138, 128–136.
22. Yang, F., Itskhokine, D., Benmarraze, S., Benmarraze, M., Hofer, A., Lecat, F. and Ferrière, A., 2015. Acceptance testing procedure for Linear Fresnel Reflector solar systems in utility-scale solar thermal power plants. *Energy Procedia*, 69, pp.1479-1487.
23. Xu, C., Chen, Z., Li, M., Zhang, P., Ji, X., Luo, X. and Liu, J., 2014. Research on the compensation of the end loss effect for parabolic trough solar collectors. *Applied energy*, 115, pp.128-139.

Investigation of geometric and optical parameters of solar thermal systems based on linear Fresnel concentrators

Saeid noroozi^{1*}, ali maleki², shahin besharati³

1. MSc.Student, Mechanical Engineering of Biosystems. Shahrkord University Iran
2. Association, Professor, Mechanical Engineering of Biosystems. Shahrkord University Iran
3. Lecture, Mechanical Engineering of Biosystems. Shahrkord University Iran

Abstract

The new generation of solar collectors are concentrated solar reflectors. Among these, we can name linear Fresnel reflectors. Due to the simplicity of the overall design, low cost and optimal use of land area for installation, are considered as the main design. If a secondary reflector is used, they have a high optical density ratio. The most important problem of linear Fresnel reflectors is high optical losses compared to parabolic trough collector. In order to solve this problem, solutions have been proposed. The study is a review of the linear Fresnel reflector design and the determination of the optimal parameters in the design of a system with maximum optical efficiency. For this purpose, a linear Fresnel experimental system with an area of 18 square meters has been considered for analysis. This type of collector causes a large change in the flux of solar radiation in the focal line of the absorber. Therefore, structures for primary mirrors, placement and proper angles with the aim of focusing and distributing the radiation flux more uniformly on the absorber are introduced and the inclination angle and radius of curvature of Fresnel mirrors are investigated. , Designs for the secondary concentrator are presented, which is accompanied by the concept of solar position tracking. The results show that the proposed optimal design has the ability to achieve an maximum optical efficiency 71%, which will be competitive in comparison with the type of parabolic trough collector.

Key words: Linear Fresnel Reflectors, Linear Fresnel Collectors,

*Corresponding author

E-mail: saeidnoroozi@gmail.com