



بهبود راندمان جذب انرژی خورشیدی: طراحی نوآورانه برای کلکتورهای سهموی خطی با استفاده از ساختارهای بیضوی

مجید محمدی^{1*}، محمد متین رضایت²

1- دانشیار، گروه مهندسی انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران
2- کارشناسی مهندسی انرژی، گروه مهندسی انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران
* مسئول مکاتبات مقاله، majidmohammadi.ac@gmail.com

چکیده

انرژی تجدیدپذیر به عنوان منبعی پایدار و بدون آلاینده رو به گسترش است و افزایش راندمان آن اهمیت دارد. انرژی خورشیدی که از قرن نوزدهم مورد توجه قرار گرفت، یکی از این منابع است. یکی از روش های بهره برداری، تکنولوژی های متمرکز کننده نور مانند کلکتورهای سهموی خطی است که در کنار نیروگاه های سوخت فسیلی در کشور ما کاربرد دارد. در این سیستم ها نور خورشید توسط بازتابنده ها به جاذب حرارتی برخورد کرده و انرژی خود را منتقل می کند. این مقاله به بررسی ساختار هندسی اشکال بیضوی به عنوان جسم تاریک و طراحی سه نمونه آزمایشی می پردازد: 1) ساختار شاهد با جاذب دایره ای، 2) ساختار اولیه با جاذب گنبدی و 3) ساختار بیضوی با حداکثر جذب انرژی که عملکرد بهتری دارد. مساحت دریافتی $0/6 \times 0/28$ مترمربع است و می توانند 250 میلی لیتر آب را گرم کنند. حداکثر دماهای مشاهده شده به ترتیب $46/9$ ، $54/1$ و $63/5$ درجه سانتی گراد است که نمونه بیضوی $16/6$ درجه دمای بیشتری نسبت به شاهد دارد. طراحی با نرم افزارهای کورل دراو¹ و سالیدورک² انجام شد و داده ها در کامسول شبیه سازی شدند که با نتایج آزمایش مطابقت خوبی داشت. شبیه سازی نشان داد که نمونه شاهد فقط یک بار بازتاب نور دارد، در حالی که ساختار بیضوی با کاهش سطح دهانه و متمرکزسازی پرتوها، برخورد چندباره پرتوهای بازتابی را با جاذب افزایش داده و جذب انرژی را بهبود می بخشد. به طور کلی، راندمان حرارتی ساختار بیضوی نسبت به شاهد حدود 35 درصد بیشتر است که بیانگر عملکرد بهتر و کاربردی تر بودن آن در سیستم های متمرکز کننده نور است.

کلیدواژگان: انرژی خورشیدی، کلکتور سهموی، جاذب بیضوی، انرژی بازتاب نور

Improving solar energy absorption efficiency: innovative design for parabolic trough collectors using elliptical structures

Majid Mohammadi^{1*}, Mohammad Matin Rezayat²

1- Associate Professor, Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

2- Bachelor, Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

* Corresponding author, majidmohammadi.ac@gmail.com

Received: 07 April 2025 Accepted: 06 August 2026

Abstract

Renewable energy is expanding as a sustainable and pollution-free resource, and improving its efficiency is crucial. Solar energy, which has been of interest since the 19th century, is one such source. One utilization method involves concentrating technologies, such as linear parabolic collectors, which are used alongside fossil fuel power plants in our country. In these systems, sunlight is reflected by mirrors onto a thermal absorber, transferring its energy. This paper examines the geometric structure of elliptical shapes as a dark body and designs three experimental samples: 1) A control structure with a circular absorber, 2) An initial dome-shaped absorber, and 3) An elliptical absorber, which demonstrated

¹ CorelDRAW

² SolidWorks

superior performance by achieving maximum energy absorption. The receiving area is $0.6 \times 0.28 \text{ m}^2 \pm 0.005 \text{ m}^2$, and the samples can heat 250 mL of water. The observed maximum temperatures were 46.9°C , 54.1°C , and 63.5°C , respectively, with the elliptical design achieving 16.6°C higher than the control. The designs were created using CorelDRAW and SolidWorks, and the data were simulated in COMSOL, showing good agreement with experimental results. The simulation revealed that the control structure only reflects light once, whereas the elliptical structure reduces the aperture area and concentrates rays, increasing multiple reflections onto the absorber and enhancing energy absorption. Overall, the thermal efficiency of the elliptical structure is approximately 35% higher than the control, indicating better performance and greater practicality in concentrating solar systems.

Keywords: Solar energy, Parabolic collector, Elliptical, Temperature, COMSOL

1- مقدمه

نیاز بشر به انرژی از بدو خلقت آغاز شده و هم‌اکنون با توجه به ارتقاء و پیشرفت فناوری در حوزه‌های مختلف علمی، مصرف انرژی در جهان روز به روز در حال افزایش است. بشر با محدود شدن به سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی، در آینده نه چندان دور با پیامدهای غیرقابل اجتنابی روبه‌رو خواهد شد که با بهره‌برداری از انرژی‌های پاک می‌توان از پیامدهای منفی زیست محیطی جلوگیری کرد [1]. با توجه به مصرف 37 درصد از انرژی کل جهان در بخش صنعتی در سال 2022، می‌توان گفت تامین انرژی اهمیت بسزایی داشته و کمبود انرژی در جوامع توسعه یافته و در حال توسعه غیرقابل قبول است. از طرفی استفاده از سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های حرارتی به واسطه تولید آلاینده‌ها و تخریب زیست‌محیطی موجب شده تا مجامع بین‌المللی قوانینی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای تا سال 2050 وضع کنند. بنابراین کشف و توسعه انرژی‌های پاک اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است [2].

انرژی‌های تجدیدپذیر از اواخر قرن نوزدهم مورد توجه قرار گرفتند و حدوداً اواخر قرن بیستم بازتابنده‌ها و جاذب‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار شدند [3] و به صورت فزاینده در مقیاس صنعتی برای تولید انرژی گسترش پیدا کرده‌اند [4]. انرژی خورشیدی در میان سایر انرژی‌های پاک به عنوان ارزان‌ترین و بالغ‌ترین انرژی اهمیت ویژه‌ای دارد [5]. بنابراین روش‌هایی برای تبدیل انرژی حرارتی خورشید به الکتریکی ایجاد شده است که تحت عنوان متمرکز کننده‌های نور شناخته می‌شود. از انواع روش‌های تبدیل می‌توان به هلیوستات (برج خورشیدی)، کلکتورهای سهموی خطی، دیش‌های استرلینگ و کلکتورهای فرزنل اشاره نمود [6].

از میان روش‌های مختلف بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، کلکتورهای سهموی خطی به عنوان یکی از بالغ‌ترین و تجاری‌ترین فناوری‌های متمرکزکننده خورشیدی شناخته می‌شوند. این کلکتورها به دلیل قابلیت کار در بازه دمایی بالا، با امکان ادغام با نیروگاه‌های سوخت فسیلی و همچنین کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. توسعه و افزایش بازدهی این سامانه‌ها می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثرهای سوء زیست‌محیطی و دستیابی به انرژی پاک ایفا کند [6]. کلکتورهای سهموی خطی نوعی متمرکز کننده نور هستند که با تمرکز نور خورشید بر روی یک لوله و

گرم کردن سیال درون آن، انرژی تشعشعی خورشید را به انرژی حرارتی تبدیل می‌کنند [7، 8]. به طور کلی دمای متوسط کارکرد متمرکز کننده‌ها بین 50 تا 400 و حتی تا 500 درجه سانتی‌گراد است [1، 9]. این کلکتورها به سبب کاهش سطح تماس بین سیال گرم و محیط اطراف، اتلاف حرارتی کمتری دارند [7]. کلکتورهای سهموی خطی به دلیل امکان ترکیب با نیروگاه‌های سوخت فسیلی، از نظر اقتصادی حائز اهمیت هستند [2]. بنابراین محققان زیادی به منظور کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش راندمان با انجام تکنیک‌هایی از جمله بررسی تغییر شکل هندسی بدنه جاذب‌ها، تغییر در بازتابنده‌های سهموی، اضافه نمودن بازتابنده‌های جانبی در کنار جاذب حرارتی، بهره‌گیری از عایق‌های شفاف [10]، استفاده از تکنولوژی لوله خلاء برای کاهش اتلاف حرارتی [7]، و استفاده از ترکیب‌های نانو [3] به افزایش عملکرد جذب حرارتی اهتمام ورزیده‌اند. وانگ¹ و همکاران با بررسی هدررفت حرارتی در طول حرکت سیال در جاذب، با افزایش عرض بازتاب کننده‌ها در ابتدای مسیر حرکت سیال نسبت به انتهای جاذب، نمونه جدیدی از کلکتورهای سهموی خطی ارائه می‌دهند [11]. زو² و همکاران برای کاهش تلفات ناشی از حرکت لحظه‌ای خورشید، از گیرنده‌های متحرک در مجاورت جاذب استفاده کرده‌اند [12].

آبولارین³ و همکاران با قرار دادن تیغه مارپیچ در لوله انتقال سیال موجب کنترل آشفستگی سیال و جذب بهتر حرارت شده‌اند [13]. جاویدان⁴ و همکاران با ایجاد خان‌هایی در جاذب با سطح مقطع مربعی، مثلثی و ترکیبی با ایجاد جریان آشفته، جذب حرارتی جاذب را افزایش داده‌اند [3]. بلوز⁵ و تزوانیدیس⁶ در کلکتور سهموی خطی با استفاده از نانو سیالات هیبریدی و مونو⁷ و در دماهای بین 300 تا 650 درجه سانتی‌گراد آزمایش‌هایی انجام دادند. در نتایج بدست آمده نشان داده شد که استفاده از نانو سیال هیبریدی، راندمان حرارتی را حدود 2/2 برابر نسبت به سیال مینا افزایش می‌دهد. این افزایش راندمان مبتنی بر افزایش عدد ناسلت است [14]. همچنین در برخی از مطالعات، استفاده از لایه‌ی شفاف و عایق مطرح گردیده که در جاذب‌های فاقد تکنولوژی لوله خلاء کاربرد دارد و مانع از خروج بخشی از تشعشع‌های نور شده و ضریب اتلاف حرارت را نیز کاهش می‌دهد [15-17]. وانگ و همکاران برای بهبود این عملکرد از بازتابنده‌های کمکی و دولایه عایق شفاف استفاده

1 Wang

2 Zhu

3 Abolarin

4 Javidan

5 Bellos

6 Tzivanidis

7 Al2O3-TiO2/Syltherm, TiO2/Syltherm

لونی^{۱۵} و شریفزاده در مطالعاتی مشابه با مقایسه بین گیرنده‌های با سطح مقطع مکعبی، هفت-شکل و دوزنقه‌ای دریافتند که سطح مقطع مکعبی از راندمان حرارتی بیشتری برخوردار است [32].

با وجود مطالعات گسترده انجام شده در زمینه بهبود عملکرد کلکتورهای سهموی خطی، بررسی‌ها نشان می‌دهد که در بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها، تغییر هندسه سطح مقطع جذب به عنوان یک پارامتر کلیدی در افزایش راندمان حرارتی، مورد توجه محدودتری قرار گرفته است. افزون بر این، اکثر مطالعات موجود عمدتاً بر شبیه‌سازی‌های عددی متمرکز بوده و به معرفی و تحلیل گیرنده‌ها و ساختارهای هندسی مختلف بسنده کرده‌اند؛ در حالی که تعداد پژوهش‌هایی که به طراحی، ساخت و ارزیابی تجربی گیرنده‌های نوین پرداخته‌اند، همچنان محدود است.

در این پژوهش، به منظور افزایش راندمان کلکتور سهموی خطی، یک ساختار جدید با هندسه بیضوی شکل طراحی و به صورت تجربی ساخته شده است. هندسه پیشنهادی با ایجاد شرایط چندبرخوردی برای پرتوهای تابشی، رفتاری مشابه جسم سیاه مؤثر از خود نشان داده و با کاهش احتمال خروج پرتوهای بازتاب شده از سطح جذب، منجر به افزایش جذب مؤثر تابش خورشیدی و بهبود عملکرد حرارتی کلکتور می‌شود. ساختارها در نمونه‌های شاهد با شکل استوانه، نمونه اولیه با سطح مقطع گنبدی شکل و نمونه تاریک با سطح مقطع بیضی شکل طراحی شده است و سیال همانند شکل 1 از بخش هاشور زده شده وارد می‌شود. استرکچر و آینه‌های سهموی جذب‌های طراحی شده در برنامه کورل دراو به صورت دو بعدی طراحی شده و در برنامه سالیدورک به صورت سه بعدی مدل سازی شدند و سپس هر سه ساختار با دستگاه سی ان سی، برش خورده و محصول مونتاژ شده در شرایط یکسان به صورت دو به دو مورد آزمایش قرار گرفتند. در نهایت روند بازتاب پرتوهای نور در برنامه‌ی کامسول برای مقایسه و فهم راحت‌تر شبیه‌سازی شده است. روش ارائه شده برای افزایش راندمان حرارتی به کلکتورهای سهموی خطی محدود نشده و با توسعه و گسترش این ساختار در تمامی روش‌های متمرکز کننده نور می‌توان به راندمان‌های بهینه‌تر دست پیدا کرد.

کرده‌اند [18، 19]. عبدالحمید^۱ و همکاران با استفاده از بازتاب کننده‌های خاص برای بالا بردن راندمان، نسبت تراکم نور خورشید را افزایش دادند تا در تمام نقاط لوله جذب، پرتوی نور خورشید برخورد کند. با این عمل اختلاف دما در نقاط مختلف جذب کاهش پیدا کرده و انرژی جذب افزایش می‌یابد. آزمایش‌های انجام شده نشان داد که استفاده از این بازتاب کننده‌ها راندمان حرارتی را تا 37 درصد افزایش می‌دهد [20]. رودریگز-سانچز^۲ و روزنگارتن^۳ با قراردادن یک منعکس کننده صاف به ایجاد یکنواختی در توزیع حرارت کمک کرده‌اند تا تنش‌های ناشی از انبساط حرارت به جذب، حداقل شده و تلفات حرارتی آن کاهش یابد [21]. وانگ و همکاران با ساخت جذب دوزنقه‌ای دارای حفره در تماس با لوله‌ی جذب مانع از خروج بخشی از نور شده که در نتیجه‌ی آن، راندمان جذب حرارتی افزایش یافت [22]. ویرز^۴ و همکاران با بررسی بازتاب نور برخورد کرده با جذب حرارتی، با قرار دادن بازتابنده‌هایی در بین لوله خلاء و لوله‌ی حامل سیال، با افزایش کارایی نور موجب افزایش کارایی حرارتی شده‌اند. تکنیک و ایده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل آینه‌ها، عایق‌های بازتابنده، آینه‌های آپلاناتیک^۵ و بازتابنده‌هایی با ساختار متفاوت که شبیه بال‌های مرغ دریایی است. بهره‌مندی از این ساختارها در آزمایش‌های صورت گرفته منجر به افزایش راندمان حرارتی شده است [23].

کورس^۶ و همکاران با معرفی گیرنده حفره‌ای دوقلو در یک کلکتور سهموی خطی مجهز به لوله خلأ نشان دادند که این ساختار می‌تواند نسبت به گیرنده تخت، افزایش راندمان حرارتی در بازه 5/25 تا 9/85 درصد ایجاد کند [24]. کائو^۷ و همکاران نیز با طراحی گیرنده حفره‌ای بیضوی و افزودن یک صفحه بازتابنده در دهانه حفره، افزایش قابل توجه جذب نوری تا حدود 99 درصد را گزارش کردند که بیانگر نقش مؤثر هندسه حفره‌ای در کاهش تلفات نوری است [25].

مطالعات عددی آدیامان^۸ و چولاک^۹ نشان داده‌اند که بهینه‌سازی شکل هندسه می‌تواند راندمان ایتیکی کلکتور را به بیش از 80 درصد برساند [26] و همچنین در مطالعات الدلیمی^{۱۱} و همکاران، هندسه‌هایی نظیر بیضوی یا کانالی در مقایسه با اشکال مثلثی یا مربعی، عملکرد حرارتی بهتری از خود نشان می‌دهند [27]. علاوه بر این، تغییر هندسه لوله جذب از دایره‌ای به اشکال غیردایره‌ای مانند لوزی شکل نیز منجر به بهبود هر چند محدود راندمان حرارتی و انرژی شده است [28].

در حوزه افزایش انتقال حرارت، ونگادسان^{۱۱} و همکاران با معرفی جذب چندلوله‌ای نیم‌دایره‌ای، افزایش راندمان حرارتی تا حدود 44 درصد نسبت به جذب تک‌لوله را گزارش کردند [29]. از سوی دیگر، برخی پژوهش‌ها به دنبال جایگزینی لوله خلأ با ساختارهای حفره‌ای و عایق‌های شفاف بوده‌اند. در این راستا، چن^{۱۲} و لی^{۱۳} به صورت آزمایشگاهی نشان دادند که یک گیرنده حفره‌ای هفت-شکل مجهز به پره و پوشش شیشه‌ای می‌تواند راندمانی قابل مقایسه با لوله خلأ داشته است و دمای سیال عامل را تا حدود 570 کلوین افزایش دهد [30]. فؤاد^{۱۴} و همکاران با طراحی گیرنده حفره‌ای هفت-شکل با پوسته خارجی مثلثی به بیشینه راندمان انرژی 74/7 درصد رسیدند [31] همچنین

9 Çolak
10 Al-Dulaimi
11 Vengadesan
12 Chen
13 Li
14 Fouad
15 Loni

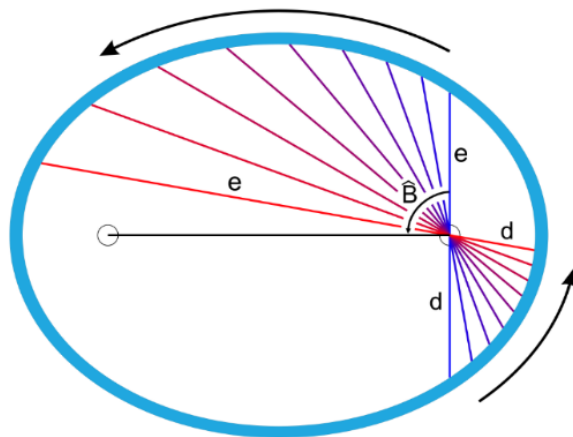
1 Abdelhamid
2 Rodriguez-Sanchez
3 Rosengarten
4 Wirz
5 Aplanatic
6 Korres
7 Cao
8 Adiyaman

$$\hat{B} < 90 \rightarrow d < e \quad (2)$$

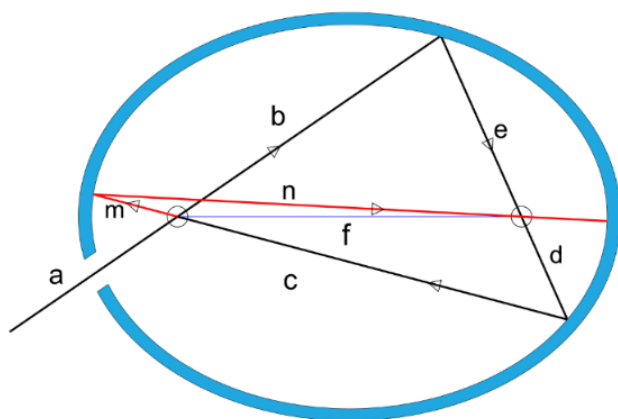
$$b + e = d + c \xrightarrow{d < e} b < c \quad (3)$$

$$\hat{C} < \hat{N} \rightarrow m < d \quad (4)$$

$$d + c = m + n \xrightarrow{m < d} c < n \rightarrow b < c < n < \dots \quad (5)$$



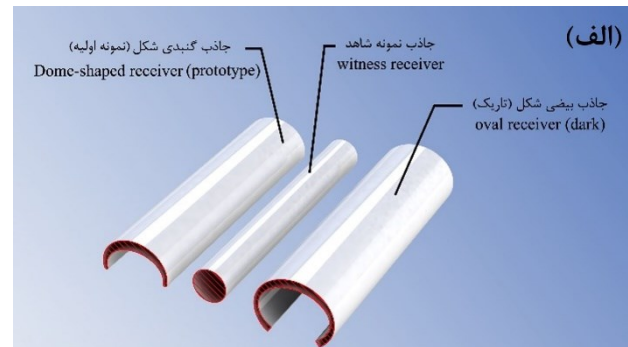
(الف)



(ب)

شکل 2 (الف) افزایش طول ضلع e نسبت به ضلع d با دوران خط e-d، (ب) مثلث‌های تشکیل شده در بازتاب‌های داخلی.

این مبنای هندسی و رفتار پرتوی در آینه‌های بیضی، پیش‌تر در طراحی سیستم‌های ترموفتوولتائیک¹ و به‌ویژه در پژوهش سانسونی² و همکاران [33] نیز مبنای تحلیل و شبیه‌سازی قرار گرفته است. در آن پژوهش، یک آینه بیضی با قرارگیری منبع تابشی در یکی از کانون‌ها و آشکارساز در کانون دیگر طراحی شده و رفتار مسیر پرتوها و بازتاب‌های متوالی آن‌ها به کمک شبیه‌سازی ردیابی پرتو³ بررسی شده است. نتایج آن تحقیق نیز مؤید روند افزایش تدریجی طول مسیر پرتوی‌ها و تجمع آن‌ها در راستای بزرگ‌ترین قطر



شکل 1 ساختارهای مختلف برای جاذب‌های حرارتی (الف) مدل اولیه از جاذب‌های ارائه شده. (ب) جاذب‌های ساخته شده.

2- بخش تجربی

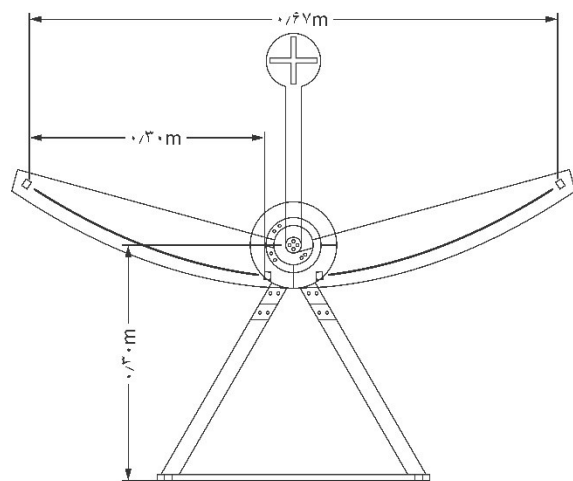
آینه بیضی داخلی با توجه به روش رسم بیضی که وابسته به برابری جمع فواصل کانونی است، هر پرتوی نوری که از مجرای روی بدنه بیضی تابش شده و از کانون آن بگذرد، بازتاب آن از کانون دیگر عبور خواهد کرد. بنابراین بازتاب مجدد آن از کانون قبلی عبور می‌کند.

پرتوی a را فرض کنید که از مجرای وارد آینه بیضی شده و از کانون بیضی عبور می‌کند. با نام‌گذاری بازتاب‌های آن، مثلث‌هایی متشکل از دو گوشه کانونی و یک گوشه روی دیواره بیضی با ضلع مشترک f ایجاد می‌گردد. با توجه به اینکه در بیضی جمع فاصله هر نقطه روی محیط بیضی از هر دو کانون همواره ثابت است، در نتیجه می‌توان بیان کرد که جمع دو ضلع b و e با دو ضلع d و c برابر است (رابطه 1). با توجه به شکل 2، (الف) با فرض کوچکتر بودن زاویه روبه‌رو به ضلع b (زاویه $\hat{B}$) از 90 درجه خط e-d دوران یافته و طول خط e نسبت به خط d افزایش می‌یابد (رابطه 2). همچنین مطابق با رابطه 1 و شکل 2، (ب) با کوچکتر بودن ضلع d از e، ضلع c بزرگ‌تر از b است (رابطه 3). با ادامه همین روند، با توجه به بزرگ‌تر بودن زاویه $\hat{N}$ نسبت به $\hat{C}$ ، ثابت می‌شود که ضلع n نیز بزرگ‌تر از c است، در نتیجه ضلع بزرگ هر مثلث به سمت بزرگ‌ترین اندازه ممکن یعنی قطر بیضی میل می‌کند (رابطه 4 و 5).

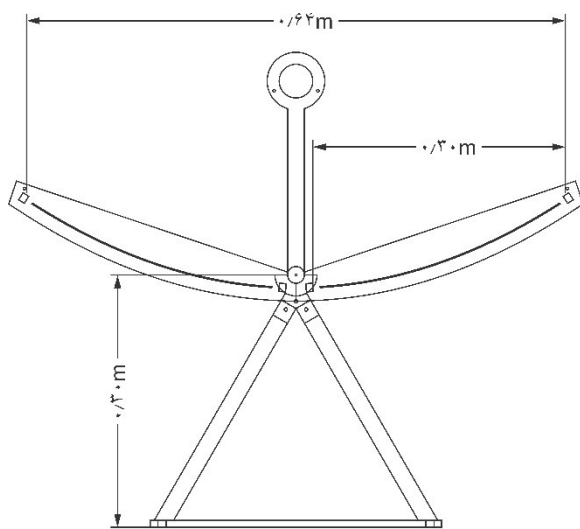
$$b + e = d + c \quad (1)$$

3 Ray tracing

1 Thermophotovoltaic
2 Sansoni



(الف)



(ب)

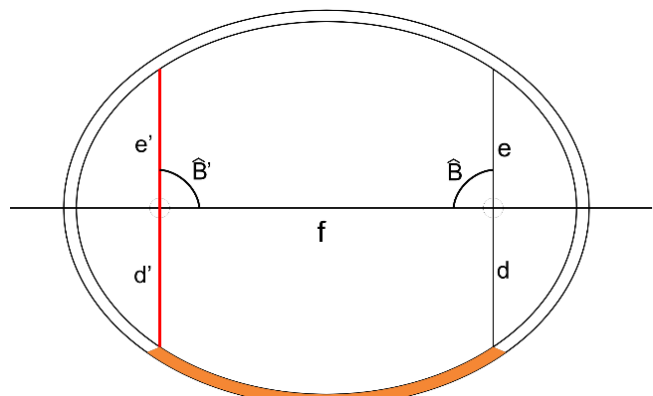
شکل 4 نقشه طراحی شده با کورل دراو (الف) طرح ارائه شده، (ب) نمونه شاهد.

جدول 1 مشخصات هندسی کلکتورهای طراحی شده.

مشخصات	مقدار	واحد
ضخامت مصالح مورد استفاده در استرکچر	0/008	m
قطر پیچ‌های مورد استفاده	0/004	m
عمق کلکتور	0/28	m
عرض دهانه کلکتور	0/6	m
فاصله کانونی	0/25	m
ارتفاع محور زاویه‌پذیر تا سطح زمین	0/3	m
ضخامت پوسته جاذب	0/0001	m
سطح تماس جاذب بیضی با محیط	0/096224	m ²
سطح تماس جاذب شاهد با محیط	0/032986	m ²

پس از نقشه برداری و طراحی در برنامه کورل‌دراو، تمام قطعات در برنامه سالیدورک مدل‌سازی و مونتاژ شده است تا اطمینانی برای طراحی فوق باشد.

بیضی و تمرکز توان در کانون دوم بوده و در شبیه‌سازی‌های عددی آن، الگوی هندسی بازتاب‌های متوالی و همگرایی مسیر پرتوهای به‌وضوح مشاهده می‌شود. با توجه به فرض‌های بیان شده، اگر پرتوی نور در محدوده‌ای از دیواره بیضی وارد شود که زاویه تشکیل شده بین بازتاب دوم و قطر بزرگ بیضی کمتر از 90 درجه باشد (زاویه $\hat{B}$ ، $\hat{B}'$)، پرتوی نور از آینه خارج نمی‌شود. بنابراین اگر سازه‌ی جاذب حرارتی به شکل بیضی ساخته شود، در بهترین حالت تمام انرژی حرارتی پرتوهای عبوری از کانون را جذب می‌کند. در شکل 3، محدوده رنگی نمایانگر قسمتی از بدنه‌ی آینه بیضی است که نور پس از ورود از آن و عبور از کانون بیضی در آینه اسیر می‌شود.

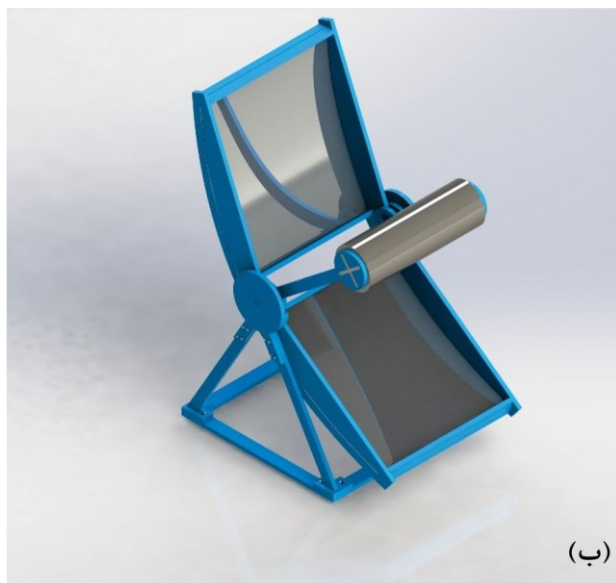


شکل 3 محدوده رنگی نمایانگر قسمتی از بدنه‌ی آینه بیضی برای ورود نور.

2-1- طراحی و ساخت

با توجه به خاصیت اشکال بیضی در جذب پرتوهای نور، کلکتور سهموی به گونه‌ای طراحی شده است که تمامی پرتوهای دریافتی نور را در کانون جاذب بیضی متمرکز کند تا جذب بیشتری صورت گیرد. برای تولید قطعات لازم برای استرکچر، سازه با برنامه کورل‌دراو به صورت دوبعدی طراحی شده است. در نقشه طراحی شکل 4، شیاری برای شکل گرفتن بازتابنده‌ها به شکل سهموی تعبیه شده است. با توجه به خطی بودن کلکتور، بازتابنده‌ها به گونه‌ای قرار می‌گیرند که دهانه ورودی پرتوهای نور در هر بازتابنده برابر با 0/3 متر باشد و با توجه به اینکه عمق کلکتور 0/28 متر است، در نتیجه مساحت دریافت پرتوی نور $0.6 \times 0.28 \text{ m}^2 \pm 0.005 \text{ m}^2$ می‌شود. اسکلت استرکچر به گونه‌ای طراحی و مونتاژ شده که بازتابنده‌ها به صورت محوری روی استرکچر، زاویه‌پذیر است. ارتفاع محور زاویه‌پذیر با سطح زمین برابر 0/3 متر است.

به منظور صحت مقایسه‌ی ساختار مورد نظر با کلکتورهای مرسوم، سازه‌ای تحت عنوان شاهد با جاذبی استوانه‌ای شکل، مطابق با همان ابعاد هندسی سازه مورد نظر طراحی شده است. ابعاد هر دو سازه مطابق جدول 1 هستند.



(ب)

در مدل سازی شکل 5 مشاهده می شود که تمام سازه ی طراحی شده را برای حمل آسان، می توان دمونتاز کرد. بنابراین برای جای گیری مناسب جاذب، نگهدارنده هایی در محور زاویه پذیر کلکتور، تعبیه شده است. اسکلتی برای شکل گرفتن جاذب به شکل بیضوی طراحی شده که باعث ایجاد استحکام در جاذب می شود که بتوان برای روکش آن از ورق های نازک استفاده کرد. همچنین این اسکلت مانند فین در مبدل های حرارتی عمل می کند تا انتقال حرارت بهتری صورت گیرد. جاذب حرارتی با زائده هایی متصل به اسکلت بیضوی در کانون بازتابنده های کلکتور قرار می گیرد.



(الف)

شکل 5 الف) مدل گسترده و ب) مدل مونتاژ شده در برنامه سالیدورک.

پس از مدل سازی، قطعات طراحی شده با استفاده از دستگاه سی ان سی برای مونتاژ برش می خورد. برای ساخت مدل باید از مصالحی استفاده می شد که هم بتوان آن را به راحتی تهیه کرد و هم بتوان به راحتی آن را برش داد. بدین منظور، بدنه سازه از چوب (ام دی اف) ساخته شده است. برای آینه ها نیز از جنسی استفاده شده که هم با دستگاه های سی ان سی، برش خورده و هم منعطف باشد که برای ساخت این پروژه از ورق های مولتی استایل آینه ای که با روکش آلومینیومی خود بازتاب به نسبت خوبی دارند استفاده شده است. جاذب حرارتی دارای اسکلتی از جنس پلکسی گلاس با روکش ورق استیل با ضخامت 0/1 میلی متر است که با چسب خمیری اپوکسی آب بندی شده است. ورود و خروج سیال نیز از دو سمت جاذب صورت می گیرد شکل 8.

به منظور بررسی جامع تر اجزای مورد استفاده در طراحی و ساخت کلکتورهای سهموی خطی، مصالح مناسب برای هر بخش از سیستم همراه با ویژگی ها و مزایای آن ها در جدول 2 ارائه شده است.

جدول 2 مروری بر مصالح مورد استفاده در ساخت کلکتورهای سهموی خطی.

بخش کلکتور	مواد مناسب	ویژگی ها و مزایا	منابع
	فولاد ضد زنگ	به عنوان متریال مرسوم در کلکتور مورد بررسی قرار گرفته است.	[34]
	آلومینیوم	25٪ عملکرد بالاتری نسبت به لوله های فولادی نشان می دهد. همچنین محققین از میله و صفحه آلومینیومی به عنوان جاذب استفاده کردند.	[35]
لوله جاذب	فوم مس	باعث افزایش هدایت حرارتی و کاهش اتلاف حرارت می شود. محققین از فوم مس با تخلخل 0/9 استفاده کردند.	[35]
	شیشه اکسید آلومینیوم	کارایی انتقال حرارت سیستم را بیش از 30٪ می تواند بهبود بخشد.	[36]
	مواد با پوشش خاص	پوشش دهی با ماده ای شبیه جسم سیاه برای جذب حداکثری گرما.	[36]
پوشش های	پوشش های طیفی انتخابی	عملکرد فتوترمال کلکتور را از طریق افزایش جذب و کاهش نشر بهبود می بخشد.	[34]
جاذب	پوشش های چند لایه	بازتابنده مادون قرمز (نقره)، لایه سرمت (نیتريد تنگستن و نیتريد آلومینیوم)، و فیلتر ضد بازتاب (نیتريد آلومینیوم و سیلیسیم) برای کاربردهای با دمای بالا.	[34]

[37]	پوشش‌های جاذب کم‌هزینه برای نسل جدید کلکتورها؛ رنگدانه اسپینل در دماهای تا 500 درجه سانتی‌گراد بسیار پایدار است.	رنگدانه سیاه با ساختار اسپینل و بایندر بادوام	
[37]	می‌توانند تقاضاهای CSP را برآورده کنند. جذب بالا (<0.96) را نشان دادند و این جذب به ضخامت (از 5 تا 40 میکرومتر) بستگی نداشت.	پوشش‌های با قابلیت اسپری	
[37]	برای دستیابی به نشر کمتر روی یک زیرلایه پولیش شده باید تهیه شوند.	پوشش‌های نازک (حدود 1.5 میکرومتر)	
[34]	لوله دریافت‌کننده از این جنس است.	شیشه بوروسیلیکات	پوشش شیشه‌ای
[36]	متداول‌ترین و گران‌ترین جزء سیستم کلکتورها.	آینه شیشه‌ای خمیده با پوشش نقره	
[36]	جایگزین کم‌هزینه.	فویل آلومینیوم	
[36]	جایگزین کم‌هزینه.	ورق‌های آلومینیوم آنودایز شده	
[36]	جایگزین کم‌هزینه.	ورق‌هایی با پوشش نقره	بازتابنده
[36]	محققین از این ماده برای ناودان استفاده کردند که بازتابندگی 0/974 داشت.	پلاستیک تقویت‌شده با فایبرگلاس	
[36]	51٪ و 39٪ بازدهی را با و بدون پوشش شیشه‌ای نشان دادند.	مواد پراکسی سیاه و فولاد نرم با پوشش	
[34]	محدوده دمای عملیاتی 290 الی 550 درجه سانتی‌گراد را دارد. می‌تواند تا 520 درجه سانتی‌گراد حرارت را منتقل کند. بازده حرارتی را 70٪ افزایش می‌دهد.	نمک مذاب (60٪ وزنی نیترات سدیم و 40٪ وزنی نیترات پتاسیم)	
[36]	به طور رایج برای افزایش کارایی و انتقال حرارت استفاده می‌شوند.	روغن‌های سنتتیک	
[35]	به عنوان سیال پایه در نانوسیال‌ها استفاده می‌شود.	آب	
[35]	بازده دریافت‌کننده را 5٪ افزایش می‌دهند.	نانوسیال نانوذرات مس	
[35]	افزودن به آب 28٪ افزایش در انتقال حرارت را به همراه دارد. در روغن سنتتیک برای ارزیابی عملکرد حرارتی استفاده می‌شود.	نانوسیال اکسید آلومینیوم	
[35]	افزودن به آب 35٪ افزایش در انتقال حرارت را به همراه دارد.	نانوسیال اکسید مس	سیال عامل
[36]	محلول معرفی شده در روغن معدنی می‌تواند بازده را تا 5٪ در مقایسه با روغن خالص افزایش دهد. با آب مقطر نیز به عنوان نانوسیال استفاده می‌شود.	نانولوله‌های کربنی چند جداره	
[35]	بهترین سیال برای افزایش عملکرد فتوولتائیک حرارتی در نظر گرفته شده است.	نانوسیال اکسید گرافن	
[35]	ترکیب با آب می‌تواند به افزایش 128٪-138٪ در انتقال حرارت منجر شود.	نانوذرات عصاره برگ زیتون و ضایعات کشاورزی	
[35]	به عنوان سیال عامل و نمک‌های نیترات مذاب و ذخیره حرارتی استفاده می‌شوند.	نانوسیال کربن دی‌اکسید فوق بحرانی	
[35]	می‌تواند به بازده حرارتی مطلوب حدود 75٪ در میدان مغناطیسی منجر شود.	فروسپال مگنتیک- ترمینول ۶۶	

شرایط آب و هوایی	زمان (دقیقه)	دمای کلکتور پیشنهادی (°C)	دمای کلکتور شاهد (°C)	دمای محیط (°C)	آزمایش
آفتابی	10	31/7	33/9	23/1	نمونه اولیه آزمایش 1
آفتابی	20	44/5	45/4	28/9	نمونه اولیه آزمایش 2
آفتابی	30	54/1	42/2	24/5	نمونه اولیه آزمایش 3
آفتابی	30	63/5	46	28/9	نمونه تاریک آزمایش 4
نیمه ابری	30	55/2	46/9	29/2	نمونه تاریک آزمایش 5



شکل 6 (الف) قطعات برش خورده با دستگاه سی ان سی، (ب) اسکلت با جنس پلکسی گلاس برای جاذب، (ج) کلکتور نهایی و مونتاژ شده.

2-2- نحوه آزمایش

به منظور افزایش اعتبار مقایسه، بین ساختارهای ارائه شده، سازه‌ها در شرایط مکانی و زمانی تقریباً یکسان و در دو آزمایش نمونه اولیه و تاریک مورد بررسی قرار گرفتند. ابتدا ساختار نیمه بیضی یا گنبدی شکل به دلیل سهولت در ساخت مورد بررسی قرار گرفت (نمونه اولیه). آزمایش در شرایط آب و هوایی کاملاً یکسانی انجام شد تا بتوان تاثیر مقدار زمان آزمایش را بر روی جاذب ارائه شده بررسی نمود. در ادامه نمونه تاریک با ساختاری بسیار نزدیک به جاذب ایده‌آل ساخته شد که بصورت جداگانه مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش علاوه بر مقایسه بین دو سازه‌ی نمونه شاهد و تاریک، تاثیرات آب و هوایی بر روی جاذب بررسی گردید.

در هر دو آزمایش، کلکتورها به صورت دستی با زاویه‌ی تابش خورشید تنظیم شده و سیال عامل در تمامی آزمایش‌ها، آب راکد با حجم 250 میلی‌لیتر بوده که با دماسنج ترمومتر دیجیتالی دمای سیال عامل ثبت شده است.

به منظور پیش‌گیری از اختلال در آزمایش به دلیل افزایش فشار، منبعی متصل به ورودی جاذب تعبیه شده و خروجی آن با درپوش بسته شده است. شکل 8. حداکثر دمای سیال عامل توسط ترمومتر در هر آزمایش با شرایط آب و هوایی و مدت زمان آزمایش در جدول 3 ثبت شده است.

جدول 3 اندازه‌گیری دما در شرایط آب و هوایی و زمانی مختلف برای انواع نمونه‌ها.



شکل 8 (الف) دماسنج ترمومتر دیجیتالی، (ب) شرایط آزمایشی برای نمونه اولیه، (ج) شرایط آزمایشی برای جاذب تاریک.

2-3- شبیه‌سازی

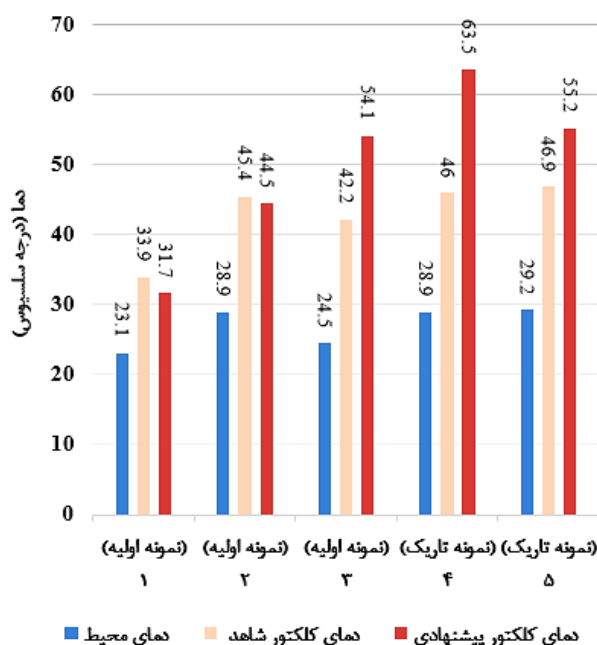
برای سهولت در تحلیل روند بازتابندگی و افزایش راندمان جذب حرارتی، طرح و مدل ارائه شده در برنامه شبیه‌سازی کامسول مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه بین ساختارهای ارائه شده در شبیه‌سازی دوبعدی، بازتابنده‌ها و جاذب حرارتی از نقشه اولیه، در برنامه کامسول وارد و بر مبنای مصالح

دمای نمونه گنبدی در همین نقطه 54/1 درجه سانتی‌گراد و دمای نمونه شاهد ۴۶ درجه سانتی‌گراد است.

این اختلاف دما که به ترتیب 9/4 درجه و 17/5 درجه از نمونه‌های گنبدی و شاهد بیشتر است، به وضوح نشان‌دهنده توانایی بالای جاذب بیضی در جذب و حفظ انرژی حرارتی است. علت اصلی این اختلاف، همان‌طور که در توضیحات پیشین اشاره شد، بازتاب‌های چندباره نور در داخل محفظه بیضی و تمرکز بیشتر پرتوهای تابشی بر روی جاذب مرکزی است.

4- در شکل 8، افت دمای نمونه‌ها در نقطه ۵ (نسبت به نقطه ۴) کاملاً محسوس است. دمای نمونه تاریک از 63/5 به 55/2 درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است درحالی‌که به دلیل افزایش دمای محیط دمای نمونه شاهد از ۴۶ به 46/9 درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این افت دما به وضوح تأثیر پراکندگی نور خورشید در شرایط نیمه‌آبری را بر کارایی سیستم‌ها نمایش می‌دهد.

این افت دما در نمونه تاریک به دلیل ازدیاد سطح تماس با محیط نسبت به نمونه شاهد منطقی بوده و در شرایط پراکندگی نور، کنترل و تمرکز آن روی کانون بیضی سخت‌تر می‌شود. بنابراین پیش‌بینی می‌شود در شرایط تماماً آبری، کارایی سیستم بدون تکنولوژی لوله خلاء به شدت کاهش یابد و می‌توان نتیجه گرفت که وابستگی عملکرد این جاذب به تابش مستقیم بسیار بالاست و در محیط‌های کم‌نور یا آبری، برای حفظ راندمان، به تجهیزاتی چون لوله خلاء یا سیستم‌های جاذب پراکندگی‌پذیر نیاز دارد.



شکل 8 دمای محیط و کلکتورهای ساخته شده برای آزمایشات نمونه اولیه و تاریک.

3-2- نتایج شبیه سازی

مورد استفاده (جاذب از جنس استیل و بازتابنده‌ها از جنس آلومینیوم) تعریف شده است.

تمام اجسام با بازتابندگی بالا تعریف شده تا اختلالی در روند تحلیل ایجاد نشود و با دامنه موج یکسان در فواصل برابر، پرتوهای نور به دهانه ورودی بازتابنده در راستای محور y ، تابیده شده است. پرتوهای نور پس از بازتاب در کانون بازتابنده به جاذب حرارتی برخورد می‌کنند و با هر برخورد، مقداری از انرژی خورد را به جاذب حرارتی می‌دهند.

3- نتایج و بحث

3-1- نتایج بخش تجربی

ساختارهای ارائه شده با کمترین پیچیدگی فنی ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. در نتایج بدست آمده، افزایش راندمان حرارتی کاملاً مشهود بوده که با قرارگیری در محیط‌هایی با تشعشعات بالای خورشید مانند مناطق گرمسیر، بهره‌وری سیستم افزایش خواهد یافت.

با توجه به شکل 8، تأثیرات زمان و آب‌وهوا در سازه‌ها قابل تحلیل است و نتایج زیر حاصل می‌شود:

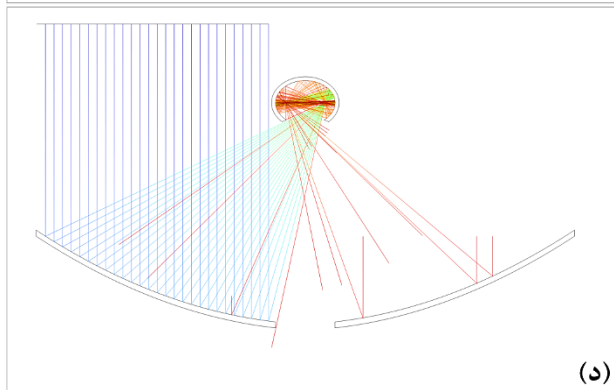
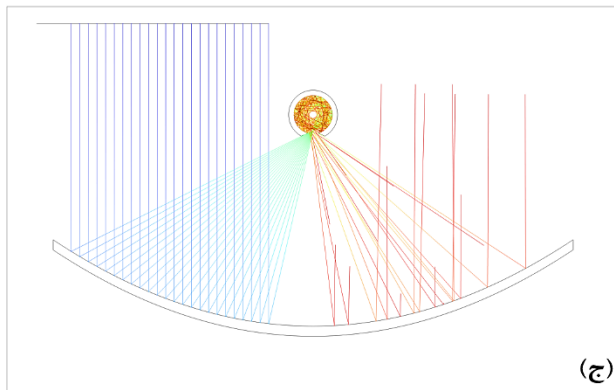
1- در شکل 8، ستون‌های مربوط به نمونه اولیه (جاذب گنبدی شکل) در سه نقطه اندازه‌گیری (۱، ۲ و ۳) به وضوح روند افزایش دمای تدریجی این نمونه را نشان می‌دهد. در نقطه اول، دمای کلکتور پیشنهادی (جاذب گنبدی) حدود 31/7 درجه سانتی‌گراد ثبت شده که 2/2 درجه کمتر از کلکتور شاهد (33/9 درجه سانتی‌گراد) است. این افت دما مطابق انتظار و در نتیجه اتلاف حرارت بیشتر در لحظات اولیه به دلیل افزایش سطح تماس جاذب گنبدی با محیط پیرامون رخ داده است.

اما همان‌طور که در شکل 8 در نقاط بعدی مشاهده می‌شود، در نقطه ۲ دمای نمونه اولیه به 44/5 درجه و در نقطه ۳ به 54/1 درجه سانتی‌گراد می‌رسد. این روند افزایشی نسبت به نمونه شاهد (که در همین نقاط به ترتیب 45/4 و 42/2 درجه سانتی‌گراد بوده) بیانگر کاهش نرخ اتلاف حرارتی با گذر زمان در جاذب گنبدی است. این پدیده به دلیل شکل هندسی گنبدی و به دام افتادن هوای گرم در اطراف جاذب است که به تدریج به کاهش اختلاف دمای بین محیط و سیال موجب افت تلفات گرمایی می‌شود بنابراین دمای جاذب از نمونه شاهد پیشی گرفته است.

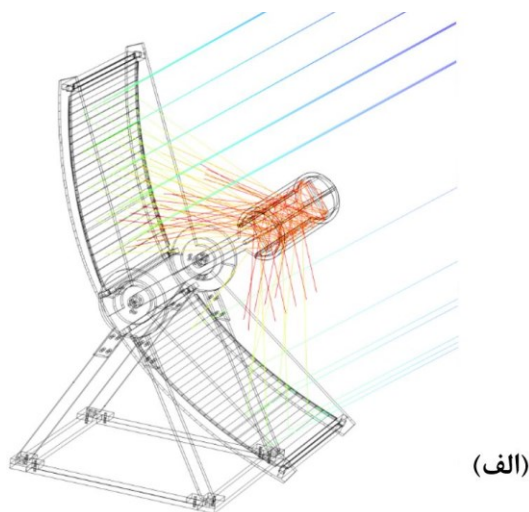
2- بر اساس داده‌های ثبت‌شده در شکل 8، نمونه اولیه (گنبدی شکل) در هر سه نقطه اندازه‌گیری، به تدریج افزایش دما را تجربه می‌کند. در حالی که نمونه شاهد که دارای جاذب ساده‌تری است، در نقطه ۱ با دمای 33/9، در نقطه ۲ با 45/4 و در نقطه ۳ با 42/2 درجه سانتی‌گراد نوسان دمایی ملایمی دارد.

اگر این نتایج را با سیستم‌های لوله خلاء در آبگرمکن‌های خورشیدی یا نیروگاه‌های سهموی خطی مقایسه کنیم، مشخص می‌شود که در صورت حذف اتلاف حرارتی اولیه (که در لوله خلاء با حذف تماس مستقیم جاذب با هوا مهار می‌شود)، جاذب گنبدی به دلیل انحنای بیشتر و قابلیت متمرکزسازی نور، در بازه زمانی کوتاه‌تری به دمای بالاتری می‌رسد. از این رو، ترکیب این هندسه با تکنولوژی لوله خلاء می‌تواند به طرز محسوسی عملکرد سیستم را ارتقاء دهد.

3- در شکل 8، نمونه تاریک (بیضی) در دو نقطه اندازه‌گیری ۴ و ۵ عملکرد کاملاً برتری از خود نشان داده است. در نقطه ۴، دمای جاذب پیشنهادی (نمونه تاریک) به 63/5 درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که

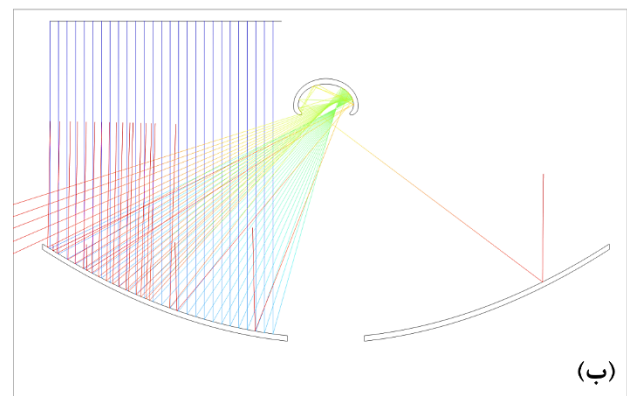
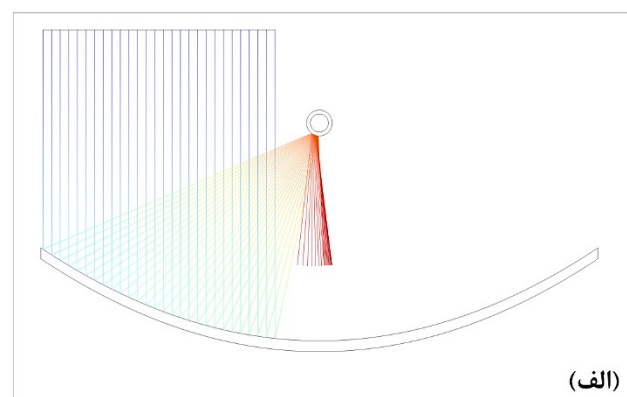


شکل 9 شبیه سازی بازتاب نوری در (الف) نمونه شاهد، (ب) نمونه اولیه، (ج) جسم سیاه و (د) نمونه تاریک.



برای بررسی دقت مدل سازی عددی و سنجش میزان انطباق بین نتایج تجربی و شبیه سازی، تحلیل های کامسول بر پایه ی شرایط واقعی آزمایش طراحی شد. از جمله مواردی که در شبیه سازی لحاظ شد می توان به جنس مواد (استیل برای جاذب، آلومینیوم برای بازتابنده)، تابش خورشیدی یکنواخت، زاویه تابش و شرایط هندسی دقیق ساختارها اشاره کرد. در هر مدل، توزیع پرتوهای تابشی و نحوه ی بازتاب آن ها تا برخورد نهایی با سطح جاذب با ساختارهای: (الف) نمونه شاهد، (ب) نمونه اولیه با ساختار گنبدی شکل، (ج) نمونه جسم سیاه با هندسه استوانه توخالی با مجرای ورودی و (د) نمونه تاریک با هندسه بیضوی، شبیه سازی و نتایج آن در شکل 9 به طور دقیق رهگیری شد.

برای فهم بیشتر از خواص جاذب ارائه شده و اطمینان از عملکرد سیستم، مدل مونتاژ شده با برنامه سالدورک در شبیه سازی کامسول وارد شده و متغیرهای تعریفی همانند روند فوق صورت گرفته است. نتیجه روند حرکت پرتوهای نور در شکل 10 نشان داده شده است.



اولیه در بهترین حالت 28/2٪ بیشتر از نمونه شاهد دمای سیستم را افزایش داده است.

3- برای مقایسه دقیق‌تر از هندسه منتخب، نمونه‌ای از جسم سیاه با هندسه استوانه‌ای توخالی در شبیه سازی مورد بررسی گرفت و از 24 پرتوی نور 19 پرتو پس از 4 بازتاب از جسم خارج شدند این نتیجه نشان می‌دهد که علی‌رغم کوچکتر بودن دهانه ورودی آن پرتوهای نور برخورد کمتری با جاذب حرارتی نسبت به نمونه تاریک داشتند. زیرا در اجسام منظم نور اسیر نمی‌شود و بازتاب آن به راحتی از جسم خارج می‌شود و با کوچکتر شدن دهانه ورودی جاذب، هزینه‌ی بیشتری برای دقت سیستم ترکیب خواهد داشت.

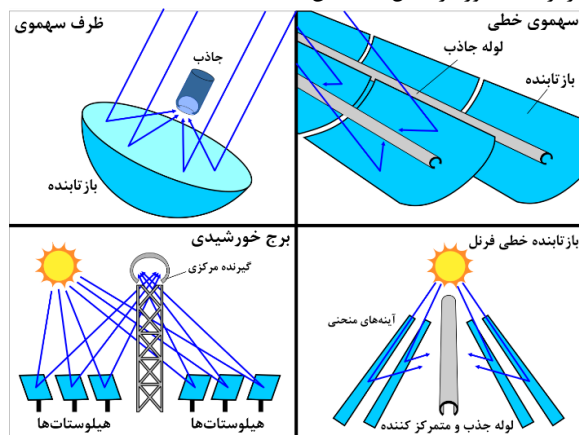
4- در نمونه جاذب تاریک از 28 پرتوی ورودی تنها 16 پرتو پس از چند برخورد از جاذب خارج شدند و انتظار می‌رود بیش از 2 برابر نمونه شاهد جذب انرژی صورت پذیرد اما با توجه به وجود هوا در مسیر بازتاب‌های چندگانه پرتوی نور، محدودیت سیال مورد استفاده و تلفات حرارتی بیشتر در جاذب، افزایش دما در آزمایش‌های عملی 35٪ است.

همچنین در هندسه بیضوی، تجمع نور در بخش سایه‌ی جاذب صورت می‌گیرد. بنابراین با توجه به برخورد مستقیم نور خورشید، یکنواختی نسبی در انتقال حرارتی ایجاد می‌شود.

برای مقایسه دقیق نتایج تجربی و شبیه‌سازی حرارتی سه مدل مختلف (نمونه شاهد، نمونه اولیه گنبدی، و نمونه تاریک بیضوی)، در جدول 4 ارائه شده است که به‌صورت عددی و فنی، عملکرد حرارتی هر مدل را در شاخص‌های کلیدی نشان می‌دهد.

جدول 4 مقایسه عددی نتایج آزمایش و شبیه‌سازی

ساختار ارائه شده به کلکتورهای سهموی خطی محدود نمی‌شود و عملکرد آن در تمامی روش‌های متمرکز کننده نور قابل استفاده است. شماتیک پیشنهادی از نحوه قرارگیری جاذب‌های بیضوی برای فناوری‌های مختلف متمرکز کننده نور در شکل 11 نشان داده شده است.

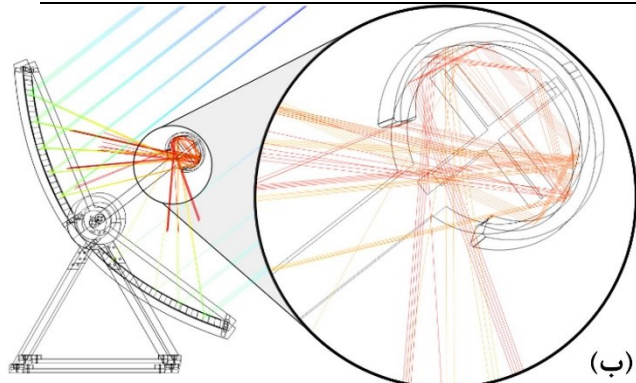


شکل 11 فناوری جاذب بیضوی پیشنهادی نشان‌دهنده انعطاف و سازگاری با تمامی فناوری‌های متمرکز کننده نور.

4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف ارتقاء عملکرد حرارتی کلکتورهای سهموی خطی، طراحی و ساخت یک جاذب با هندسه بیضوی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج

پارامتر/مدل	نمونه شاهد	نمونه اولیه	نمونه تاریک
دمای سیال در آزمایش 1 (°C)	33/9	31/7	-
دمای سیال در آزمایش 2 (°C)	45/4	44/5	-
دمای سیال در آزمایش 3 (°C)	42/2	54/1	-
دمای سیال در آزمایش 4 (°C)	46	-	63/5
دمای سیال در آزمایش 5 (°C)	46/9	-	55/2
تعداد پرتوهای ورودی شبیه‌سازی	28	28	28
پرتوهای با بازتاب چندگانه تعداد	صفر	6	28
درصد بازتاب چندگانه (%)	صفر	21/4	100
انتظار افزایش جذب انرژی نسبت به شاهد در شبیه‌سازی (%)	صفر	36/9	حدود 10٪
افزایش دما نسبت به شاهد در عمل (%)	صفر	28/2	35



شکل 10 الف) نمای کلی از مدل پس از اجرای قیدهای شبیه سازی. ب) نمای جانبی مدل شبیه‌سازی شده در بزرگ‌نمایی. مشاهده بازتاب‌های چندباره.

با استفاده از خروجی‌های برنامه کامسول، می‌توان تحلیلی بر روند افزایش راندمان حرارتی نمود:

1- در شبیه سازی نمونه شاهد، تمامی 28 پرتو ورودی پس از اولین برخورد با سطح بازتابنده، بازتاب یافته و پراکنده شدند، بدون آن‌که بازتاب چندگانه‌ای به سمت جاذب صورت گیرد.

2- در نمونه اولیه با سطح مقطع گنبدی شکل، از 28 پرتو نور تنها 6 پرتو بازتاب مجدد (حدود 4 بازتاب) داشتند و می‌توان گفت 21/4٪ از پرتوها بازتاب چندگانه خواهند داشت. با در نظر گرفتن این‌که پرتوهای نور پس از هر برخورد، به‌طور متوسط 23/8٪ از انرژی خود را به جاذب (از جنس استیل) منتقل می‌کند [38]، انتظار می‌رود که یک پرتوی نوری پس از 4 برخورد حدود 64/8٪ انرژی خود را منتقل کند. بنابراین نمونه اولیه توانایی جذب 36/9٪ درصد بیشتر از نمونه اولیه را دارد اما با در نظر گرفتن تلفات دوبرابری سیستم (سطح تماس جاذب با محیط نسبت به نمونه شاهد تقریباً 3 برابر است) نمونه

حاصل از آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های عددی نشان داد که اصلاح هندسه جاذب نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود رفتار حرارتی سیستم دارد. به‌گونه‌ای که حداکثر دمای سیال عامل در نمونه بیضوی به $63/5$ درجه سانتی‌گراد رسید و برای نمونه گنبدی‌شکل $54/1$ درجه در حالی‌که این مقدار برای برای نمونه شاهد (لوله استوانه‌ای ساده) تنها $46/9$ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد. این اختلاف دمای قابل توجه، بیانگر بهبود حدود 35 درصدی راندمان حرارتی نمونه بیضوی نسبت به نمونه شاهد است که از منظر عملکرد حرارتی، دستاوردی معنادار محسوب می‌شود.

مطابق جدول 5، بخش عمده‌ای از پژوهش‌های پیشین در زمینه بهبود عملکرد کلکتورهای سهموی خطی، بر استفاده از گیرنده‌های حفره‌ای با هندسه‌های پیچیده، بهبود شرایط انتقال حرارت از طریق افزایش سطح مؤثر، به‌کارگیری پوشش‌های جاذب انتخابی یا بهره‌گیری از فناوری لوله خلأ متمرکز بوده‌اند. برای نمونه، کورس و همکاران [24] با معرفی گیرنده حفره‌ای دوقلو در یک کلکتور مجهز به لوله خلأ، افزایش راندمان حرارتی در بازه $5/25$ تا $9/85$ درصد را گزارش کردند. همچنین نتایج مطالعات عددی کائو و وانگ [25] و آدیامان و چولاک [26] نشان داد که با بهینه‌سازی هندسه گیرنده‌های حفره‌ای، از جمله هندسه‌های بیضوی و چندضلعی، می‌تواند راندمان اپتیکی را به بیش از 80 درصد افزایش دهد. با این حال، در اغلب این مطالعات، دستیابی به راندمان‌های بالا مستلزم استفاده از مواد با خواص جذب نوری مطلوب، پوشش‌های پیشرفته یا شرایط ایده‌آل شبیه‌سازی بوده است. در مقابل، تمرکز اصلی پژوهش حاضر، همان‌گونه که در جدول 5 نیز مشاهده می‌شود، بر ارزیابی اثر مستقل هندسه جاذب و مکانیزم برخورد‌های چندانگانه پرتوهای تابشی خورشید با سطح جاذب بوده است. در این راستا، جاذب بیضوی پیشنهادی از

استیل خام و بدون پوشش جاذب انتخابی ساخته شد؛ ماده‌ای که به‌طور ذاتی ضریب جذب نوری بالایی ندارد. این انتخاب به‌صورت آگاهانه و با هدف افزایش انطباق برای سهولت در تولید انبوه انجام گرفت و نقش هندسه جاذب به‌صورت شفاف قابل مشاهده است. با وجود محدودیت متریالی، نتایج تجربی نشان داد که ساختار بیضوی به‌واسطه افزایش احتمال برخورد‌های چندانگانه پرتوهای تابشی و توزیع یکنواخت‌تر شار حرارتی، انتقال حرارت مؤثرتری را نسبت به نمونه شاهد فراهم می‌کند. در مقایسه با پژوهش‌های پیشین نیز نتایج قابل توجهی حاصل شده است. برای نمونه، در پژوهش بلوس و تزیوانیدیس، استفاده از نانوسیال‌های هیبریدی تنها موجب افزایش $1/8$ درصدی راندمان شد [14]. همچنین در کار آبولارین و همکاران، به‌کارگیری نوارهای مارپیچ درون لوله جاذب افزایش راندمان را در حدود 2 درصد گزارش شد [13]. جاویدان و همکاران نیز با استفاده از فین‌های ترکیبی و نانو سیال، به کاهش پیک دمایی حدود 1 درصد و کاهش اتلاف حرارتی تا 3 درصد دست یافتند [3]. در مقابل، روش ارائه‌شده در این پژوهش بدون نیاز به افزودنی‌های پیچیده یا مواد خاص، به بهبودی بالای 16 درجه سانتی‌گراد در دمای کاری و راندمانی بیش از 30 درصد منجر شده است. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طراحی جاذب با هندسه بیضوی می‌تواند به‌عنوان راهکاری ساده، کم‌هزینه و مؤثر برای بهبود عملکرد حرارتی کلکتورهای سهموی خطی مطرح شود. با توجه به پتانسیل بالای ایران در دریافت انرژی خورشیدی، توسعه و بهینه‌سازی این ساختار، به‌ویژه در ترکیب با پوشش‌های جاذب انتخابی یا فناوری لوله خلأ در پژوهش‌های آینده، می‌تواند گامی مهم در جهت افزایش بهره‌وری انرژی خورشیدی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و حرکت به‌سوی تولید انرژی پاک و پایدار در مقیاس ملی باشد.

جدول 5 مقایسه با مطالعات پیشین در حوزه تغییر شکل هندسی جاذب حرارتی.

نویسندگان	هندسه سطح مقطع	فناوری لوله خلأ	افزایش راندمان	روش مطالعه
کورس و همکاران [24] (2022)	لوله با سطح مقطع دایره‌ای و گیرنده‌های خارجی با هندسه حفره‌ای دوقلو و تخت.	دارد	جاذب با گیرنده دوقلو حفره‌ای نسبت به جاذب با گیرنده تخت، در بازه دمایی 20 تا 200 درجه سانتی‌گراد، در بازه‌ای بین $5/25$ تا $9/85$ درصد افزایش راندمان حرارتی نشان داده است.	شبیه‌سازی عددی
کائو و وانگ [25] (2017)	لوله جاذب دایره‌ای داخل گیرنده حفره‌ای بیضوی.	ندارد	استفاده از گیرنده حفره‌ای بیضوی باعث افزایش جذب پرتو خورشیدی نسبت به گیرنده لوله‌ای معمولی شده است.	شبیه‌سازی عددی
آدیامان و چولاک [26] (2024)	لوله جاذب دایره‌ای داخل گیرنده حفره‌ای با هندسه‌های مثلثی، مستطیلی و چندضلعی.	ندارد	در طراحی بهینه با گیرنده حفره‌ای چندضلعی، راندمان اپتیکی کلکتور $81/05$ درصد به‌دست آمده است.	شبیه‌سازی عددی
ونگادسان و همکاران [29] (2022)	جاذب چندلوله نیم‌دایره‌ای در مقایسه با جاذب تک‌لوله دایره‌ای.	دارد	افزایش راندمان حرارتی $43/9$ درصد و انتقال حرارت $28/5$ درصد نسبت به لوله معمولی.	آزمایشگاهی و شبیه‌سازی
فؤاد و همکاران [31] (2024)	گیرنده حفره‌ای 7-شکل با پوسته خارجی مثلثی، حفره دوزنقه‌ای و کانال جریان نیم‌دایره‌ای.	ندارد	برای طراحی بهینه، بیشینه راندمان انرژی $74/7$ درصد و راندمان انرژی $40/7$ درصد.	شبیه‌سازی عددی
دونگا و کومار [28] (2024)	لوله خلأ با لوله جاذب لوزی‌شکل در مقایسه با لوله جاذب دایره‌ای.	دارد	نسبت به جاذب دایره‌ای، بیشینه افزایش‌ها گزارش شده: راندمان حرارتی $2/88$ درصد، راندمان انرژی $1/45$ درصد و راندمان کلی تا $1/4$ درصد.	شبیه‌سازی عددی
الدیمی و عموری [27] (2022)	گیرنده‌های با سطح مقطع دایره‌ای، مربعی، مثلثی، بیضوی و کانالی با سطح محیطی یکسان.	ندارد	از نظر اپتیکی، گیرنده کانالی با 84 درصد بیشترین ضریب برخورد و از نظر حرارتی، گیرنده بیضوی بیشترین راندمان حرارتی متوسط 90 درصد را نشان داده است؛ گیرنده مثلثی ضعیف‌ترین عملکرد حرارتی 83 درصد را دارد.	شبیه‌سازی عددی

لونی و شریفزاده [32] (2024)	گیرنده‌های با سطح مقطع مکعبی، 7-شکل و دوزنقه‌ای (25° و 55°).	ندارد	گیرنده مکعبی بیشترین راندمان اپتیکی 71 درصد را نشان داده است؛ بیشینه راندمان حرارتی برای گیرنده مکعبی حدود 56 درصد گزارش شده و گیرنده دوزنقه‌ای 55° کمترین عملکرد حرارتی با 52 درصد را دارد.	شبیه‌سازی عددی
چن و لی [30] (2015)	گیرنده حفره‌ای خطی 7-شکل با پره‌های پستی و پوشش شیشه‌ای در دهانه.	ندارد	راندمان حرارتی تجربی در دماهای متوسط 335 الی 345 کلوین حدود 48 تا 51 درصد گزارش شده است.	آزمایشگاهی
مطالعه حاضر	جاذب بیضوی‌شکل با سطح مقطع غیرمدور در کلکتور سهموی خطی.	ندارد	افزایش دمای سیال عامل تا حدود 35٪ نسبت به نمونه شاهد با جاذب استوانه‌ای. این بهبود عملکرد، علیرغم استفاده از جاذب ساخته‌شده از استیل خام با ضریب جذب نوری محدود، عمدتاً ناشی از افزایش برخورد‌های چندگانه پرتوهای خورشیدی و کاهش احتمال خروج پرتوهای بازتابی از ناحیه جاذب بوده است.	آزمایشگاهی

5- مراجع

- [1] P. Saini, A. Dhar, and S. Powar, Effect of the X-grid static mixer flow inserts on the performance of parabolic trough collector, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 21, p. 100544, 2024.
- [2] J. F. Rosales-Pérez, A. Villarruel-Jaramillo, M. Pérez-García, J. M. Cardemil, and R. Escobar, Techno-economic analysis of hybrid solar thermal systems with flat plate and parabolic trough collectors in industrial applications, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 86, pp. 98-119, 2024.
- [3] M. Javidan, M. Gorji-Bandpy, and A. Al-Araji, Investigation and simulation of parabolic trough collector with the presence of hybrid nanofluid in the finned receiver tube, *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, Vol. 13, No. 6, p. 100465, 2023.
- [4] J. Song, K. Tong, L. Li, G. Luo, L. Yang, and J. Zhao, A tool for fast flux distribution calculation of parabolic trough solar concentrators, *Solar Energy*, Vol. 173, pp. 291-303, 2018.
- [5] S.-Y. Wu, J.-G. Luo, L. Xiao, and Z.-L. Chen, Effect of different errors on deformation and thermal stress of absorber tube in solar parabolic trough collector, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 188, p. 105969, 2020.
- [6] M. T. Islam, N. Huda, A. Abdullah, and R. Saidur, A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 91, pp. 987-1018, 2018.
- [7] M. E. Carra, E. Setién, L. Valenzuela, R. López-Martín, C. Amador, S. Caron, J. Ballestrín, J. Fernández-Reche, J. A. Carballo, and A. Ávila-Marín, Study of parameters influence on the measurement of vacuum level in parabolic trough collectors' receivers using infrared thermography, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 131, p. 104657, 2023.
- [8] A. Brenner, J. Kahn, T. Hirsch, M. Röger, and R. Pitz-Paal, Soiling determination for parabolic trough collectors based on operational data analysis and machine learning, *Solar Energy*, Vol. 259, pp. 257-276, 2023.
- [9] P. Saini, A. Dhar, and S. Powar, Performance evaluation of a parabolic trough collector with a uniform helical wire coil flow insert, *Results in Engineering*, Vol. 21, p. 101794, 2024.
- [10] E. Bellos and C. Tzivanidis, Alternative designs of parabolic trough solar collectors, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 71, pp. 81-117, 2019.
- [11] Y. Wang, Q. Liu, J. Sun, J. Lei, Y. Ju, and H. Jin, A new solar receiver/reactor structure for hydrogen production, *Energy Conversion and Management*, Vol. 133, pp. 118-126, 2017.
- [12] Y. Zhu, J. Shi, Y. Li, L. Wang, Q. Huang, and G. Xu, Design and experimental investigation of a stretched parabolic linear Fresnel reflector collecting system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 126, pp. 89-98, 2016.
- [13] S. Abolarin, M. Everts, and J. P. Meyer, Heat transfer and pressure drop characteristics of alternating clockwise and counter clockwise twisted tape inserts in the transitional flow regime, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 133, pp. 203-217, 2019.
- [14] E. Bellos and C. Tzivanidis, Thermal analysis of parabolic trough collector operating with mono and hybrid nanofluids, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 26, pp. 105-115, 2018.
- [15] H. Al-Ansary and O. Zeitoun, Numerical study of conduction and convection heat losses from a half-insulated air-filled annulus of the receiver of a parabolic trough collector, *Solar Energy*, Vol. 85, No. 11, pp. 3036-3045, 2011.
- [16] Y. P. Chandra, A. Singh, S. K. Mohapatra, J. Kesari, and L. Rana, Numerical optimization and convective thermal loss analysis of improved solar parabolic trough collector receiver system with one sided thermal insulation, *Solar Energy*, Vol. 148, pp. 36-48, 2017.
- [17] J. D. Osorio, A. Rivera-Alvarez, P. Girurugwiro, S. Yang, R. Hovsapien, and J. C. Ordóñez, Integration of transparent insulation materials into solar collector devices, *Solar Energy*, Vol. 147, pp. 8-21, 2017.
- [18] Q. Wang, H. Yang, X. Huang, J. Li, and G. Pei, Numerical investigation and experimental validation of the impacts of an inner radiation shield on parabolic trough solar receivers, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 132, pp. 381-392, 2018.
- [19] H. Yang, Q. Wang, X. Huang, J. Li, and G. Pei, Performance study and comparative analysis of traditional and double-selective-coated parabolic trough receivers, *Energy*, Vol. 145, pp. 206-216, 2018.
- [20] M. Abdelhamid, B. K. Widyolar, L. Jiang, R. Winston, E. Yablonovitch, G. Scranton, D. Cygan, H. Abbasi, and A. Kozlov, Novel double-stage high-concentrated solar hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with nonimaging optics and GaAs solar cells reflector, *Applied Energy*, Vol. 182, pp. 68-79, 2016.
- [21] D. Rodriguez-Sanchez and G. Rosengarten, Improving the concentration ratio of parabolic troughs using a second-stage flat mirror, *Applied energy*, Vol. 159, pp. 620-632, 2015.
- [22] H. Liang, M. Fan, S. You, W. Zheng, H. Zhang, T. Ye, and X. Zheng, A Monte Carlo method and finite volume method coupled optical simulation method for parabolic trough solar collectors, *Applied energy*, Vol. 201, pp. 60-68, 2017.
- [23] M. Wirz, J. Petit, A. Haselbacher, and A. Steinfeld, Potential improvements in the optical and thermal efficiencies of parabolic trough concentrators, *Solar Energy*, Vol. 107, pp. 398-414, 2014.
- [24] D. N. Korres, E. Bellos, P. Lykas, and C. Tzivanidis, An innovative parabolic trough collector design with a twin-cavity receiver, *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 24, p. 12551, 2022.
- [25] F. Cao, L. Wang, and T. Zhu, Design and optimization of elliptical cavity tube receivers in the parabolic trough solar collector, *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2017, No. 1, p. 1471594, 2017.
- [26] G. Adiyaman and L. Çolak, Design optimization of a new cavity receiver for a parabolic trough solar collector, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, pp. 1-1, 2024.
- [27] M. J. Al-Dulaimi and K. E. Amori, Optical and thermal performance of a parabolic trough collector for different receiver geometries, *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 47, No. 12, pp. 16117-16133, 2022.

- [34] M. Shokrnia, M. Cagnoli, R. Grena, A. D'Angelo, M. Lanchi, and R. Zanino, Photo-thermal optimization of a parabolic trough collector with arrayed selective coatings, *Energies*, Vol. 17, No. 13, p. 3221, 2024.
- [35] B. Mondal and A. Maji, A Brief Review on Analysis and Recent Development of Parabolic Trough Collector, *Energy Storage and Saving*, 2025.
- [36] H. R. Patel, V. B. Patel, and A. R. Chaudhari, A comprehensive review on design aspects and performance characteristics of solar parabolic trough collector, *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 1566-88, 2022.
- [37] A. Drinčić, L. Noč, F. Merzel, and I. Jerman, Future Parabolic Trough Collector Absorber Coating Development and Service Lifetime Estimation, *Coatings*, Vol. 14, No. 9, p. 1111, 2024.
- [38] S. Said, S. Mellouli, T. Alqahtani, S. Algarni, R. Ajjel, K. Ghachem, and L. Kolsi, An experimental comparison of the performance of various evacuated tube solar collector designs, *Sustainability*, Vol. 15, No. 6, p. 5533, 2023.
- [28] R. K. Donga, S. Kumar, and G. Velidi, Numerical investigation of performance and exergy analysis in parabolic trough solar collectors, *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 1, p. 31908, 2024.
- [29] E. Vengadesan, A. R. I. Rumaney, R. Mitra, S. Harichandan, and R. Senthil, Heat transfer enhancement of a parabolic trough solar collector using a semicircular multitube absorber, *Renewable Energy*, Vol. 196, pp. 111-124, 2022.
- [30] F. Chen, M. Li, P. Zhang, and X. Luo, Thermal performance of a novel linear cavity absorber for parabolic trough solar concentrator, *Energy Conversion and Management*, Vol. 90, pp. 292-299, 2015.
- [31] A. Fouad, A. Galal, K. Dessoki, M. H. Eldakamawy, M. A. Hassan, and M. T. Araj, Influence of geometric design variables on the performance of a novel V-shaped cavity receiver, *Renewable Energy*, Vol. 230, p. 120790, 2024.
- [32] R. Loni and M. Sharifzadeh, Performance comparison of a solar parabolic trough concentrator using different shapes of linear cavity receiver, *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 60, p. 104603, 2024.
- [33] P. Sansoni, D. Fontani, F. Francini, D. Jafrancesco, G. Gabetta, M. Casale, R. Campesato, and G. Toniato, Evaluation of elliptical optical cavity for a combustion thermophotovoltaic system, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 171, pp. 282-292, 2017.