



Experimental Performance Analysis of a Laboratory-Scale Parabolic Trough Solar Collector with Absorber Cavity and Multiple Absorber Tubes under Controlled Environmental Conditions

Farshid Behrou¹, Amirhossein Edalatpour², Seyed Mostafa Hosseinalipoor^{3*}, Fatemeh Dabbagh Kashani⁴, Mahdi Moghimi⁵

^{1,2,3} Energy, Water and Environment Research Lab, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

⁴ Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

⁵ Department of Energy Conversion, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 29.07.2025

Revised: 22.10.2025

Accepted: 16.02.2026

Keyword:

Parabolic Trough Solar Collector, Absorber Cavity, Absorber Tube, Solar Energy, Thermal Performance

*Corresponding Author:

Seyed Mostafa Hosseinalipoor

Email: alipoor@iust.ac.ir

ABSTRACT

This study investigates the performance enhancement of a parabolic trough solar collector (PTSC) through the use of absorber cavities, nanofluids, and increasing the number of absorber tubes. To this end, a laboratory-scale collector was designed and fabricated, featuring three copper absorber tubes, two mirror-finished stainless steel absorber cavities, and a silicon dioxide (SiO₂) nanofluid at three volume concentrations: 0.1%, 0.5%, and 1%. The experiments were conducted under laboratory conditions with a solar irradiance of 900 W/m², inlet and ambient temperatures of 26°C, and a flow rate of 0.24 m³/h over a period of 60 minutes. For all test scenarios, the outlet temperature, useful heat gain, and thermal efficiency were recorded. The results showed that in the baseline configuration — with a single absorber tube and no cavity — the outlet temperature reached 41.8°C, the useful heat gain was 29.18 W, and the thermal efficiency was 36.02%. The simultaneous use of three absorber tubes and an absorber cavity significantly improved the outlet temperature and useful heat gain, reaching 57.3°C and 56.81 W, respectively, with a corresponding thermal efficiency of 70.14%. Furthermore, it was observed that the selected nanofluid had a negligible effect on the thermal performance of the system. The findings of this study can be utilized in the design of efficient large-scale industrial collectors to achieve enhanced thermal efficiency.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

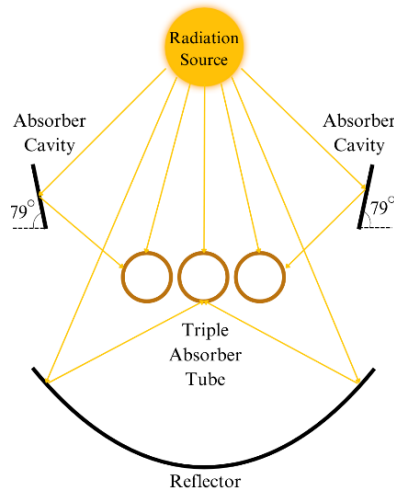
The increasing global demand for energy and environmental concerns about fossil fuel usage have directed attention toward renewable energy sources. Solar energy, being abundant and sustainable, is a prominent option. Among solar technologies, Parabolic Trough Solar Collectors (PTSCs) are widely used for solar thermal applications due to their efficiency in concentrating solar radiation onto a receiver tube. Despite their advantages, PTSCs face challenges in maximizing thermal performance and minimizing heat losses. Various approaches such as employing nanofluids, optimizing absorber tube design, and modifying collector structures have been studied individually. However, limited research has examined the combined impact of multiple enhancement strategies. This study addresses this gap by experimentally investigating the simultaneous effects of absorber cavities, multiple absorber tubes, and silicon dioxide (SiO₂)-water nanofluid on the thermal performance of a laboratory-scale PTSC. Furthermore, this investigation aims to provide practical insights for enhancing the efficiency of industrial-scale solar collectors by applying a multi-faceted approach, combining both geometrical modifications and working fluid enhancement.

Methodology

A laboratory-scale PTSC was designed and fabricated, featuring three copper absorber tubes, two mirror-polished stainless steel absorber cavities, and SiO₂-water nanofluid at volume concentrations of 0.1%, 0.5%, and 1%. The collector dimensions, summarized in Table 1, were optimized through thermodynamic analysis using MATLAB and design of experiments (DOE) with Minitab. The PTSC is schematically illustrated in Figure 1. The absorber cavities were designed to enhance the optical concentration of solar radiation on the absorber tubes and improve the radiative heat transfer rate. Two cavities, each measuring 45 cm in length and 4 cm in width, were fabricated from the same reflective stainless steel as the main parabolic surface. These cavities were positioned 14 cm above the reflector surface and 5 cm above the absorber tubes, installed at an optimized angle of 79 degrees relative to the horizontal plane based on Soltrace optical simulation results. Experiments were conducted in a controlled laboratory environment with a solar simulator providing 900 W/m² irradiance, while the inlet fluid and ambient temperatures were maintained at 26°C. The flow rate was fixed at 0.24 m³/h, and the testing duration was 60 minutes for each configuration. The inlet and outlet fluid temperatures were recorded at five-minute intervals, and the useful heat gain and thermal efficiency were subsequently calculated based on these measurements. The experimental procedure followed ISO 9806 standards, and the uncertainty analysis was performed considering measurement errors from thermocouples, flow meter, and solar meter.

Table 1. Main parameters of the laboratory-scale solar collector.

Parameter	Value
Collector length	45 cm
Collector width	20 cm
Absorber tube diameter	8.01 mm
Absorber tube thickness	0.76 mm
Volumetric flow rate	0.24 m ³ /h
Mass flow rate	0.0665 kg/s

**Figure 1. Schematic of the PTSC with absorber cavities and triple absorber tubes.**

Results and discussion

The thermal performance was evaluated across several configurations by varying the number of absorber tubes and the inclusion of absorber cavities. The results showed that both features contributed to improved outlet temperatures, useful heat gain, and overall efficiency, especially when combined.

The integration of absorber cavities and triple tubes significantly improved both the useful heat gain and thermal efficiency. The absorber cavities enhanced solar radiation trapping by redirecting reflected rays toward the absorber tubes, reducing optical losses. The multiple absorber tubes increased the surface area exposed to radiation, distributing heat more uniformly and minimizing localized hot spots.

The effect of SiO₂-water nanofluid was evaluated across all configurations. In single-tube setups, the nanofluid demonstrated negligible influence on performance, likely due to the limited operating temperature range and modest enhancement of thermal conductivity at lower temperatures. However, in the triple-tube with cavity setup, the nanofluid with 1% concentration marginally increased the thermal efficiency to 73.91% and the useful heat gain to 59.86 W, reflecting a 3.76% improvement compared to water alone. This suggests that nanofluids may offer performance gains primarily in high-temperature or high-irradiance conditions when used with effective absorber designs. Figure 2 compares the

useful heat gain and thermal efficiency for all tested configurations, highlighting the dominant effect of absorber geometry over nanofluid usage.

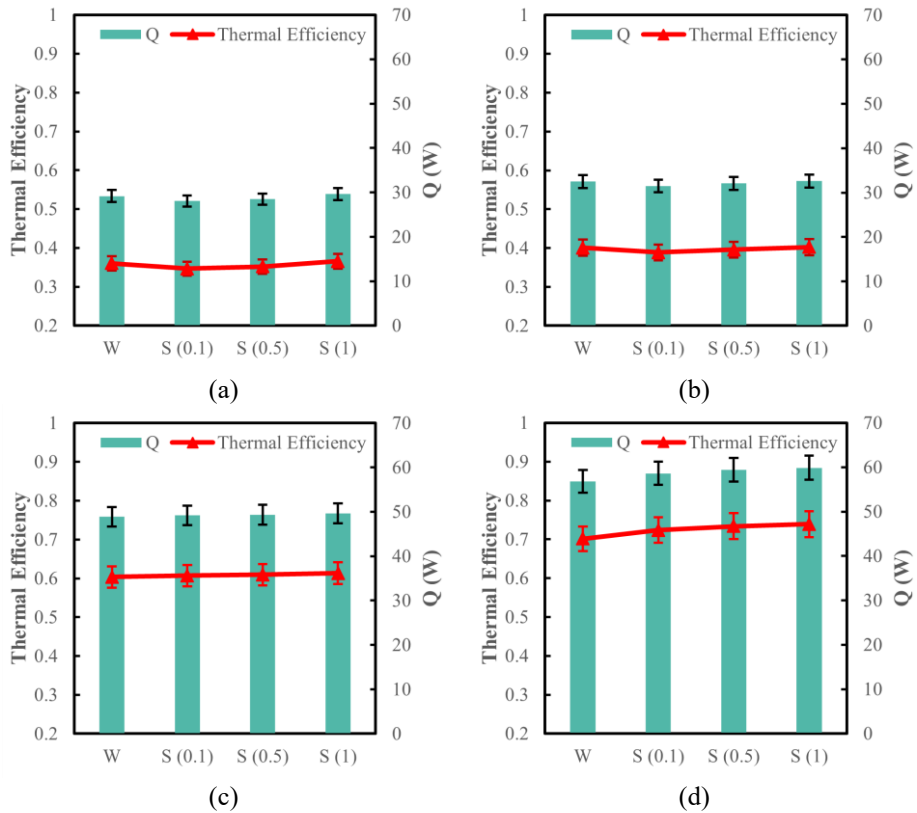


Figure 2. Useful heat gain and thermal efficiency with nanofluid as the working fluid for four cases: (a) single absorber tube without absorber cavities, (b) single absorber tube with absorber cavities, (c) triple absorber tubes without absorber cavities, (d) triple absorber tubes with absorber cavities

Conclusion

This experimental study demonstrated that combining absorber cavities with multiple absorber tubes is an effective strategy to enhance the thermal performance of PTSCs. The use of absorber cavities contributed to reducing optical losses and achieving more uniform heat distribution, while multiple absorber tubes significantly increased heat absorption capacity. Although SiO₂-water nanofluid provided only minor improvements, its potential benefits at higher operating temperatures merit further investigation.

Key findings include:

- A 94% increase in thermal efficiency was achieved by integrating both absorber cavities and multiple tubes compared to the baseline setup.
- The combination of triple absorber tubes and cavities yielded the highest thermal efficiency of 70.14%.
- SiO₂ nanofluid increased thermal efficiency marginally (3.76%) when used with the optimized configuration.

- The results underscore the importance of absorber design modifications over nanofluid enhancement for laboratory-scale PTSCs.

These outcomes are valuable for the future design of efficient industrial-scale PTSCs. Future research should explore the combined effects of alternative nanofluids with higher thermal conductivities and advanced absorber geometries.



تحلیل عملکرد تجربی متمرکزکننده خورشیدی سهموی آزمایشگاهی همراه با حفره جاذب و لوله‌های جاذب چندگانه تحت شرایط محیطی ثابت

فرشید بهرو^۱، امیرحسین عدالت‌پور^۲، سید مصطفی حسینعلی‌پور^{۳*}، فاطمه دباغ‌کاشانی^۴، مهدی مقیمی^۵

۱ و ۲- آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

۴- دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

۵- گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۵/۰۷

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۷/۳۰

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۷

کلید واژگان:

متمرکزکننده خورشیدی سهموی، حفره جاذب، لوله جاذب، انرژی خورشیدی، عملکرد حرارتی.

*نویسنده مسئول: سید مصطفی

حسینعلی‌پور

پست الکترونیکی:

alipour@iust.ac.ir

این پژوهش به بررسی بهبود تجربی عملکرد یک متمرکزکننده خورشیدی سهموی با استفاده از حفره‌های جاذب، نانوسیال و افزایش تعداد لوله‌های جاذب پرداخته است. برای این منظور، نمونه‌ای از این متمرکزکننده با ابعاد آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد که در آن از سه لوله‌ی جاذب مسی که در آن‌ها نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید جریان دارد، و دو حفره‌ی جاذب شامل ورق‌های فولاد ضدزنگ استفاده شده است. در این مطالعه نانوسیال در ۳ غلظت حجمی ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد استفاده شده است. آزمایش‌ها در محیط آزمایشگاهی با شدت تابش 900 W/m^2 ، دمای ورودی و دمای محیط 26°C و دبی $0.24 \text{ m}^3/\text{h}$ در بازه زمانی ۶۰ دقیقه انجام شده‌اند. برای تمام حالت‌ها مقدار دمای خروجی، حرارت مفید و بازده حرارتی گزارش شده است. طبق مشاهدات، دمای خروجی نهایی در حالت پایه (تنها با یک لوله‌ی جاذب و بدون استفاده از حفره جاذب) 41.8°C ، حرارت مفید 29.18 W و بازده حرارتی 36.02% درصد گزارش شده است. استفاده همزمان از سه لوله‌ی جاذب و حفره‌ی جاذب باعث افزایش قابل توجه دمای خروجی و به تبع آن حرارت مفید شده است به طوری که مقدار آن‌ها در این حالت به ترتیب برابر با 57.3°C ، 56.81 W و 70.14% درصد حاصل شده است. همچنین مشخص گردید که نسبت به آب، نانوسیال انتخاب شده بهبود محسوسی در عملکرد حرارتی ایجاد نمی‌کند. از نتایج این پژوهش می‌توان برای ساخت متمرکزکننده در ابعاد صنعتی بهره برد و بازده حرارتی آن‌ها را افزایش داد.



مقدمه

امروزه با توجه به افزایش تقاضا برای انرژی و نگرانی‌های زیست محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، توجه بیشتری نسبت به منابع انرژی تجدیدپذیر وجود دارد. انرژی خورشیدی یکی از مهم‌ترین و در دسترس‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود که پتانسیل بالایی برای تامین انرژی پاک و پایدار دارد [۱]. استفاده از فناوری‌های مختلف برای جذب و تبدیل این انرژی، یکی از موضوعات مهم در پژوهش‌های مهندسی انرژی محسوب می‌شود. متمرکزکننده‌های خورشیدی سهموی به عنوان یکی از فناوری‌های کلیدی در تبدیل انرژی خورشیدی به انرژی حرارتی شناخته می‌شوند [۲]. این متمرکزکننده‌ها از یک بازتابنده سهموی برای متمرکز کردن پرتوهای خورشید روی یک لوله جاذب استفاده می‌کنند که در آن، سیال عامل جریان دارد [۳]. معمولاً جنس لوله‌ی جاذب متمرکزکننده‌های خورشیدی سهموی عادی از نوع مسی است زیرا مس هدایت حرارتی بالا و جذب تشعشع مناسبی دارد [۴]. افزایش حرارت مفید و بازده حرارتی این متمرکزکننده‌ها و کاهش اتلافات حرارتی آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تأثیر مستقیمی بر کارایی کلی سیستم‌های گرمایش خورشیدی و تولید برق خورشیدی دارد [۵؛ ۶].

یکی از مهم‌ترین چالش‌های متمرکزکننده‌های خورشیدی، بهینه‌سازی جذب انرژی خورشیدی و کاهش تلفات حرارتی است. طراحی بهینه لوله جاذب [۷] و استفاده از نانو سیالات به عنوان سیال عامل [۸]، دو راهکار اساسی برای افزایش بازده حرارتی متمرکزکننده‌های خورشیدی محسوب می‌شوند. نانو سیالات، به دلیل داشتن خواص حرارتی بهبودیافته نسبت به سیالات سنتی، می‌توانند انتقال حرارت را در سیستم‌های گرمایشی بهبود بخشند. به طور خاص، افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی و بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت می‌شود [۹]. در سال‌های اخیر از نانو سیالات متعددی در متمرکزکننده‌های خورشیدی سهموی استفاده شده است [۱۰]. تالوگری و همکاران [۱۱] از نانو سیال نانولوله کربنی چنددیواره در این نوع متمرکزکننده استفاده کردند و تا ۱۱ درصد افزایش بازدهی حرارتی مشاهده کردند. موهاناول و همکاران [۱۲] با استفاده از نانو سیال آهن اکسید-آب به همراه فین‌های مسی توانستند دمای سیال را به ۶۲/۳ درجه سانتیگراد و بازده حرارتی را به ۷۲/۹ درصد برسانند. کومار [۱۳] از نانو سیالات مس اکسید-آب و آلومینیوم اکسید-آب در سیستم استفاده کرد و توانست بازدهی متمرکزکننده را از ۲۸/۰۲ تا ۴۸/۴ درصد برای نانو سیال اول و از ۱۴/۶ تا ۳۱/۲۸ درصد برای نانو سیال دوم افزایش دهد. میزان اختلاف بازده ناشی از بکارگیری دبی‌ها و غلظت‌های مختلف است. در برخی از متمرکزکننده‌های سهموی با تغییر جنس لوله‌ی جاذب از مس به شیشه، این امکان به وجود می‌آید که در هنگام استفاده از نانو سیالات، بازدهی حرارتی بالاتری حاصل گردد زیرا در این حالت، نانو سیال نیز جذب تشعشع دارد [۱۴]. این نوع متمرکزکننده‌ها اصطلاحاً متمرکزکننده‌های جذب مستقیم سهموی نام دارند. در همین راستا هیهات و همکاران [۱۵] از نانو سیال مس اکسید-آب در غلظت‌های مختلف استفاده کردند و توانستند بازدهی حرارتی متمرکزکننده را به ۶۴/۲ درصد برسانند. عدالت پور و همکاران [۱۶] از نانو سیالات نانولوله کربنی چنددیواره-آب و تیتانیوم دی اکسید-آب در این نوع متمرکزکننده استفاده کردند و به ترتیب ۱۳۲/۰۲ و ۶۶/۴۱ درصد بازدهی بیشتر نسبت به حالتی که تنها سیال پایه‌ی آب مورد استفاده قرار گیرد مشاهده کردند.

در دسته‌های دیگر از پژوهش‌ها تغییراتی در سازه متمرکزکننده یا لوله‌ی جاذب به وجود می‌آید تا بازدهی حرارتی افزایش پیدا کند. حمدا و همکاران [۱۷] از لوله‌ی جاذب مارپیچ استفاده کردند که این لوله باعث ایجاد

یک شیب فشار منفی شد در نتیجه جریان‌های گردابه‌ای به وجود آمد که باعث افزایش اختلاط سیال در مرکز و دیواره‌ی لوله شد و نهایتاً انتقال حرارت بهبود یافت و بازده حرارتی $83/5\%$ در صد افزایش پیدا کرد. ال‌شبیلاوی و هیهات [۱۸] از نوارهای پیچ‌خورده با پوشش آب‌گریز برای افزایش بازده حرارتی متمرکزکننده استفاده کردند که با استفاده از این روش توانستند بازده حرارتی را تا $237/5\%$ درصد افزایش دهند که این مقدار مربوط به نوار پیچ‌خورده با بیشترین عرض (20 میلی‌متر) و کمترین نسبت پیچش در دبی 250 لیتر بر ساعت بود. هو و همکاران [۱۹] با رویکرد عددی اثر استفاده از فین‌های مارپیچی و حلقوی را در لوله‌ی جاذب بر سی کردند که مشخص شد فین مارپیچی عملکرد بهتری نسبت به فین حلقوی دارد. فین مارپیچی با 4 دور و ارتفاع 4 میلی‌متر باعث افزایش $4/5$ درصدی بازده حرارتی متمرکزکننده شد اما ضریب اصطکاک 30 درصد افزایش یافت. بنابراین از معایب فین‌ها و سایر درج‌ها می‌توان به افزایش افت فشار در سیستم اشاره کرد. بایجو و همکاران [۲۰] اثر قرارگیری جاذب ثانویه در نزدیکی لوله‌ی جاذب را به صورت تجربی مطالعه کردند. در مطالعه آن‌ها مشاهده شد که با استفاده از جاذب ثانویه دمای خروجی متمرکزکننده به میزان $19/71$ درصد و همچنین بازده حرارتی به میزان $20/94$ درصد افزایش پیدا کرده است. هو و همکاران [۲۱] با استفاده از جابه‌جایی لوله‌ی جاذب، سطح کردن ناحیه فوقانی این لوله و استفاده از بازتابنده‌ی ثانویه کم‌گسیل، بازده حرارتی متمرکزکننده را تا $20/59$ درصد افزایش دادند. مطابق رویکرد عددی بکار گرفته شده، این طراحی به دلیل عملکرد بهتر در کاهش تلفات و تحمل تنش مکانیکی کمتر، به عنوان گزینه‌ای مناسب برای متمرکزکننده‌های خورشیدی سهموی شناخته شد. ناونکومار و همکاران [۲۲] به منظور بهره‌برداری بیشتر از متمرکزکننده خورشیدی سهموی، از راهکار چرخاندن لوله‌ی جاذب استفاده کردند که منجر به افزایش بازدهی حرارتی 38 درصدی متمرکزکننده شد. این راهکار به طور دقیق‌تر توسط نوروزی و همکاران [۲۳] بررسی شده بود که در کار آن‌ها مشخص گردید چرخاندن لوله در دبی‌های پایین (حدود $0/5$ لیتر بر دقیقه) تأثیر منفی در بازده حرارتی دارد و تنها در دبی‌های بیشتر از 2 لیتر بر دقیقه باعث افزایش بازده حرارتی می‌گردد.

خلاء تحقیقاتی بسیاری از مطالعات انجام شده این است که تنها یک جنبه از عوامل افزایش بازده را در متمرکزکننده خورشیدی سهموی بررسی کرده‌اند. در برخی پژوهش‌ها صرفاً تغییرات هندسی در لوله‌ی جاذب اعمال شده است، در برخی دیگر تنها نوع سیال عامل تغییر یافته، و در تعدادی از مطالعات نیز از بازتابنده‌های ثانویه برای بهبود جذب حرارتی استفاده شده است. با این حال، تاکنون بررسی تلفیقی و تجربی اثر همزمان چند اصلاح هندسی در این نوع کلکتورها انجام نشده است. در پژوهش حاضر برای نخستین بار، تأثیر همزمان استفاده از حفره‌های جاذب، نانو سیال و لوله‌های جاذب چندگانه به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. نوآوری این کار در طراحی خاص حفره‌های جاذب و آرایش سه‌گانه‌ی لوله‌های جاذب نهفته است که به گونه‌ای انتخاب شده‌اند تا پرتوهای بازتابیده را در ناحیه‌ی کانونی به دام انداخته و بیشینه‌ی تابش ممکن را جذب نمایند. چنین ترکیبی از اصلاحات هندسی تاکنون در هیچ مطالعه‌ی تجربی گزارش نشده و اجرای آن در مقیاس آزمایشگاهی نیز به دلیل پیچیدگی‌های ساخت و هم‌ترازی نوری، دشوار و هزینه‌بر است. از منظر تعمیم‌پذیری، باید اشاره کرد که کارایی این طراحی وابسته به نسبت‌های هندسی و زوایای تمرکز است و می‌تواند در سیستم‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر نیز، در صورت حفظ هندسه‌ی مشابه و استفاده از سیستم ردیاب خورشیدی، بازدهی مناسبی ایجاد کند. برای ارزیابی عملی این نوآوری‌ها، یک نمونه‌ی آزمایشگاهی به عنوان موردی مطالعه‌ای با هزینه‌ی پایین طراحی

و ساخته شد تا مبنایی برای توسعه‌ی صنعتی کلکتورهای خورشیدی با بازده بالاتر فراهم گردد. در این آزمایش‌ها از آب و نانو سیال سیلیکن دی‌اکسید-آب به عنوان دو سیال عامل استفاده گردید که انتخاب این نانو سیال به دلیل پایداری مناسب آن بوده است.

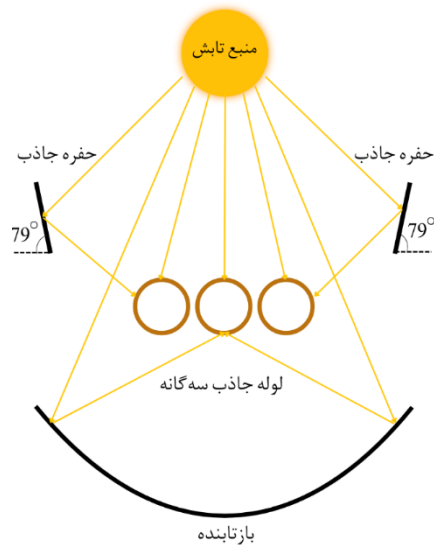
مشخصات متمرکزکننده سهموی آزمایشگاهی و ملاحظات مربوط به تست آن

با توجه به اینکه هدف، طراحی و ساخت یک متمرکزکننده خورشیدی آزمایشگاهی کوچک کم‌هزینه بود، پیاده سازی معادلات ترمودینامیکی حاکم بر عملکرد آن در نرم‌افزار متلب ضرورت داشت. پس از انجام این کار، برای یافتن ابعاد بهینه که بیشترین بازده حرارتی در آن‌ها حاصل شود، از روش طراحی آزمایش در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده گردید. بدین ترتیب برای پارامترهای مهم شامل قطر داخلی و ضخامت لوله، طول و عرض متمرکزکننده و دبی حجمی سیال عبوری از لوله‌ی جاذب، حدود بالا و پایین با توجه به محدودیت‌های بازار تعریف و در نهایت ابعاد مورد استفاده برای ساخت متمرکزکننده حاصل شد. این ابعاد به همراه سایر مشخصات در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای انتخاب شده برای متمرکزکننده خورشیدی.

پارامتر	مقدار
طول متمرکزکننده	۴۵ cm
عرض متمرکزکننده	۲۰ cm
قطر لوله‌ی جاذب	۸/۰۱ mm
ضخامت لوله‌ی جاذب	۰/۷۶ mm
نرخ دبی حجمی	۰/۲۴ m ³ /h
نرخ دبی جرمی	۰/۰۶۶۵ kg/s

متمرکزکننده ساخته شده شامل ۳ بخش است: بازتابنده، لامپ و نگهدارنده. بازتابنده، مهم‌ترین قسمت متمرکزکننده است که وظیفه‌ی متمرکز کردن اشعه‌های ساطع شده از لامپ را برعهده دارد. این جزء به شکل سهموی و از جنس فولاد ضد زنگ ۳۱۶L با ضریب بازتاب ۹۰ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه خورشید حرارت زیادی از خود ساطع می‌کند، بنابراین لامپی به عنوان شبیه ساز خورشید به کار می‌رود که از شدت تشعشعی بالایی برخوردار است. در این متمرکزکننده از یک لامپ هالوژنی به عنوان خورشید مصنوعی استفاده شده است و شدت تشعشعی که از لامپ بر روی متمرکزکننده ساطع می‌شود طبق استانداردهای موجود برای تست متمرکزکننده تعیین می‌شود [۲۴]. این کار با استفاده از یک دایمر انجام می‌شود و شدت تابش لامپ برابر با ۹۰۰ وات بر متر مربع برای تمام آزمایشات اعمال می‌شود. شدت تابش یکسان در تمام حالت‌ها، امکان مقایسه‌ی دقیق را فراهم می‌کند. جهت نگهداری مجموعه شامل بازتابنده، لامپ و دایمر در یک قاب، نگهدارنده‌ای از جنس بازتابنده در نظر گرفته شده است تا همه اجزاء به صورت ثابت کنار هم قرار گیرند. این نگهدارنده، لامپ را در فاصله‌ی ۳۰ سانتی متری از سطح بازتابنده نگه داشته است. کار دیگر نگهدارنده، حفظ لوله‌ی جاذب در فاصله‌ی قانونی متمرکزکننده می‌باشد. شماتیک متمرکزکننده در شکل ۱ و متمرکزکننده ساخته شده در شکل ۲ نمایش داده شده‌اند.

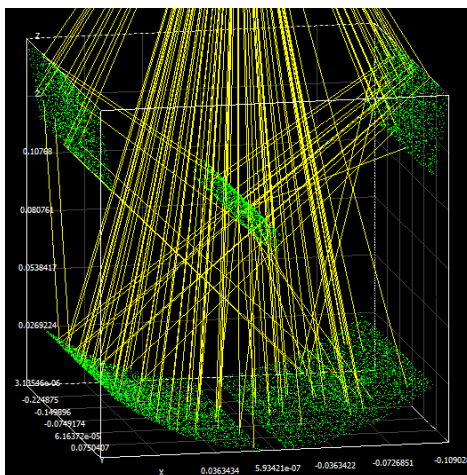


شکل ۱. شماتیک متمرکزکننده خورشیدی با حفره‌های جاذب و لوله‌ی جاذب سه‌گانه.



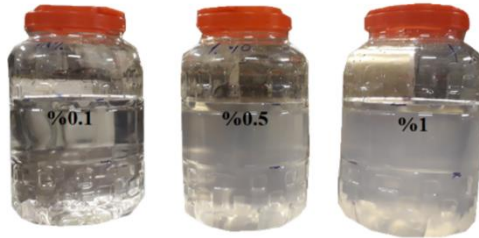
شکل ۲. متمرکزکننده خورشیدی ساخته شده.

جهت بیشتر متمرکز کردن اشعه‌های نوری روی لوله‌ی جاذب و بهبود نرخ انتقال حرارت تشعشعی روی آن، از حفره‌ی جاذب استفاده می‌شود. این تکنیک از افزایش هزینه ساخت بابت بزرگ‌تر شدن ابعاد متمرکزکننده جلوگیری می‌کند. ۲ حفره با طول ۴۵ و عرض ۴ سانتی‌متر از جنس بازتابنده‌ی اصلی در نظر گرفته شده‌اند. این حفره‌ها در ارتفاع ۱۴ سانتی‌متری سطح بازتابنده‌ی اصلی و ۵ سانتی‌متری بالای لوله‌ی جاذب قرار دارند. با استفاده از نرم‌افزار Soltrace زاویه‌ی بهینه برابر با ۷۹ درجه نسبت به افق برای قرارگیری دو حفره حاصل گردید. زوایای متعددی در این نرم‌افزار بررسی شدند و مشخص گردید در این زاویه بیشترین میزان پرتوهای خورشیدی پس از برخورد با بازتابنده و حفره‌های جاذب به لوله‌ی جاذب می‌رسد.



شکل ۳. شبیه‌سازی پرتوهای خورشیدی در نرم‌افزار Soltrace.

لوله‌ی جاذب از جنس مس انتخاب شده است تا ضریب هدایت حرارتی بالاتر و جذب تشعشع مناسب‌تری داشته باشد [۲۵]. به منظور بهبود جذب حرارت از منبع نوری، سطح خارجی لوله با رنگ سیاه پوشانده شده است [۲۶]. دو نوع لوله‌ی جاذب در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است: لوله‌ی جاذب منفرد و لوله‌ی جاذب سه‌گانه. قطر داخلی و ضخامت لوله‌های جاذب برابر با ۸/۰۱ و ۰/۷۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به کوچک بودن ابعاد متمرکزکننده و به تبع آن نازک بودن جداره‌ی لوله‌ی جاذب، جهت پمپاژ سیال از یک پمپ با توان پایین استفاده شد. پمپ آکواریوم مدل HX-188F با توان ۸ وات و با حداکثر هد ۱ متر استفاده شده است. این پمپ داخل مخزن سیال قرار می‌گیرد که حجمی برابر با ۴/۵ لیتر دارد و با پشم شیشه کاملاً عایق‌بندی شده است. دو نوع دماسنج در سیستم به کار گرفته شده است: دماسنج دیجیتالی از نوع TPM-10 در داخل مخزن و ترموکوپل نوع K با آردوینو در ورودی و خروجی لوله‌ی جاذب. دو نوع سیال در این پژوهش استفاده شده است: آب و نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید (SiO₂)-آب. نانوسیال مذکور در سه غلظت حجمی ۰/۱، ۰/۵ و ۱ در صد آماده شد که این غلظت‌ها در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در غلظت ۰/۱ درصد نانوسیال شفاف و نزدیک به آب است و با افزایش غلظت تا ۱ درصد به تدریج کدرتر می‌شود که نشان‌دهنده‌ی وجود نانوذرات بیشتر در غلظت بالاتر است. با افزایش غلظت میزان مواد جامد در نانوسیال بیشتر می‌شود که می‌تواند باعث شود دمای نهایی آن در سیستم افزایش پیدا کند. افت فشار نیز با افزایش غلظت، زیاد می‌شود [۲۷]. استفاده‌ی بیش از حد از نانوذرات تأثیر معکوس در بازده حرارتی دارد و معمولاً تمام نانوسیالات در غلظت‌های پایین برای متمرکزکننده‌ها استفاده می‌شوند. برای تن‌نشین نشدن نانوسیال در سیستم، از یک همزن مکانیکی استفاده شده است که در طول مدت تست با دور ۱۰۰۰ rpm فعال بوده است. خواص نانوذره سیلیکن دی‌اکسید در جدول ۲ آورده شده است [۲۹؛۲۸].

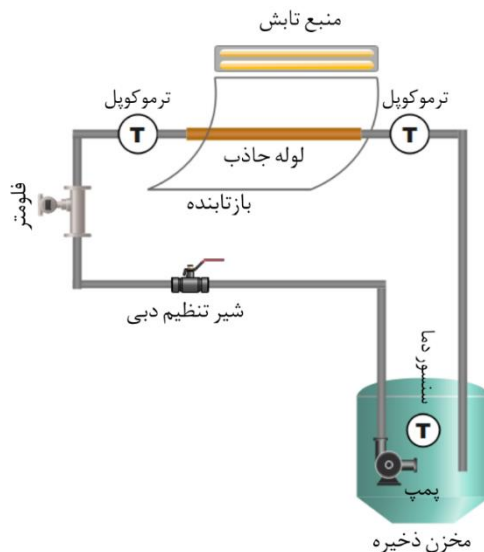


شکل ۴. نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید-آب در ۳ غلظت.

جدول ۲. مشخصات نانوذره سیلیکن دی‌اکسید.

پارامتر	مقدار
میانگین اندازه ذرات	۷ الی ۱۴ نانومتر
سطح مخصوص	بیشتر از ۲۰۰ متر مربع بر گرم
چگالی حجمی	۰/۰۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب
خلوص	بیشتر از ۹۹/۸ درصد
ظرفیت حرارتی ویژه	۷۴۵ ژول بر کیلوگرم کلونین
ضریب هدایت حرارتی	۱/۳۸ وات بر متر کلونین

آزمایشات در فضای آزمایشگاه انرژی، آب و محیط زیست دانشگاه علم و صنعت ایران مطابق استاندارد [۳۰] انجام شده است و نتایج با فاصله‌ی زمانی ۵ دقیقه ثبت شده است. دمای محیط و دمای ورودی سیال برابر با ۲۶ درجه سانتیگراد و فشار محیط برابر با ۱ اتم‌سفر در نظر گرفته شد. دبی حجمی سیال عبوری از لوله‌ی جاذب برابر با ۰/۲۴ متر مکعب بر ساعت در نظر گرفته شده است. شماتیک دستگاه تست در شکل ۵ و تصویر واقعی آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. شماتیک دستگاه تست متمرکزکننده خورشیدی.



شکل ۶. مجموعه تست متمرکزکننده خورشیدی.

پارامترهای محاسباتی

حرارت مفید با استفاده از رابطه ۱ حاصل می‌گردد [۳۱]. در این رابطه، \dot{m} دبی جرمی بر حسب کیلوگرم بر ثانیه، C_p ظرفیت حرارتی ویژه سیال بر حسب $J/(kg \cdot ^\circ C)$ و T_{in} و T_{out} به ترتیب دماهای ورودی و خروجی بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشند. طبق این رابطه با افزایش دمای خروجی، حرارت مفید حاصل شده افزایش پیدا می‌کند.

$$Q_{useful} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

بازده حرارتی مطابق رابطه ۲ محاسبه می‌گردد که میزان آن وابسته به حرارت مفید (Q_{useful})، شدت تشعشع لامپ (I_b) بر حسب وات بر متر مربع و A سطح بازتابنده متمرکزکننده بر حسب متر مربع محاسبه می‌گردد [۱۴]. با توجه به ثابت بودن سطح متمرکزکننده و میزان تابش در حالت‌های مختلف، اختلاف بازده میان این حالت‌ها کاملاً وابسته به میزان اختلاف حرارت مفید مربوط به آن‌ها می‌باشد.

$$\eta_{thermal} = \frac{Q_{useful}}{I_b A} \quad (2)$$

آنالیز خطا

در آزمایشات تجربی با توجه به خطای سیستماتیک ناشی از عدم قطعیت تجهیزات اندازه‌گیری و خطای تصادفی ناشی از پراکندگی داده‌ها، همواره مقداری خطای کلی در نتایج اعلام شده وجود دارد. در این آزمایش عدم قطعیت ترموکوپل‌ها برابر با ۰/۲۵ درجه سانتیگراد، عدم قطعیت تابش سنج برابر با ۱۰ وات بر متر مربع و عدم قطعیت مربوط به دبی برابر با ۲ درصد می‌باشد. با توجه به این مقادیر و استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ [۳۲]، [۳۳] عدم قطعیت حرارت مفید و بازده حرارتی محاسبه می‌گردد. مقدار عدم قطعیت حرارت مفید کمتر از ۴/۵ درصد و مقدار عدم قطعیت بازده حرارتی کمتر از ۵/۲ درصد می‌باشد. در جدول ۳، مقادیر دمای برازش شده سیال همراه با انحراف معیار و واریانس آزمایش مشخص شده است. این مقادیر مربوط به حالت پایه است که از متمرکزکننده خورشیدی با لوله‌ی جاذب منفرد بدون حفره‌ی جاذب و سیال پایه‌ی آب به عنوان سیال عامل استفاده شده است.

مطابق این جدول مقدار انحراف معیار برای تمامی زمان‌ها کمتر از یک می‌باشد که نشان‌دهنده دقت مناسب نتایج است.

$$U_Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial \dot{m}} U_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial \Delta T} U_{\Delta T}\right)^2} \quad (۳)$$

$$U_{\eta_{th}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial \dot{m}} U_{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial \Delta T} U_{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial A_C} U_{A_C}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial G_T} U_{I_b}\right)^2} \quad (۴)$$

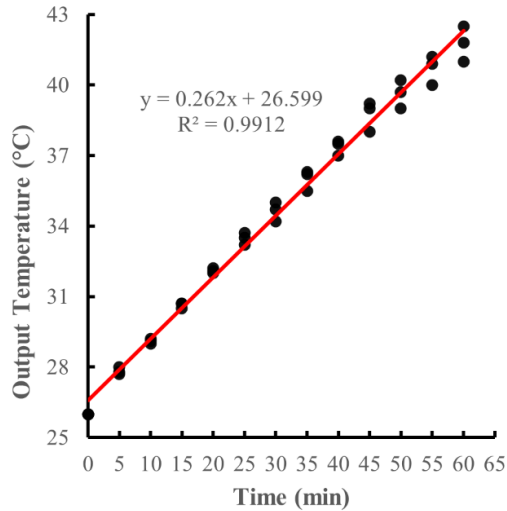
جدول ۳. مقادیر دمای برازش شده سیال با انحراف معیار و واریانس آزمایش.

زمان (دقیقه)	دمای خروجی (درجه سانتیگراد)	انحراف معیار	واریانس
۵	۲۷/۹	۰/۱۵	۰/۰۲
۱۰	۲۹/۲	۰/۱	۰/۰۱
۱۵	۳۰/۵	۰/۱۲	۰/۰۱
۲۰	۳۱/۸	۰/۱	۰/۰۱
۲۵	۳۳/۲	۰/۲۵	۰/۰۶
۳۰	۳۴/۵	۰/۴	۰/۱۶
۳۵	۳۵/۸	۰/۴۴	۰/۱۹
۴۰	۳۷/۱	۰/۳۲	۰/۱
۴۵	۳۸/۴	۰/۶۴	۰/۴۱
۵۰	۳۹/۷	۰/۶	۰/۳۶
۵۵	۴۱	۰/۶۲	۰/۳۹
۶۰	۴۲/۳	۰/۷۵	۰/۵۶

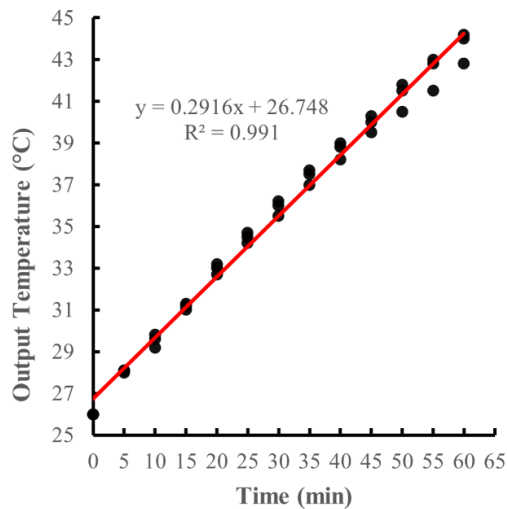
تحلیل نتایج

تأثیر استفاده از حفره‌ی جاذب و لوله‌ی جاذب چندگانه

در شکل ۷، مقادیر دمای خروجی متمرکزکننده در مدت زمان تست ۶۰ دقیقه در دو حالت عادی و با استفاده از حفره‌های جاذب قابل مشاهده است. در هر دو حالت از لوله‌ی جاذب منفرد استفاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دمای نهایی در حالتی که حفره‌ی جاذب استفاده شود ۴/۵۵ درصد نسبت به حالت عادی افزایش پیدا می‌کند. هر کدام از آزمایشات سه مرتبه تکرار شده است که در شکل ۷ مشخص است و برازش خطی بر روی داده‌ها انجام شده است که نشان‌دهنده دقت مناسب نتایج می‌باشد. لازم به ذکر است سیستم آزمایشگاهی مورد استفاده از نوع گردش بسته (recirculating loop) است، به طوریکه سیال از مخزن پمپ می‌شود، از لوله‌ی جاذب عبور کرده و مجدداً به مخزن بازمی‌گردد. بنابراین افزایش دما پس از بارها چرخش سیال پس از ۶۰ دقیقه عملکرد مداوم به ۴۱/۸ درجه سانتیگراد می‌رسد. در طول این مدت سیال بارها در مدار سیرکوله می‌شود و با دریافت تدریجی انرژی تابشی، دمای آن به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. عایق کاری مناسب اجزای سیستم و تلفات حرارتی ناچیز نیز در این افزایش تدریجی دما نقش موثری دارند.



(الف)

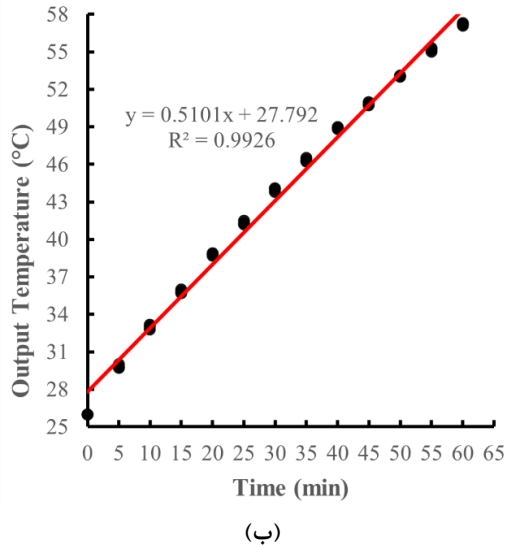
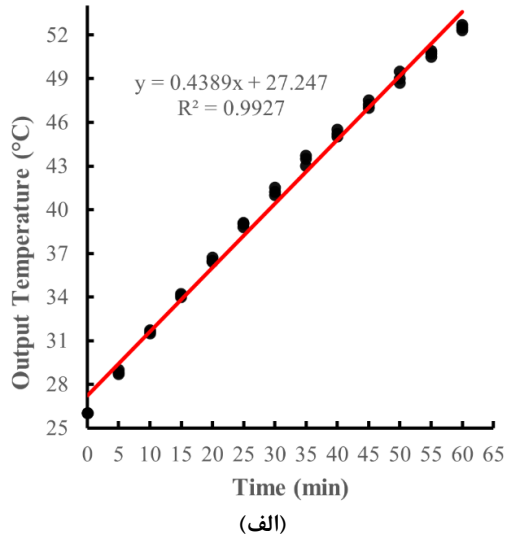


(ب)

شکل ۷. دمای خروجی متمرکزکننده در حالت الف) بدون حفره‌ی جاذب ب) همراه با حفره‌ی جاذب.

در شکل ۸، تأثیر استفاده از لوله‌ی جاذب سه‌گانه بر افزایش دمای خروجی نشان داده شده است. شکل ۸-الف مربوط به حالتی است که لوله‌ی جاذب سه‌گانه بدون حفره جاذب مورد استفاده قرار گرفته است در حالیکه شکل ۸-ب مربوط به حالتی است که این لوله همراه با حفره‌های جاذب به کار گرفته شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دمای خروجی در حالت اول پس از ۶۰ دقیقه برابر با ۵۲/۷ درجه سانتیگراد و در حالت دوم برابر با ۵۷/۲ درجه سانتیگراد حاصل می‌گردد. در این حالت‌ها، لوله‌های جاذب هم از سمت منبع تابش مستقیم و هم

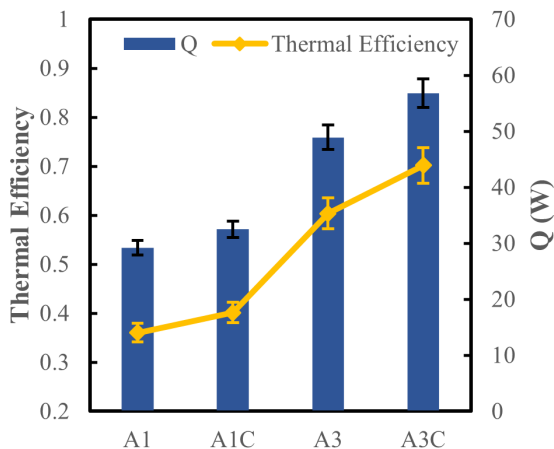
از سمت بازتابنده انرژی حرارتی قابل توجهی دریافت می کنند. هنگامی که لوله‌ی جاذب سه گانه به همراه دو حفره جاذب مورد استفاده قرار می گیرند، بخش بیشتری از پرتوهای بازتابیده در داخل حفره‌ها به دام افتاده و به جذب مؤثرتر حرارت منجر می شود. به همین دلیل، در هر گردش سیال، دمای خروجی اندکی افزایش یافته و در مجموع پس از ۶۰ دقیقه عملکرد، دمای نهایی بالاتری نسبت به حالت عادی (بدون لوله جاذب سه گانه و حفره‌های جاذب) حاصل می گردد. میانگین اختلاف دمای ورودی و خروجی در هر بار عبور سیال برای این حالت برابر با ۰/۲۰۴ درجه سانتیگراد می باشد که از آن برای محاسبه حرارت مفید استفاده می شود.



شکل ۸. دمای خروجی متمرکزکننده در حالت همراه با (الف) لوله‌ی جاذب منفرد (ب) لوله‌ی جاذب سه گانه.

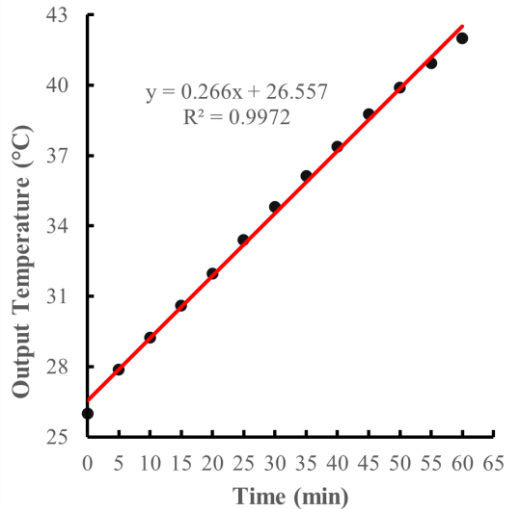
در شکل ۹، مقادیر حرارت مفید و بازده حرارتی در هر کدام از ۴ حالت بررسی شده با یکدیگر مقایسه می‌شود. نمادهای A1، A1C، A3 و A3C به ترتیب نشان‌دهنده لوله‌ی جاذب منفرد، لوله‌ی جاذب منفرد با حفره‌ی جاذب، لوله‌ی جاذب سه‌گانه و لوله‌ی جاذب سه‌گانه با حفره‌ی جاذب می‌باشند. مطابق رابطه ۱، همانطور که مشاهده می‌شود، با استفاده از لوله‌ی جاذب سه‌گانه حرارت مفید و بازده حرارتی نسبت به حالت با لوله‌ی جاذب منفرد به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است. بازده متمرکزکننده در حالت پایه (بدون حفره‌ی جاذب و لوله‌ی جاذب سه‌گانه) برابر با ۳۶/۰۲ درصد بوده است که با کمک جاذب‌های اضافه شده به ۷۰/۱۴ درصد رسیده است. حرارت مفید نیز با اصلاحات انجام شده از ۲۹/۱۸ وات به ۵۶/۸۱ وات رسیده است. استفاده از حفره‌های جاذب با طراحی فعلی باعث شده است تا سطح در معرض تابش خورشیدی افزایش پیدا کند و انرژی خورشیدی به طور موثرتری جذب شود. در متمرکزکننده‌های رایج، بخشی از پرتوهای خورشیدی ممکن است بازتابیده شود و هدر برود، اما با استفاده از این حفره‌ها، این پرتوها پس از برخورد با بازتابنده‌ی متمرکزکننده، به داخل حفره‌ها هدایت شده و سپس مجدداً به لوله‌ی جاذب برخورد می‌کنند. بدین ترتیب عملکرد اپتیکی سیستم با به دام انداختن پرتوهای بازتابیده شده، بهبود می‌یابد. استفاده از حفره‌های جاذب باعث توزیع یکنواخت‌تر دما در لوله‌ی جاذب می‌شود که باعث جلوگیری از ایجاد نقاط داغ (Hot Spots) و بهبود عملکرد انتقال حرارت سیستم می‌شود. هنگامی که به جای یک لوله، از سه لوله‌ی جاذب در سیستم استفاده می‌شود، سطح بیشتری در معرض تابش خورشیدی قرار می‌گیرد و دمای سیال افزایش پیدا می‌کند. هر چند عمده‌ی پرتوهای بازتابیده از بازتابنده، جذب لوله‌ی مرکزی می‌شوند اما لوله‌های مجاور نیز تا حدودی پرتوهای بازتابیده را جذب می‌کنند. ضمن اینکه قسمت بالایی هر سه لوله به صورت مستقیم تحت تابش قرار دارد. در لوله‌ی جاذب منفرد، انتقال حرارت از سطح خارجی به مرکز سیال ممکن است با شیب دمایی بالا همراه باشد که منجر به تلفات گرمایی بیشتر به محیط می‌شود. در سیستم سه‌لوله‌ای، گرما به طور یکنواخت‌تر بین سه لوله توزیع شده که این باعث کاهش اختلاف دما بین دیواره‌ی لوله و سیال می‌شود. در حالتی که همزمان از حفره‌های جاذب و لوله‌ی جاذب سه‌گانه استفاده می‌شود، تلفات حرارتی به کمترین میزان خود می‌رسد و بیشترین بهره‌برداری از پرتوهای خورشیدی انجام می‌شود.

از نظر هندسی، بررسی تعداد بیشتر لوله‌ها (مثلاً دو یا چهار لوله) در متمرکزکننده سهموی مورد استفاده در این پژوهش امکان‌پذیر نبوده است. در آرایش‌های زوج، هیچ لوله‌ای در موقعیت کانونی قرار نمی‌گیرد و در صورت ایجاد جابجایی برای قرارگیری یک لوله در مرکز، ساختار به‌طور نامتقارن تغییر می‌کند که منجر به کاهش کارایی اپتیکی می‌گردد. از سوی دیگر، افزایش تعداد لوله‌ها به بیش از سه عدد موجب ایجاد سایه بر سطح بازتابنده و افزایش تلفات نوری (Optical Losses) می‌شود. در متمرکزکننده‌های آزمایشگاهی کوچک با دهانه‌ی محدود، این محدودیت‌ها باعث می‌شود تنها حالت‌های تک‌لوله و سه‌لوله قابل ارزیابی باشند. در مقیاس‌های بزرگ‌تر و در صورت افزایش نسبت تمرکز و عرض دهانه، امکان مطالعه‌ی لوله‌های متعددتر وجود دارد؛ با این حال، طراحی و هم‌ترازی دقیق آن‌ها نیازمند صرف هزینه و زمان قابل توجهی است. بر این اساس، انتخاب دو آرایش تک‌لوله و سه‌لوله در این پژوهش بر مبنای ملاحظات فیزیکی و عملی بوده و می‌تواند نمایانگر رفتار کلی سیستم در شرایط هندسی مشابه باشد.

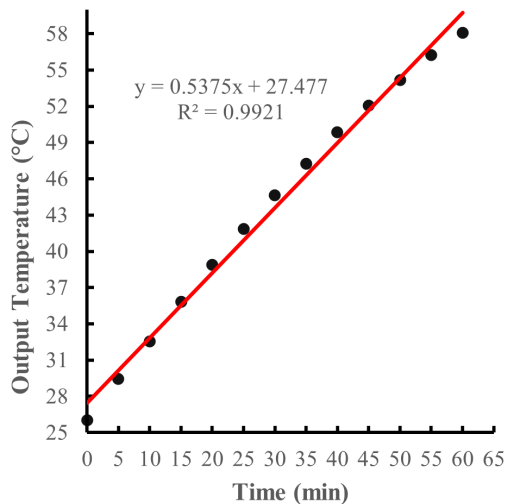


شکل ۹. میزان حرارت مفید و بازده حرارتی برای حالت‌های مختلف با بکارگیری آب به عنوان سیال عامل تأثیر استفاده از نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید.

در شکل ۱۰، میزان افزایش دمای متمرکزکننده با استفاده از نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید-آب در بیشترین غلظت (۱ درصد حجمی) نشان داده شده است. شکل ۱۰-الف مربوط به حالتی است که از نانوسیال تنها در یک لوله‌ی جاذب استفاده شود و حفره‌ی جاذب نیز مورد استفاده قرار نگیرد و شکل ۱۰-ب مربوط به حالتی است که همزمان از دو حفره‌ی جاذب، سه لوله‌ی جاذب و نانوسیال استفاده شود. در حالت اول دمای نهایی بعد از ۶۰ دقیقه به ۴۲ درجه سانتیگراد رسیده است که تقریباً با حالتی که نانوسیال استفاده نشود برابر است بنابراین می‌توان گفت استفاده از نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید-آب در حالت تک‌لوله و بدون حفره جاذب تأثیر مثبتی بر روی عملکرد سیستم ندارد. در حالتی که از این نانوسیال همراه با لوله‌ی جاذب سه‌گانه و حفره‌های جاذب استفاده می‌شود، دمای نهایی به ۵۸/۱ درجه می‌رسد.



(الف)

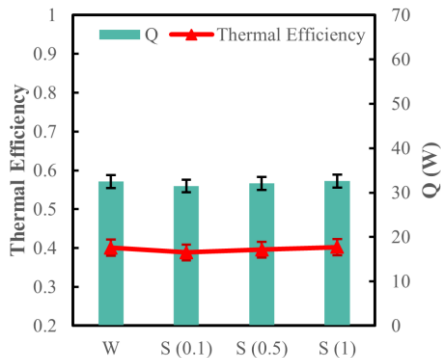


(ب)

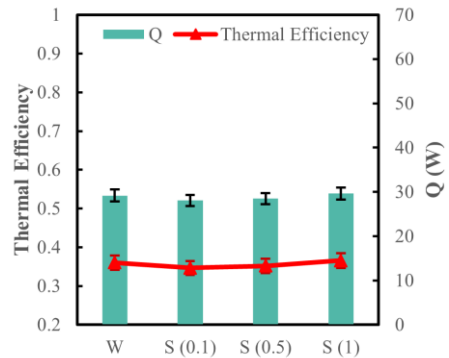
شکل ۱۰. دمای خروجی متمرکزکننده با بکارگیری نانوسیال به عنوان سیال عامل در حالت الف) همراه با لوله‌ی جاذب منفرد و بدون حفره‌ی جاذب ب) همراه با حفره‌های جاذب و لوله‌ی جاذب سه‌گانه.

حرارت مفید و بازده حرارتی برای تمام حالت‌هایی که از نانوسیال استفاده شده است، محاسبه گردیده و در شکل ۱۱ مقادیر آن قابل مشاهده است. در هر کدام از شکل‌های ۱۱-الف الی ۱۱-د، نماد W نشان‌دهنده‌ی حالتی است که تنها از آب استفاده شده است و ۳ غلظت نانوسیال نیز در هر شکل با نماد S (0.1)، S (0.5) و S (1) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، در حالت تک‌لوله بدون حفره‌ی جاذب تفاوت چندانی بین حرارت مفید بازده آب و غلظت‌های مختلف نانوسیال وجود ندارد که باعث شده مقادیر بازده حرارتی آن‌ها نزدیک

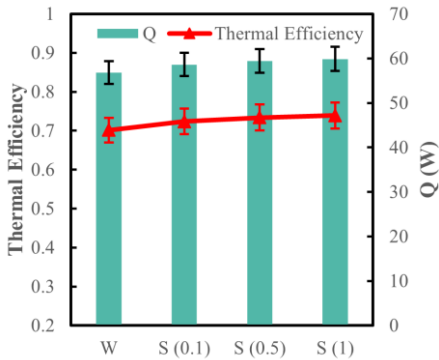
به یکدیگر باشد. به طوریکه بازده حرارتی آب برابر با $36/02$ و بازده حرارتی نانوسیال با غلظت ۱ درصد برابر با $36/57$ درصد می‌باشد. این مسئله در حالت تک‌لوله با حفره‌ی جاذب نیز وجود دارد و بازده حرارتی آب و نانوسیال با بیشترین غلظت به ترتیب برابر با $40/09$ و $40/26$ درصد حاصل شده است. در حالت با لوله‌ی جاذب سه‌گانه و بدون حفره‌ی جاذب نانوسیال تنها حدود ۱ درصد بازده حرارتی را افزایش می‌دهد. در حالتی که از نانوسیال در کنار لوله‌ی جاذب سه‌گانه و حفره‌ی جاذب استفاده شود بازده‌ی حرارتی به $73/91$ درصد می‌رسد در حالیکه بدون نانوسیال، این مقدار برابر با $70/14$ درصد بود. بیشترین حرارت مفید حاصل شده در سیستم نیز مربوط به همین حالت است که برابر با $59/86$ وات حاصل شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید تأثیری در افزایش بازده متمرکزکننده در حالت‌های با لوله‌ی جاذب منفرد نداشته است و تنها اندکی تأثیر مثبت در حالت‌های با لوله‌ی جاذب سه‌گانه داشته است. دلیل این مورد، این است که زمانی که از لوله‌ی جاذب سه‌گانه استفاده می‌شود، سیال عامل به دمای نهایی بالاتری در حدود $58/1$ درجه سانتیگراد می‌رسد و با افزایش دما، ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به مقدار بیشتری افزایش پیدا می‌کند. در واقع در دمای حدود 60 درجه سانتیگراد ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در مقایسه با دمای 40 درجه سانتیگراد، افزایش بیشتری نسبت به ضریب هدایت حرارتی آب پیدا می‌کند که همین مورد باعث می‌شود تا نانوسیال در دماهای بالاتر موثرتر باشند [۲۹]. انتخاب نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید-آب در این پژوهش بر اساس پایداری بالا، در دسترس بودن و هزینه‌ی پایین آن می‌باشد. هدف از به‌کارگیری این نانوسیال، بررسی اثر یک ترکیب ساده و اقتصادی در شرایط تجربی واقعی بوده است. با توجه به میزان بازدهی حاصل شده توسط این نانوسیال، بهتر است از گزینه‌هایی دیگر مانند نانولوله کربنی چند دیواره، مس اکسید یا آلومینیوم‌اکسید استفاده کرد زیرا این نانوذرات ضریب هدایت حرارتی بالاتری دارند. به عنوان راهکاری دیگر، می‌توان نانوذره سیلیکن دی‌اکسید را به صورت ترکیبی با نانوذره آهن اکسید استفاده نمود و نانوسیال هیبریدی حاصل شده را تحت میدان مغناطیسی قرار داد تا حرارت مفید افزایش پیدا کند [۳۴].



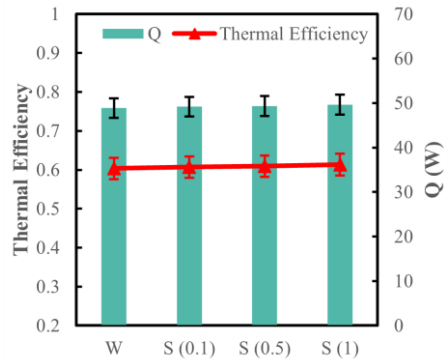
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱. میزان حرارت مفید و بازده حرارتی با بکارگیری نانوسیال به عنوان سیال عامل برای ۴ حالت: الف) با لوله‌ی جاذب منفرد و بدون حفره‌های جاذب ب) با لوله‌ی جاذب منفرد و حفره‌های جاذب ج) با لوله‌ی جاذب سه‌گانه بدون حفره‌های جاذب د) با لوله‌ی جاذب سه‌گانه و حفره‌های جاذب.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روشی نوین برای بهره‌برداری حداکثری از تابش خورشید در متمرکزکننده‌های خورشیدی سهموی به صورت تجربی ارائه داده شده است. در طرح توسعه داده شده برای پژوهش حاضر، از یک متمرکزکننده خورشیدی سهموی آزمایشگاهی مجهز به دو حفره‌ی جاذب و لوله‌ی جاذب سه‌گانه استفاده شد. از نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید-آب نیز به عنوان سیال عامل استفاده گردید. از شدت تابش و شرایط محیطی یکسان در تمام حالت‌های آزمایش استفاده شد و مقایسه‌ای دقیق بین حالت‌های ذکر شده با حالت‌های فاقد حفره‌ی جاذب، لوله‌ی جاذب سه‌گانه و نانوسیال صورت گرفت. در نهایت نتایج ذیل حاصل گردید:

- حداکثر دمای نهایی متمرکزکننده در حالت عادی و بدون هیچ کدام از موارد جاذب مطرح شده برابر با $41/8$ درجه سانتیگراد حاصل گردید. حرارت مفید در این حالت برابر با $29/18$ وات و بازده حرارتی برابر با $36/02$ درصد به دست آمد.

- اضافه شدن دو لوله‌ی جاذب دیگر باعث شد تا لوله‌ی جاذب سه‌گانه حاصل گردد که با استفاده از آن بازده حرارتی به $60/35$ درصد رسید. حرارت مفید نیز برابر با $48/88$ وات حاصل شد.

- با استفاده از حفره‌های جاذب و لوله‌ی جاذب منفرد، دمای نهایی برابر با $44/2$ درجه سانتیگراد، حرارت مفید برابر با $32/48$ وات و بازده حرارتی برابر با $40/09$ درصد حاصل شد. استفاده از لوله‌ی جاذب سه‌گانه در این حالت باعث شد دمای نهایی به $57/3$ درجه سانتیگراد، حرارت مفید به $56/82$ وات و بازده حرارتی به $70/14$ درصد برسد.

- نانوسیال سیلیکن دی‌اکسید در حالت‌های مختلف عملکرد پایدار اما با تأثیر محدود بر بهبود بازده حرارتی نشان داد و در شرایطی که از حفره‌های جاذب و لوله‌ی جاذب سه‌گانه به‌طور هم‌زمان استفاده شد، موجب افزایش بازدهی به میزان $3/76$ درصد گردید.

-نتایج این پژوهش برای ساخت متمرکزکننده‌های صنعتی در ابعاد بزرگ حائز اهمیت است و نشان می‌دهد با تغییرات مختلف تا چه میزان می‌توان عملکرد متمرکزکننده را بهبود بخشید. در همین راستا استفاده از لوله‌های جاذب سه‌گانه و حفره‌های جاذب به عنوان راه‌حل‌های قطعی افزایش بازده در متمرکزکننده‌ها پیشنهاد می‌گردند. با توجه به محدودیت‌های موجود در تجهیزات آزمایشگاهی و هندسه‌ی سیستم، برخی بررسی‌ها در این پژوهش انجام نشد که پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده مدنظر قرار گیرد:

-بررسی مستقل اثر تعداد لوله‌های جاذب (از یک تا چند لوله) در متمرکزکننده‌هایی با دهانه‌ی بزرگ‌تر یا ضریب تمرکز بالاتر، به‌منظور تعیین آرایش بهینه از نظر جذب و تلفات نوری.

-اندازه‌گیری مستقیم دمای سطح لوله‌های جاذب با استفاده از تصویربرداری حرارتی مادون قرمز برای تحلیل دقیق‌تر توزیع دما و تلفات حرارتی.

-مطالعه‌ی عملکرد سیستم در مقیاس‌های صنعتی و تحت شرایط تابشی و جوی متغیر، به‌منظور بررسی پایداری و کارایی بلندمدت طرح پیشنهادی.

-ارزیابی عددی و مدل‌سازی حرارتی-اپتیکی برای بهینه‌سازی هندسه‌ی حفره‌ها، زاویه‌ی تمرکز و فاصله‌ی بین لوله‌ها جهت بهبود بیشتر بازده حرارتی.

فهرست منابع

- [1] Mahian, O., Bellos, E., Markides, C. N., Taylor, R. A., Alagumalai, A., Yang, L., Qin, C., Lee, B. J., Ahmadi, G., Safaei, M. R., & Wongwises, S. (2021). Recent advances in using nanofluids in renewable energy systems and the environmental implications of their uptake. *Nano Energy* 86, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106069>
- [2] Kim, H., Chinnasamy, V., Ham, J., & Cho, H. (2025). Parabolic trough collectors: A comprehensive review of design innovations, optimization studies and applications. *Energy Conversion and Management*, 327, 119534. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.119534>
- [3] Khadhar Basha, S., & Behura, A. K. (2024). *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects Thermal performance of parabolic trough solar collector employing novel absorber tubes equipped with distinct heat transfer fluids: An experimental study*, 46 (1), 16675-16701. <https://doi.org/10.1080/15567036.2024.2430416>
- [4] AbdEl-Rady Abu-Zeid, M., Elhenawy, Y., Bassyouni, M., Majozzi, T., Toderas, M., Al-Qabandi, O. A., & Kishk, S. S. (2024). Performance enhancement of flat-plate and parabolic trough solar collector using nanofluid for water heating application. *Results in Engineering*, 21, 101673. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101673>
- [5] Hebbal, U., Soragaon, B., Rathnakar, G., Mohan Das, A. N., Thippeswamy, L. R., Nagabhushana, N., Durga Prasad, C., & Aden, A. A. (2025). Principal difficulties with parabolic trough collector systems and performance-boosting strategies: A comprehensive review. *International Journal of Thermofluids*, 25, 101009. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101009>

- [6] Kamali, K., Saleh, M., Jahromi, B., & Sefid, M. (2022). Energy and Exergy Analysis of a Direct Solar Steam Power Plant with Solar Parabolic Concentrator for Yazd City with Several Water Preheaters. *Karafan Quarterly Research Journal*, 19(1), 333–355. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.287183.1540> (In Persian)
- [7] Anand, S., & Kumar, S. (2024). Optimization of gaseous working fluid and internally finned absorber tube for enhancing the thermal performance of parabolic trough solar collector. *Applied Thermal Engineering*, 239, 122078. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.122078>
- [8] Babaeiespooei, R., & Naseri, R. (2022). Numerical Study of Nanofluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Linear Parabolic Trough Solar Collector. *Karafan Quarterly Research Journal*, 19(1), 311–332. (In Persian) <https://doi.org/10.48301/KSSA.2021.299497.1670>
- [9] Ahmadi, M. (2024). Investigation of the Effects of Hybrid Nanofluids Containing Graphene on the Hydrothermal Performance of a Solar Linear Parabolic Collector. *Karafan Quarterly Research Journal*, 21(1), 297–319. (In Persian) <https://doi.org/10.48301/KSSA.2024.423031.2750>
- [10] Bocanegra, J. A., Marchitto, A., & Misale, M. (2024). Nanofluids in solar collectors: a comprehensive review focused on its sedimentation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27, 1753-1784. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02964-2>
- [11] Talugeri, V., Pattana, N. B., Nasi, V. B., Shahapurkar, K., Soudagar, M. E. M., Ahamad, T., Kalam, M. A., Chidanandamurthy, K. M., Mubarak, N. M., & Karri, R. R. (2023). Experimental investigation on a solar parabolic collector using water-based multi-walled carbon-nanotube with low volume concentrations. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34529-6>
- [12] Mohanavel, V., Logesh, K., Venkatesh, R., Singh, P. K., Hossain, I., Soudagar, M. E. M., Obaid, S. Al, Alharbi, S. A., & Ramachandaramurthy, V. K. (2025). Ferric oxide nanofluid on functional properties of parabolic trough solar collector under different flow rate. *Applied Thermal Engineering*, 265, 125608. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125608>
- [13] Kumar, A. (2025). Comparative investigations on thermal performance assessment of a linear parabolic trough solar collector using various nanofluids and incident angles. *Energy*, 317, 134707. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134707>
- [14] Sreekumar, S., Shaji, J., Cherian, G., Thomas, S., Deb Mondol, J., & Shah, N. (2024). Corrosion analysis and performance investigation of hybrid MXene/C-dot Nanofluid-Based direct absorption solar collector. *Solar Energy*, 269, 112317. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112317>
- [15] Heyhat, M. M., Valizade, M., Abdolazhade, S., & Maerefat, M. (2020). Thermal efficiency enhancement of direct absorption parabolic trough solar collector (DAPTSC) by using nanofluid and metal foam. *Energy*, 192, 116662. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116662>

- [16] Edalatpour, A., Shahdad, I., Hosseinalipour, S. M., & Moghimi, M. (2024). Energy and Exergy Analysis of a Direct Absorption Parabolic Solar Collector Enhanced with Multi-Walled Carbon Nanotubes and Titanium Dioxide Nanoparticles. *Modares Mechanical Engineering*, 24(6), 385–397. (In Persian) <https://doi.org/10.48311/MME.24.6.385>
- [17] Hamada, M. A., Abdo, M. R., Khalil, H., Al-Sood, M. M. A., & Sharshir, S. W. (2025). Investigating the performance of solar parabolic concentrator using helical tubes, nanoparticles, and thermal storage materials. *Process Safety and Environmental Protection*, 195, 106777. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.106777>
- [18] Al-Shiblawi, A. I., & Heyhat, M. M. (2025). Modifying the Surface of Twisted Tapes With a Hydrophobic Coating to Enhance Their Performance in Parabolic Trough Solar Collector. *International Journal of Energy Research*, 2025(1), 695752. <https://doi.org/10.1155/er/7695752>
- [19] Hou, G., Yadav, A., Ali, E., Naeem, Y. A., Ahmed, F. F., Muzammil, K., Falih, K. T., Abdulridui, H. A., Kadhum, E. H., Omran, A. A., & Elawady, A. (2024). Thermal performance improvement for parabolic trough solar collectors integrated with twisted fin and nanofluid: Modeling and validation. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60, 104763. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104763>
- [20] Baiju, V., Shajan, S., Krishna, R. K., & Sha, A. A. (2024). Experimental investigations of secondary reflector enhanced medium temperature parabolic trough solar thermal collector. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 12823-12841. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13672-w>
- [21] Hu, T., Zhang, H., Kwan, T. H., Wang, Q., & Pei, G. (2024). Thermal performance analysis of eccentric double-selective-coated parabolic trough receivers with flat upper surface. *Renewable Energy*, 220, 119613. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119613>
- [22] Naveenkumar, R., Singh, P. K., Ravichandran, M., Mohanavel, V., Venkateshkumar, R., Kedia, A., Kannan, S., & Soudagar, M. E. M. (2025). Thermal performance analysis of a parabolic trough collector based solar water heater using revolving absorber tube. *Results in Engineering*, 25, 104270. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104270>
- [23] Norouzi, A. M., Siavashi, M., Ahmadi, R., & Tahmasbi, M. (2021). Experimental study of a parabolic trough solar collector with rotating absorber tube. *Renewable Energy*, 168, 734–749. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.088>
- [24] Sallaberry, F., Valenzuela, L., & Palacin, L. G. (2017). On-site parabolic-trough collector testing in solar thermal power plants: Experimental validation of a new approach developed for the IEC 62862-3-2 standard. *Solar Energy*, 155, 398–409. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.06.045>
- [25] Valizade, M., Heyhat, M. M., & Maerefat, M. (2020). Experimental study of the thermal behavior of direct absorption parabolic trough collector by applying copper

- metal foam as volumetric solar absorption. *Renewable Energy*, 145, 261–269. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.112>
- [26] Kasaeian, A., Daviran, S., Azarian, R. D., & Rashidi, A. (2015). Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*, 89, 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.056>
- [27] Boroujeni, B. A., & Farsani, A. K. (2024). Numerical Simulation of Laminar Nanofluids Flow in a Curved Duct with a Square Cross-section. *Karafan Quarterly Research Journal*, 21(1), 411–433. <https://doi.org/10.48301/KSSA.2024.427698.2775>
- [28] Żyła, G., & Fal, J. (2017). Viscosity, thermal and electrical conductivity of silicon dioxide–ethylene glycol transparent nanofluids: An experimental studies. *Thermochimica Acta*, 650, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.02.001>
- [29] Rajendra Prasad, T., Rama Krishna, K., Sharma, K. V., & Naga Bhaskar, C. (2022). Thermal performance of stable SiO₂ nanofluids and regression correlations to estimate their thermophysical properties. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(6), 100461. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100461>
- [30] ISO. (2018). *Guide to Standard ISO 9806:2017* (2nd Ed). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27725.08168>
- [31] Ram, S., Ganesan, H., Saini, V., & Kumar, A. (2023). Performance assessment of a parabolic trough solar collector using nanofluid and water based on direct absorption. *Renewable Energy*, 214, 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.06.016>
- [32] Moffat, R. J. (1985). Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment. *Journal of Fluids Engineering*, 107(2), 173–178. <https://doi.org/10.1115/1.3242452>
- [33] Edalatpour, A., Hosseinalipour, S. M., & Moghimi, M. (2025). An experimental analysis of the performance of direct absorption parabolic trough collectors with laser-processed copper surfaces. *Scientific Reports*, 15(1), 8921. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92689-z>
- [34] Mousavi, S. V. (2024). Numerical Study of Flow and Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Tee Channel in the Presence of Variable Magnetic Field. *Quarterly Scientific Journal of Technical and Vocational University Spring 2024*, 21(1), 453–481. <https://doi.org/10.48301/KSSA.2024.413755.2683>