

اثر آینه ثابویه بر مقدار و توزیع شار ورودی لوله جاذب در متمرکزکننده‌های فرنل

علی مینائیان^{۱*}، علی اکبر رجبی^۲

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

a.minaeian@me.iut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

rajabi@cc.iut.ac.ir

چکیده: آینه‌های فرنل* یکی از جدیدترین سیستم‌های متمرکزکننده خورشیدی است که با هدف اولیه کاهش هزینه دریافت‌کننده‌های خورشیدی طراحی شده‌اند. هر کلکتور فرنل معمولاً از یک سری آینه تخت تشکیل شده است که کنار یکدیگر در نزدیکی سطح زمین قرار می‌گیرند و پرتوهای رسیده از طرف خورشید را به لوله یا صفحه دریافت‌کننده‌ای که در ارتفاع مشخصی قرار دارد، بازتاب می‌کنند. بسته به اندازه نسبی پهنای آینه‌ها و قطر لوله یا صفحه جاذب، مقداری از تابش بازتابیده شده هدر می‌رود. برای پیشگیری از این اتلاف می‌توان از یک آینه بازتابنده دوم در بالای دریافت‌کننده استفاده کرد. در این مقاله، اثر سه شکل هندسی متفاوت برای آینه بازتابنده دوم بر مقدار و توزیع شار ورودی لوله جاذب بررسی شده است. در یکی از این طرح‌ها یکنواختی بسیار خوبی برای شار تابشی لوله جاذب مشاهده شد و در طرحی دیگر بازده نوری بیشتری نسبت به دو طرح دیگر به دست آمد. با تغییر پارامترهای اصلی نیمرخ‌های مورد بررسی در یک برنامه رایانه‌ای، اثر آن‌ها بر مقدار و توزیع پرتوهای برخوردی با لوله جاذب بررسی و بهترین حالت انتخاب شده است.

واژه‌های کلیدی: کلکتور فرنل خطی، خورشیدی، شار تابشی، بازده اپتیکی، آینه ثابویه.

۱. مقدمه

انرژی برای بقای زندگی بشر و توسعه آن مسئله‌ای بسیار مهم و در بررسی‌های سیاسی و اقتصادی موضوعی کلیدی به‌شمار می‌آید [۱]. به‌منظور کاهش اثر مخرب استفاده از منابع رایج انرژی بر محیط‌زیست، می‌بایست توجه بیشتری به انرژی‌های تجدیدپذیر شود. انرژی خورشیدی علاوه بر اینکه برای محیط‌زیست هیچ‌گونه خطری ندارد، با توجه به کاهش روزافزون منابع سوخت فسیلی، می‌تواند در آینده بخش مهمی از انرژی مورد نیاز جهان را تأمین کند. اما متغیر بودن و نایک‌نواختی میزان انرژی خورشیدی دریافتی در نقاط مختلف زمین، مهم‌ترین چالش روبه‌روی این روش نوین است [۲].

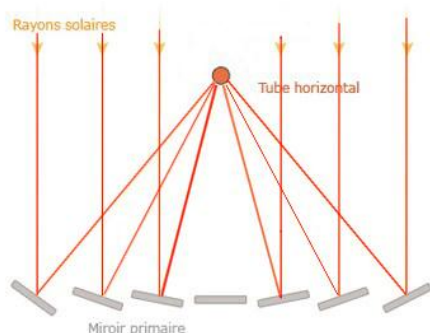
در حال حاضر بیش از ۹۹/۹٪ از $10^{27} \times 1/8$ وات انرژی‌هایی که به زمین می‌رسد، مستقیم یا غیرمستقیم از خورشید سرچشمه می‌گیرد. انرژی حاصل از تابش خورشید که در هر روز به زمین می‌رسد، حدود ۱۰۰ هزار برابر مقدار انرژی تولیدشده توسط همه نیروگاه‌های جهان است. با وجود این، می‌توان گفت که از نظر پتانسیل منابع، جهان کمبود انرژی ندارد و انرژی خورشید با مقدار تقریبی معادل ۲۰ هزار برابر مصرف کنونی بشر، به‌منظر می‌رسد که منبع مناسبی برای تأمین احتیاجات او باشد؛ به‌خصوص اینکه استفاده از آن هیچ‌گونه آلودگی محیطی و حرارتی به‌وجود نمی‌آورد [۳]. اما اشکال بزرگ در کاربرد انرژی خورشیدی، رقیق بودن، تناوبی بودن و ثابت نبودن مقدار تابش است. با این حال اگر راندمان تبدیل انرژی خورشید به انرژی مورد نیاز بشر را تنها ۱٪ در نظر بگیریم، ۵٪ سطح کره زمین برای تأمین تقاضای کل انرژی بشر کافی خواهد بود. با توجه به واقعیت‌هایی نظیر این، دانشمندان به‌سمت یافتن راه‌حلی برای حل مشکلات مذکور سوق داده می‌شوند. از جمله آن‌ها تمرکز نور خورشید روی یک سطح کوچک و استفاده از گرمای حاصل از آن است. امروزه این امکان در قالب نیروگاه‌های خورشیدی فراهم شده و در نقاط مختلف دنیا پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است.

در کشور ما از بین انرژی‌های نو، انرژی خورشیدی و انرژی حاصل از باد بیش از سایر صورت‌های انرژی پاک قابل دسترسی و استحصال است. موقعیت جغرافیایی کشورمان به‌گونه‌ای است که ایران با متوسط حدود ۳۰۰۰ ساعت تابش خورشید در سال، یکی از غنی‌ترین کشورها در زمینه انرژی خورشیدی است، به‌طوری‌که ایران را جزو هشت کشور برتر دنیا از نظر پتانسیل تابشی می‌دانند. این گفته را می‌توان به وضوح در نمودارهای توزیع تابش در جهان مشاهده کرد.

۲. متمرکزکننده‌های فرنل

تاکنون در بین نیروگاه‌های خورشیدی که در آن‌ها انرژی گرمایی از طریق متمرکز کردن تابش ایجاد می‌شود، نوع فرنل بسیار کمتر از نوع سهموی مورد استفاده قرار گرفته است [۴ و ۵]. با وجود این در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ قرن گذشته میلادی، مطالعاتی روی آن انجام شده است [۶-۱۲].

شکل (۱) نمایی از یک کلکتور فرنل را نشان می‌دهد. هر کلکتور فرنل از یک سری آینه تخت فرارگرفته در نزدیکی سطح زمین تشکیل شده است که پرتوهای رسیده از خورشید را به‌سمت لوله‌جاذب بازتاب می‌کنند. لوله‌های دریافت‌کننده معمولاً از یک پوشش خاص برای افزایش ضریب جذب و کاهش ضریب گسیل بهره می‌برند. هر یک از آینه‌های تخت اولیه در یک زاویه مشخص تنظیم شده‌اند و یک سامانه ردیاب خورشید آن‌ها را در طول روز در زاویه مناسب نسبت به خورشید نگه می‌دارد تا بیشترین تاب ممکن گردآوری شود.



شکل (۱): متمرکزکننده فرنل

دمای کارکرد یک کلکتور فرنل متناسب با پارامترهای آن (تعداد آینه‌ها، طول و عرض آینه‌ها، ...) بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ درجه سلسیوس متغیر است. انتقال انرژی گرمایی در این کلکتورها مانند سایر متمرکزکننده‌های خورشیدی به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود؛ یعنی می‌توان سیال کاری نیروگاه حرارتی را مستقیماً در لوله جاذب گرم کرد یا از یک سیال واسطه مثل روغن‌های حرارتی برای این منظور استفاده کرد.

هزینه ساخت متمرکزکننده‌های فرنل نسبت به سایر سامانه‌ها کمتر است و ردیاب‌های ساده‌تری دارند. از دیگر مزایای سامانه‌های فرنل می‌توان به ناچیز بودن نیروی مقاوم آن‌ها در برابر باد در مقایسه با سامانه‌های سهموی^۱ اشاره کرد [۱۳].

طرح اولیه آینه‌های فرنل (آینه‌های تخت که تابش را به یک سطح خاص بازتاب می‌کنند) برای استفاده در سامانه‌های برج خورشیدی و

به فاصله متفاوت آینه‌ها از لوله جاذب از شعاع انحنای متفاوتی برای هر آینه استفاده شود که هم هزینه ساخت مجموعه را افزایش می‌دهد و هم توزیع شار نامناسبی روی لوله جاذب ایجاد می‌کند. راه حل ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر قرار دادن یک آینه در قسمت فوقانی لوله جاذب است تا پرتوهای کنارگذر را به سمت لوله جاذب برگرداند. انتخاب شکل و ابعاد آینه مناسب نیاز به بررسی عوامل مؤثر در میزان شار تابشی و یکنواختی آن دارد که موضوع پژوهش حاضر است. در ادامه، ابتدا سه طرح به‌عنوان شکل کلی آینه فوقانی معرفی و سپس متغیرهای آن نظیر طول، شعاع و... مورد بررسی قرار می‌گیرد. مشخصات سامانه مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. لازم به توضیح است که فاصله بین آینه‌ها از این نظر ضروری است که از سایه‌اندازی آینه‌ها بر هم در ساعت‌های اولیه و پایانی روز تا حدی پیشگیری شود.

جدول (۱): مشخصات و پارامترهای ثابت سامانه مورد بررسی

پارامتر	مقدار تخصیص داده شده
پهنای آینه‌های تخت پایینی	۲۰ سانتی متر
فاصله آن‌ها از یکدیگر	۳۰ سانتی متر
راستای قرارگیری آینه‌ها	شمالی-جنوبی
تعداد آینه‌های پایینی	۱۵
شعاع لوله جاذب	۵ سانتی متر
ارتفاع لوله جاذب از سطح زمین	۱/۵ متر
ارتفاع از سطح دریا	۰

بررسی برای موقعیت مکانی استوا و روز اعتدال بهاری^۲ انجام می‌شود. در طول روز، خورشید یک مسیر منحنی را به اندازه ۱۸۰ درجه طی می‌کند و فرض می‌شود که طی روز زاویه شیب آینه‌ها متناسب با تغییر موقعیت خورشید تنظیم می‌شود تا همواره تابش خورشید را به سمت لوله جاذب بازتاب کنند. زاویه سمت خورشید در این موقعیت قبل و بعد از ظهر خورشیدی به ترتیب $+180$ و -180 درجه و در ظهر صفر است. چنانچه زاویه فراز خورشید که در طول روز متغیر است، α و زاویه شیب هر آینه نسبت به افق، θ و زاویه برخورد پرتو خورشید با آینه، β نامیده شود مطابق شکل (۲) نتیجه می‌شود (رابطه ۱):

$$\theta = 90 - \alpha - \beta \quad (1)$$

در هلیوستات‌های^۱ آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. این طرح در مقایسه با سامانه‌های دریافت‌کننده مرکزی رایج، اگرچه هزینه کمتری داشت، به دلیل ضریب تمرکز کمتر که موجب کاهش بازده می‌شود، نامناسب نشان می‌داد [۱۵].

در سال ۲۰۰۰، میلز و موريسن [۱۶] بازتابنده فرنل خطی فشرده را پیشنهاد کردند. پس از آن، دی [۱۷] یک طرح مقدماتی و محاسبات انتقال حرارتی برای یک جاذب بر مبنای راهکار میلز و موريسن ارائه کرد. محدودیت این طراحی، بیشترین اختلاف دمای بین صفحه جاذب و سیال داخل لوله‌ها بود. وی از یک تحلیل المان محدود استفاده کرد و اختلاف دمای کمتر از ۲۰ درجه سلسیوس به‌دست آورد.

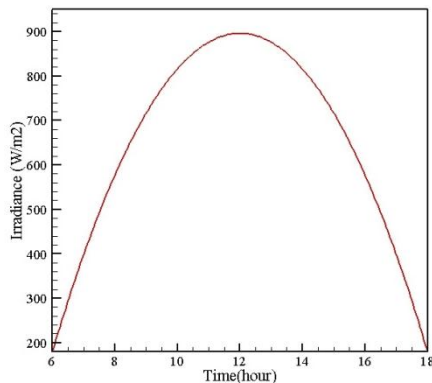
در حال حاضر نیز چند نمونه آزمایشگاهی ساخته شده است. یکی از آن‌ها در استرالیا و به‌منظور پیوستن به یک نیروگاه زغال‌سنگ طراحی شده است. این نیروگاه تعداد کمی آینه تخت داشته، دارای آینه فوقانی نیست. همچنین در کالیفرنیا آمریکا یک نیروگاه ۵ مگاواتی به‌وسیله شرکت آوسرا [۱۸] ایجاد شده است. شبیه‌سازی‌ها و مطالعات روی خواص جاذب خطی انجام [۱۷] و در نهایت پیشنهاد شد از سیستم‌های ذخیره برای آن استفاده شود [۱۹].

در سال ۲۰۱۱، یک کار تحقیقاتی روی نمک مذاب برای استفاده به‌عنوان سیال عامل جذب‌کننده فرنل انجام شد. نمک‌های مذاب خواص مناسبی مانند دمای کاری بالا، خواص انتقال حرارتی مناسب، پایداری شیمیایی، هزینه و زیان کم برای محیط‌زیست برای کاربردهای خورشیدی از خود نشان می‌دهند. در این تحقیق، هدف اصلی بررسی خواص نمک مذاب بود؛ اما از آنجاکه اعمال حرارت مناسب به این سیال نیازمند یک شار یکنواخت روی لوله بود، کلکتور فرنل توانایی اعمال شار یکنواخت را نداشت؛ لذا یک آینه در قسمت فوقانی آن قرار داده شد تا هدف مذکور ارضا شود. اگرچه آینه فوقانی، سامانه دریافت‌کننده را کمی پیچیده کرد، درمقابل، بازده تابشی آن را افزایش داد [۲۰].

۳. تعریف مسئله

در نیروگاه‌های خورشیدی با دریافت‌کننده فرنل معمولاً پهنای آینه‌های پایینی از قطر لوله جاذب بیشتر است؛ زیرا پهنایی هم‌اندازه یا کوچک‌تر از قطر لوله جاذب باعث افزایش چشمگیر هزینه‌های ساخت سامانه خواهد شد. این اختلاف اندازه موجب می‌شود مقداری از پرتوهای بازتاب‌شده از آینه‌های پایینی از کنار لوله جاذب عبور کرده و در واقع تلف شوند. چنانچه برای کاهش تلفات تابشی به‌جای آینه‌های تخت از آینه‌های قوس‌دار استفاده شود، لازم است که با توجه

با فرض‌های ذکرشده، کل تابش مستقیم دریافتی از خورشید در طول روز، ۱۷/۹۷ مگاوات بر متر مربع و توزیع آن در طول روز در منطقه مورد نظر مطابق شکل (۳) خواهد بود.



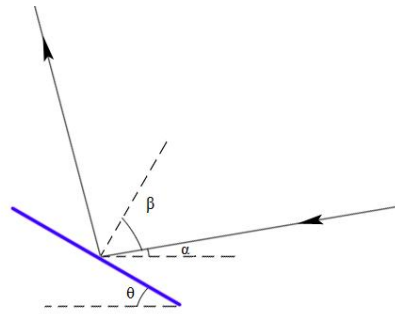
شکل (۳): تغییرات تابش در طول ساعات آفتابی

۴. شبیه‌سازی و بررسی اثر آینه فوقانی

در ابتدا، با تنظیم زاویه اولیه آینه‌های پایینی، میزان تابش برخوردی با لوله‌جاذب بدون حضور آینه فوقانی، محاسبه شده است. در واقع این حالت، مبنای مقایسه عملکرد آینه‌های فوقانی مختلف است که در ادامه معرفی خواهند شد. بدین منظور پرتوهای خورشید که به آینه‌ها برخورد کرده است تا برخورد آن‌ها به لوله‌جاذب تعقیب و شار تابشی روی لوله‌های جاذب اندازه‌گیری خواهد شد. انجام عملیات مذکور نیازمند نوشتن یک برنامه کامپیوتری برای تعقیب دسته پرتو رسیده از خورشید است. این برنامه تحت نرم‌افزار متلب^۱ نوشته شده است.

در این حالت، ۵۲٪ از کل پرتوهای رسیده از خورشید در طول یک روز، به لوله برخورد می‌کند. این نشان می‌دهد که مقدار قابل توجهی از پرتوها پس از بازتاب از آینه‌های پایینی بدون برخورد با لوله‌جاذب از کنار آن عبور می‌کنند (شکل ۴).

همان‌طور که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد، تفاوت پهنای آینه‌های پایینی با قطر لوله‌جاذب، علت اصلی هدررفت بخشی از پرتوها محسوب می‌شود. به‌علاوه همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، شار ورودی به لوله یکنواخت نیست. این نایکنواختی به حدی است که به قسمت بالایی لوله هیچ پرتوی برخورد نمی‌کند. در شکل‌های (۵) تا (۸)، محور افقی نشانگر زاویه هر نقطه روی محیط لوله (که در جهت مثلثاتی اندازه‌گیری می‌شود و در شکل (۵) این زاویه نشان داده شده است) و محور عمودی، نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله‌جاذب به کل انرژی دریافتی از خورشید است.



شکل (۲): زاویه اولیه آینه‌های پایینی

گرچه وجود آینه فوقانی مانع هدر رفتن بخشی از پرتوهای بازتاب‌شده توسط آینه‌های پایینی و افزایش راندمان تابشی سامانه می‌شود، بر لوله‌جاذب و تا حدی بر آینه‌های پایینی سایه می‌اندازد. این نکته در تحلیل عملکرد سیستم مورد توجه قرار گرفته است.

از جمله موارد مهم در تحلیل سامانه، تغییر شدت تابش خورشید در طول روز است. تابش خورشید در هر لحظه بستگی به عوامل متعددی از قبیل موقعیت جغرافیایی، وقت خورشیدی، شدت ابری بودن، صاف یا غبارآلودگی هوا دارد. از آنجاکه متمرکزکننده فرنل اصولاً بر مبنای تابش مستقیم خورشید طراحی می‌شود، برای سادگی در اینجا یک روز صاف مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اثر عوامل مورد بررسی به نحو بهتری نمایان شود. در یک روز صاف و آفتابی تابش مستقیم خورشید در طول روز، طبق رابطه (۲) تغییر می‌کند [۲۱]:

$$\frac{G_{BT}}{G_{on}} = a_0 + a_1 e^{\frac{-k}{\cos(\theta_z)}} \quad (2)$$

که در آن، G_{BT} تابش رسیده بر سطح زمین در ساعات‌های مختلف روز و G_{on} تابش خارج از جو زمین بوده و از رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$G_{on} = 1367(1 + 0.033 \cos(\frac{360n}{365})) \quad (3)$$

ثابت‌های a_0 ، a_1 و k از روابط (۴) تا (۹) به‌دست می‌آیند:

$$a_0 = r_0 a_0^* \quad (4)$$

$$a_1 = r_1 a_1^* \quad (5)$$

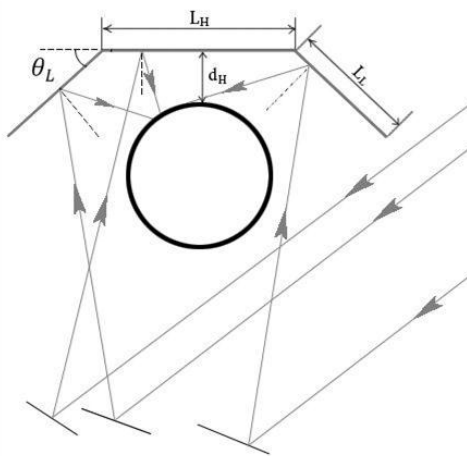
$$k = r_k k^* \quad (6)$$

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821(6 - A)^2 \quad (7)$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2 \quad (8)$$

$$k^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2 \quad (9)$$

در معادلات فوق، A ارتفاع محل از سطح دریا برحسب کیلومتر است. ضرایب تصحیح r_0 ، r_1 و r_k با توجه به آب‌وهوای محل مورد نظر تعیین می‌شود. در اینجا با توجه به فرض آب‌وهوای استوایی این ضرایب به‌ترتیب برابر ۰/۹۵، ۰/۹۸ و ۱/۰۲ در نظر گرفته شده است [۲۱].



شکل (۶): آینه فوقانی تخت

پارامترهای قابل تغییر و مؤثر در بازتابش پرتوها، مقدار و یکنواختی شار تابشی روی لوله در این حالت عبارتند از:

- زاویه آینه‌های کناری (بالها) با افق (θ_L)
- پهنای آینه افقی بالا (L_H)
- پهنای آینه‌های کناری (L_L)
- فاصله عمودی آینه افقی با سطح بالایی لوله (d_H)

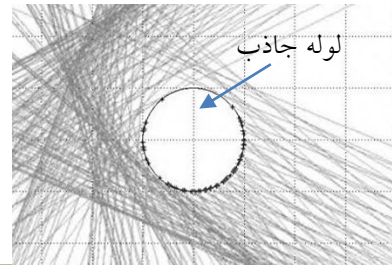
از آنجاکه آینه سمت راست و چپ قرینه یکدیگرند، مقادیر θ_L و L_L برای آینه سمت راست نیز مانند نمونه سمت چپ است. با حضور این بازتابنده در بهترین حالت، ۸۴/۳٪ کل پرتوهای رسیده از خورشید، به لوله جاذب می‌رسد. جدول (۲) ترکیب‌هایی از بهترین حالت‌های متغیرهای مؤثر بر شار دریافتی لوله جاذب را نشان می‌دهد. در این جدول، r بیانگر شعاع لوله جاذب است.

جدول (۲): ترکیب‌هایی از متغیرها در بهترین حالت‌های بازتابنده تخت

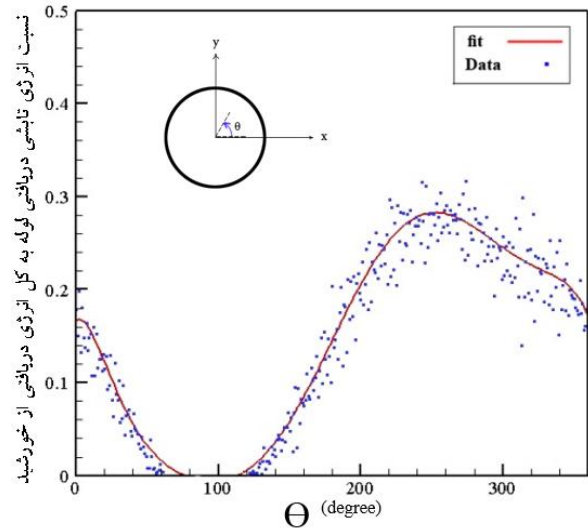
حالت	θ_L	d_H (mm)	L_H	L_L	تابش دریافتی (%)
۱	۵	۱۱	$8 \times r$	r	۸۲/۵
۲	۵	۵	$4 \times r$	$2 \times r$	۸۳/۸
۳	۱۰	۵	$4 \times r$	$3 \times r$	۸۳/۶
۴	۱۰	۵	$3 \times r$	$3 \times r$	۸۴/۳

همان‌طور که مشخص است بین حالت‌های فوق تفاوت زیادی وجود ندارد و هر کدام از آن‌ها می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. همچنین بررسی‌های فراوان روی اثر زاویه آینه‌های کناری (با تغییر آن‌ها در یک بازه مناسب) نشان می‌دهد که تغییر این زاویه تا ۱۲ درجه، تأثیر زیادی بر عملکرد تابشی مجموعه ندارد. با توجه به حجم

۲.۱ شعاع لوله است.



شکل (۴): وضعیت پرتوهای رسیده به جاذب در حالت بدون آینه فوقانی



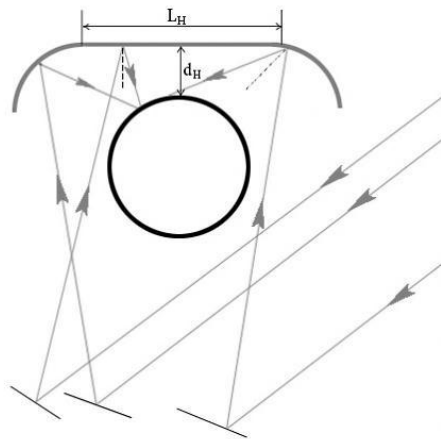
شکل (۵): نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله به کل انرژی دریافتی از

خورشید در حالت بدون آینه فوقانی

به کارگیری آینه فوقانی می‌تواند به اصلاح عملکرد تابشی سامانه کمک کند. در ادامه، اثر نوع نیمرخ (پروفیل)، ابعاد و دیگر پارامترهای آینه فوقانی بر میزان شار ورودی به لوله جاذب و یکنواختی آن مورد بررسی قرار گرفته است. تعقیب پرتوهایی که پس از عبور از کنار لوله جاذب به آینه فوقانی برخورد می‌کنند، در برنامه کامپیوتری لحاظ شده است. لذا این بار در حضور این آینه‌ها شار تابشی برخوردی به لوله جاذب محاسبه شده است.

۱.۳ آینه فوقانی تخت

این طرح شامل سه تکه آینه تخت است که یکی از آن‌ها افقی و در مرکز و دو آینه دیگر به صورت مایل و با زاویه مشخص در کنارها به صورت متقارن قرار گرفته‌اند (شکل ۶).



شکل (۸): آینه تخت با بال‌های دایره‌ای

متغیرهای این حالت عبارت‌اند از:

- پهنای آینه افقی فوقانی (L_H)

- فاصله آینه افقی با قسمت بالایی لوله (d_H)

شایان ذکر است که به‌منظور کاهش متغیرهای مورد بررسی، شعاع بال‌های کناری این بازتابنده تابعی از پهنای آینه افقی فوقانی، شعاع لوله (r) و فاصله آینه افقی از بالای لوله در نظر گرفته شده است. بدین صورت که رابطه فیثاغورث بین $L_H/2$ ، $d_H + r$ و این شعاع در نظر گرفته شده است. لذا متغیر مستقلی به حساب نمی‌آید.

با حضور بازتابنده تخت با بال‌های دایره‌ای $۸۰/۴\%$ کل پرتوهای رسیده از خورشید در بهترین حالت به لوله جاذب می‌رسد. جدول (۳) نتایج تحلیل را نشان می‌دهد.

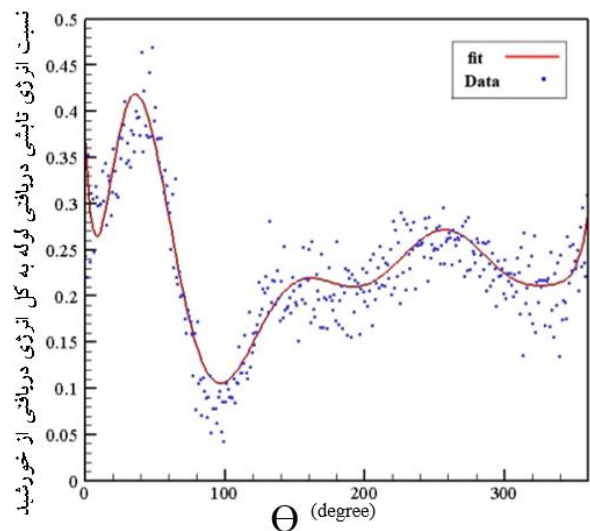
جدول (۳): ترکیب‌هایی از متغیرها در بهترین حالت‌های بازتابنده تخت با بال‌های دایره‌ای

حالت	d_H (mm)	L_H	تابش دریافتی (%)
۱	۵۰	$۸ \times r$	۶۸/۸
۲	۱۰	$۸ \times r$	۸۰/۴
۳	۵	$۴ \times r$	۷۳

تغییر فاصله آینه افقی از بالای لوله (d_H) باعث تغییر نسبتاً زیادی در شار می‌شود. اما تغییر در پهنای آینه فوقانی افقی به اندازه یک شعاع لوله، تنها ۲٪ در شار تغییر ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، این بازتابنده به فاصله آینه افقی از بالای لوله بسیار حساس است و این حساسیت در این مرتبه از اعداد مناسب نیست. گرچه این مدل نسبت به حالت بدون بازتابنده باعث اصلاح عملکرد تابشی مجموعه می‌شود، در مقایسه با سایر مدل‌ها چندان مناسب نیست. همچنین ساخت بال‌های دایره‌ای نسبت به بال‌های تخت، هزینه بیشتری خواهد برد.

بالای داده‌ها و نتایج، از قرار دادن آن‌ها در متن مقاله خودداری شده است. این مطلب برای فاصله عمودی آینه افقی با سطح بالایی لوله (d_H) نیز تا ۱۱ میلی‌متر و برای پهنای آینه‌های کناری (L_L) و پهنای آینه افقی بالا (L_H) با اختلاف r از بهترین حالت نیز صدق می‌کند. به عبارت دیگر، تغییر پهنای آینه بالایی یا آینه‌های کناری به اندازه r تأثیری زیادی در بیشینه شدن برخورد پرتوها با لوله در هر کدام از حالت‌های جدول فوق نخواهد داشت.

نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله جاذب به کل انرژی دریافتی از خورشید برای این حالت در شکل (۷) رسم شده است. این نمودار نشان می‌دهد که به‌کارگیری این بازتابنده توزیع چندان مناسبی از پرتوهای برخوردی به لوله جاذب ایجاد نمی‌کند؛ چون در برخی نقاط (در زاویه بین صفر تا ۶۰ درجه) مقدار شار زیاد و در برخی دیگر (در زاویه بین ۸۰ تا ۱۲۰ درجه) بسیار کم است.



شکل (۷): نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله به کل انرژی دریافتی از خورشید با به کارگیری بازتابنده بالایی تخت

۲.۳. آینه فوقانی تخت با بال‌های دایره‌ای

این بازتابنده، آینه فوقانی تختی است که در دو طرف آن دو بال دایره‌ای قرار گرفته است (شکل ۸).

- طول نقطه قرارگیری سر باز سهمی. طول این نقطه برابر $X + r + d + \frac{L_H}{2}$ است که در آن پارامتر d قابل تغییر است.

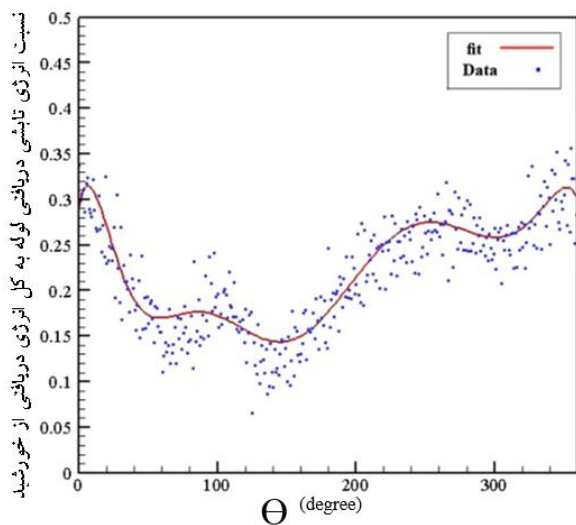
جدول (۴): ترکیب‌هایی از متغیرها در بهترین حالت‌های بازتابنده تخت با بال‌های سهمی

حالت	γ	d	d_H	L_H	Y_1	تابش دریافتی (%)
۱	۴۵	۲×۲	r	۰	۳×۲	۷۱/۷
۲	۴۵	۳×۲	r	۰	۳×۲	۷۵/۵
۳	۴۵	۵×۲	r	۰	۳×۲	۷۶/۲
۴	۴۰	۲×۲	r	۰	r	۷۷/۷
۵	۴۰	۲/۵×۲	r	۰	۰/۵×۲	۸۰/۴

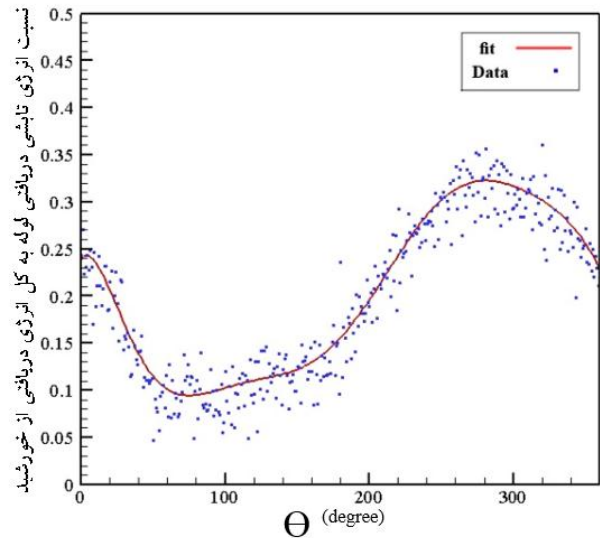
با حضور این بازتابنده در بهترین حالت، ۸۰/۴٪ کل پرتوهای رسیده از خورشید، به لوله جاذب می‌رسد. جدول (۴) ترکیب‌هایی از بهترین حالت‌های متغیرهای دخیل در شار ورودی به لوله را نشان می‌دهد.

هر ۵ درجه تغییر در زاویه ابتدای سهمی با افق (γ)، حدود ۰/۲٪ هر تغییر به اندازه شعاع لوله در طول نقطه قرارگیری سر باز سهمی (d)، حدود ۱ درصد، هر تغییر به اندازه شعاع لوله در فاصله آینه افقی با قسمت بالایی لوله (d_H)، حدود ۳ درصد، هر تغییر به اندازه شعاع لوله در پهنای آینه افقی فوقانی (L_H)، حدود ۳ درصد و هر تغییر به اندازه شعاع لوله در عرض نقطه قرارگیری سر باز سهمی (Y_1)، حدود ۱ درصد در شار برخوردی به لوله تأثیرگذار است.

نمودار نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله جاذب به کل انرژی دریافتی از خورشید در شکل (۱۱)، نشان‌دهنده توزیع بسیار خوب شار ورودی به لوله در این حالت است. بنابراین این طرح گرچه در افزایش شار ورودی به لوله چندان موفق نبوده، برای ایجاد توزیع شار یکنواخت مناسب است.



شکل (۱۱): نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله به کل انرژی دریافتی از خورشید در حضور بازتابنده تخت با بال‌های سهمی

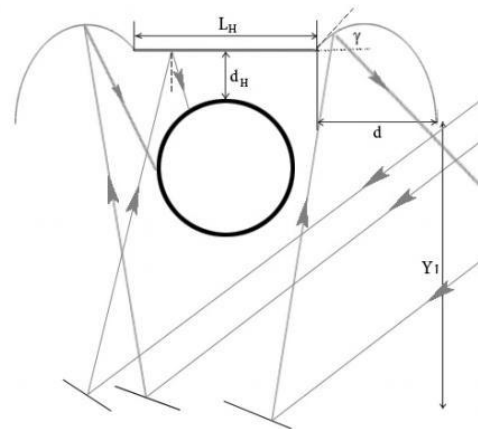


شکل (۹): نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله به کل انرژی دریافتی از خورشید در حضور آینه تخت با بال‌های دایره‌ای

نمودار نسبت انرژی تابشی دریافتی لوله جاذب به کل انرژی دریافتی از خورشید در شکل (۹) نیز نشان می‌دهد که در زاویه ۲۶۰ تا ۳۰۰ درجه، تمرکز شار زیاد و در زاویه ۳۰ تا ۱۸۰ درجه کم است که این نمایانگر توزیع ناهمگون شار به وسیله این بازتابنده است.

۳.۳ آینه فوقانی تخت با بال‌های سهمی

به نظر می‌رسد با توجه به شکل منحنی سهمی، بتوان با اضافه کردن یک آینه افقی به آن به عملکرد بهتری رسید. بدین صورت که دو سهمی در دو طرف یک آینه تخت قرار می‌گیرند (شکل ۱۰).



شکل (۱۰): بازتابنده تخت با بال‌های سهمی

متغیرهای این حالت عبارت‌اند از:

- پهنای آینه افقی فوقانی (L_H)
- فاصله آینه افقی از بالای لوله (d_H)
- زاویه ابتدای سهمی با افق (γ)
- عرض نقطه قرارگیری سر باز سهمی (Y_1)

جدول (۵): نتایج بررسی بازتابنده‌ها

نوع بازتابنده	شار ورودی به لوله‌جاذب (%)	توزیع شار
۱ بدون بازتابنده	۵۲	بسیار ضعیف
۲ تخت	۸۴/۳	ضعیف
۳ تخت با بال‌های دایره‌ای	۸۰/۴	ضعیف
۴ تخت با بال‌های سهموی	۸۰/۴	خیلی خوب

واضح است که بازتابنده تخت بهترین عملکرد نوری را دارد، درحالی‌که از نظر یکنواختی شار چندان مناسب نیست. اما با توجه به مسائلی مانند فناوری ساده ساخت و هزینه کم، می‌توان این طرح را برتر از سایر طرح‌ها دانست. همچنین در مواردی که اهمیت توزیع یکنواخت شار بیشتر از مقدار شار باشد، بازتابنده تخت با بال‌های سهموی پیشنهاد مناسبی خواهد بود.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر آینه فوقانی بر عملکرد تابشی مجموعه آینه‌های فرنل بررسی شد. حضور آینه فوقانی به صورت هریک از سه نیم‌رخ که در اینجا بررسی شد، مفید بوده و موجب افزایش شار ورودی به لوله‌جاذب و یکنواختی هرچه بیشتر آن خواهد شد. اما با توجه به کاربرد مورد نیاز، هزینه و در دسترس بودن فناوری ساخت، می‌توان بهترین حالت را برگزید. نتایج بهترین حالت‌های بازتابنده‌های بررسی شده در جدول (۵)، به طور خلاصه ارائه شده و با توجه به نمودارهای توزیع شار درباره یکنواختی توزیع، قضاوت شده است.

مراجع

- [1] Jiang ZM., "Reflections on Energy Issues in China", Journal of Shanghai Jiaotong University, Vol. 13, No. 3, pp. 257–74, 2008.
- [2] Xie W.T., Dai Y.J., Wang R.Z., Sumathy, K., "Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 2588–2606, 2011.
- [۳] عباسپور م., «انرژی، محیط‌زیست و توسعه پایدار»، جلد اول و دوم، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۴.
- [4] Kreith F., Goswami D., "Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Mechanical Engineering Series", CRC Press, ISBN 9780849317309, 2007.
- [5] Kalogirou S., "Solar Energy Engineering: Processes and Systems", Academic Press; ISBN 0-123-74501-2, 2009.
- [6] Rabl A., "Active Solar Collectors and Their Applications", Oxford University Press, ISBN 9780195035469, 1985.
- [7] Choudhury C., Sehgal H., "A Fresnel Strip Reflector-Concentrator for Tubular Solarenergy Collectors", Applied Energy, Vol. 23, No. 2, pp. 143–54, ISSN 0306-2619, 1986.
- [8] Negi B., Mathur S., Kandpal T., "Optical and Thermal Performance Evaluation of a Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator", Solar Wind Technology, Vol. 6, No. 5, pp. 589–93, ISSN 0741-983X, 1989.
- [9] Negi B., Kandpal T., Mathur S., "Designs and Performance Characteristics of a Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator with a Flat Vertical Absorber", Solar Wind Technology, Vol. 7, No. 4, pp. 379–92, ISSN 0741-983X, 1990.
- [10] Goswami R., Negi B., Sehgal H., Sootha G., "Optical Designs and Concentration Characteristics of a Linear Fresnel Reflector Solar Concentrator with a Triangular Absorber", Solar Energy Materials, Vol. 21, No. 2–3, pp. 237–51, ISSN 0165-1633, 1990.
- [11] Mathur S., Kandpal T., Negi B., "Optical Design and Concentration Characteristics of Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators – I. Mirror Elements of Varying Width", Energy Conversion and Management, Vol. 31, No. 3, pp. 205–19, ISSN 0196-8904, 1991.
- [12] Mathur S., Kandpal T., Negi B., "Optical Design and Concentration Characteristics of Linear Fresnel Reflector Solar Concentrators – II. Mirror Elements of Equal Width", Energy Conversion and Management, Vol. 31, No. 3, pp. 221–32, ISSN 0196-8904, 1991.
- [13] Ltd W. G. P., "High Temperature Solar Thermal Technology Roadmap", http://www.coag.gov.au/sites/default/files/HTSolar_thermal_roadmap.
- [14] Canio D. D., Tretyl W., Jur F., Watson C., "Line-Focus Solar Thermal Central Receiver Research Study", FMC Corporation, Santa Clara, CA, Final Report. 1977. [Online]. Available: http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=5535434.
- [15] Winter C.J., Sizmann R.L., Vant-Hull L.L., "Solar Power Plants", Berlin: Springer-Verlag: p. 114, 1991.
- [16] Mills D., Morrison G., "Compact Linear Fresnel Reflector Solar Thermal Powerplants", Solar Energy, Vol. 68, No. 3, pp. 263-83, 2000.
- [17] Dey C., "Heat Transfer Aspects of an Elevated Linear Absorber", Solar Energy, Vol. 76, pp.243-9, 2004
- [18] Ausra, 2009. [Online]. Available: <http://www.ausra.com>
- [19] Hoshi A., Mills D., Bittar A., Saitoh T., "Screening of High Melting Point Phase Change Materials (PCM) in Solar Thermal Concentrating Technology Based on CLFR", Solar Energy, Vol. 79, pp. 332-9, 2005.
- [20] Grena R., Tarquini P., "Solar Linear Fresnel Collector Using Molten Nitrates as Heat Transfer Fluid", Energy, 2011.
- [21] Duffie J. A., Beckman W. A., "Solar Engineering of Thermal Process", New York: A Wiley-Interscience publication, 1980.