نشریه مباحث برگزیده در انرژی، دوره ۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۲، صفحات ۲۵ تا ۳۸

مقاله مروری

کلکتورهای خورشیدی سهموی خطی: مرور سیستماتیک فناوری و بهینه‌سازی

هاجر مقدس*

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

* نویسنده مسئول: h.moghadas@yu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶

چکیده

کلکتورهای سهموی خورشیدی دستگاه‌هایی موفق در تبدل انرژی خورشید به انرژی حرارتی هستند. آنها در مقیاس‌های متنوع کوچک خانگی و بزرگ صنعتی ساخته شده‌اند. بازده و عملکرد این سیستم‌ها به بخش سهموی متمرکز کننده نور، لوله جاذب حرارت، سیستم ردیاب و شرایط محیطی بستگی دارد. مطالعات متعددی در زمینه تأثیر پارامترهای هندسی، پوشش سطوح، خواص نوری و حرارتی اجزای مختلف سیستم و همچنین نوع سیال انتقال دهنده حرارت انجام شده است. بهینه‌سازی هر کدام از این پارامترها منجر به افزایش عملکرد و کاهش چشم‌گیر هزینه ساخت نسبت به خروجی حرارتی مفید می‌شود. استفاده از نمک‌های جاذب، شرایط ذخیره انرژی در ساعات بدون تابش و در نتیجه سیکل دائم تولید برق را فراهم کرده است. مقاومت جنس مواد سازنده اجزای مختلف این سیستم در برآورد هزینه اقتصادی به‌کارگیری این دستگاه‌ها در شرایط کاربردی موثر است. این سیستم با قابلیت فوق‌العاده در تولید انرژی پاک در ابعاد مختلف می‌تواند رقیب و جایگزین مناسبی در دراز مدت برای سوخت‌های فسیلی خصوصاً در مناطق با تابش مناسب مانند ایران باشند.

کلید واژگان: کلکتور سهموی، انرژی خورشیدی، بازده حرارتی، انرژی تجدیدپذیر، تولید توان.

Parabolic trough solar collectors: A systematic review of technology and optimization

Hajar Moghadas*

Department of Mechanical Engineering, School of Engineering, Yasouj University, Yasuj, Iran

*Corresponding author: h.moghadas@yu.ac.ir

Received: 28-06-2025 Accepted: 28-07-2025

Abstract

Solar energy conversion systems have been developed to convert solar energy into thermal energy, functioning at both small domestic and large industrial scales. The efficiency and performance of these systems depend on several factors, including the design of the parabolic light concentrator, the heat-absorbing tube, the detector system, and the surrounding environmental conditions. Numerous studies have explored how geometric parameters, surface coatings, and the optical and thermal properties of various components impact system performance, as well as the type of heat transfer fluid used. Optimizing these parameters can improve performance and significantly lower construction costs in relation to the useful thermal output. The incorporation of heat-absorbing salts allows for energy storage during periods without sunlight, enabling a continuous cycle of electricity production. The durability of the materials used in the system's components is crucial for assessing the economic feasibility of these devices in practical applications. Given its impressive capability to produce clean energy across different scales, this system presents a viable long-term alternative to fossil fuels, particularly in regions with high solar radiation, such as Iran.

Keywords: Parabolic collector, Solar energy, Thermal efficiency, Renewable energy, Power generation.

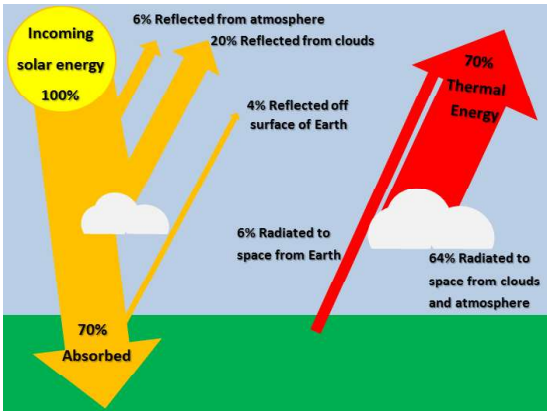
[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

۱- مقدمه

انرژی خورشیدی به‌عنوان یکی از پاک‌ترین و فراوان‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر، نقش کلیدی در جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی و تأمین انرژی مورد نیاز بشر دارد [۱]. در حداقل فعالیت خورشیدی، کل انرژی تابشی خورشید که به جو زمین وارد می‌شود برابر ۱۳۶۲ وات بر متر مربع است. ٪۷۰/۲ این حجم عظیم انرژی توسط زمین جذب و ٪۲۹/۸ بقیه توسط زمین و جو آن بازتاب می‌شود [۲]. با توجه به بحران جهانی انرژی، استفاده از این منبع بزرگ انرژی رایگان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در شکل ۱ مقدار جذب و بازتابش انرژی خورشید که وارد جو زمین شده است، نشان داده شده است. در این تصویر انرژی بازتاب شده توسط اتمسفر، ابرها و سطح زمین با رنگ زرد، انرژی جذب شده توسط اتمسفر، ابرها و زمین با رنگ نارنجی و مجموع انرژی‌های بازتاب شده با رنگ قرمز مشخص شده است [۳]. کشورهایی با تابش خورشیدی بالا (مانند ایران) می‌توانند با توسعه فناوری‌های خورشیدی، وابستگی به مصرف سوخت‌های فسیلی را کاهش دهند. سیستم‌های خورشیدی غیرمتمرکز هستند و امکان تولید انرژی در مناطق دورافتاده را فراهم می‌کنند. تولید انرژی در محل مصرف از تلفات انتقال در خطوط فشارقوی می‌کاهد. تاکنون دستگاه‌های حرارتی متنوعی مبتنی بر انرژی خورشیدی ساخته شده‌اند که شناخته شده‌ترین آنها شامل کلکتورهای تخت[1] [۴-۶]، کلکتورهای سهموی خطی[2] (PTC) [۷-۹]، سیستم دیش استرلینگ[3] [۱۰ و ۱۱]، برج انرژی خورشیدی[4] [۱۲ و ۱۳]، گرم‌کننده هوای خورشیدی[5] [۱۴-۱۶] و استخرهای خورشیدی[6] [۱۷-۱۹] می‌باشند. کارایی، کاربرد و محدوده دمایی این سیستم‌ها متفاوت است. در این مقاله به بررسی کلکتورهای سهموی خطی خورشیدی پرداخته می‌شود. این سیستم از یک آینه نیم‌استوانه با سطح مقطع سهموی برای متمرکز کردن و بازتاب پرتوهای خورشیدی به خط کانونی خود که در آنجا لوله جاذب حاوی سیال انتقال حرارت قرار دارد، استفاده می‌کند.

کلکتورهای سهموی خورشیدی با محدوده دمایی متوسط ۱۵۰-۸۰۰°C در مقایسه با کلکتورهای تخت (با محدوده دمایی ۲۰۰°C) دمای بالاتری را ایجاد می‌کنند. آنها با استفاده از نمک مذاب قابلیت ذخیره انرژی را دارند در حالی‌که سیستم کلکتور تخت قابلیت ذخیره انرژی را ندارد [۲۰]. برج خورشیدی و دیش استرلینگ در مقایسه با PTC دمای بالاتری تولید می‌کنند، اما هزینه و پیچیدگی بیشتری دارند. از طرفی دیش استرلینگ برای تولید توان کیلوواتی کاربرد دارد. این درحالی است که کلکتورهای سهموی را می‌توان به‌راحتی در آرایه‌های خطی گسترش داد و برای تولید توان مگاواتی بکار برد. به ازای تولید توان یکسان، برج‌های خورشیدی نسبت به PTCها به فضای بسیار وسیع‌تری نیاز دارند. PTCها قدیمی‌ترین و پرکاربردترین فناوری در نیروگاه‌های خورشیدی هستند که با بیش از ۳۰ سال سابقه عملیاتی هم اکنون بصورت تجاری تولید می‌شوند [۲۱]. این درحالی است که برج‌های خورشیدی و دیش استرلینگ هنوز در مراحل توسعه تجاری هستند.

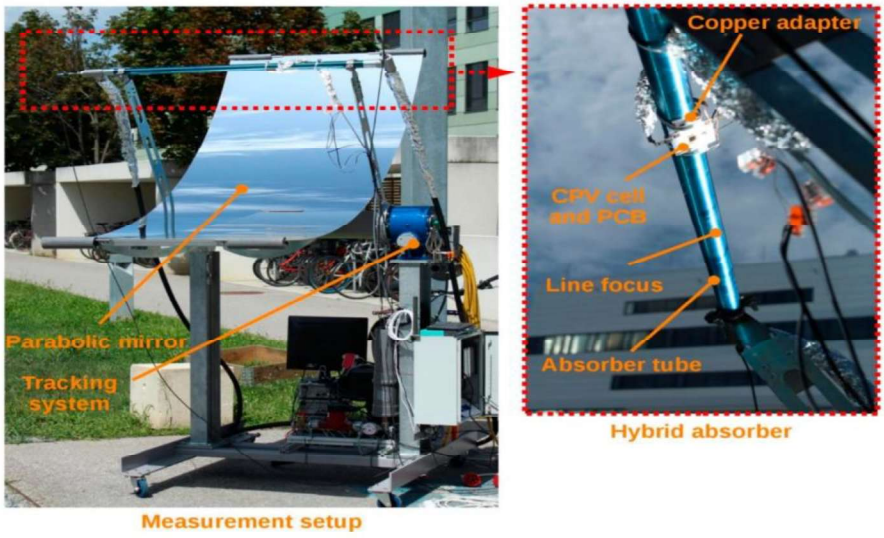


شکل ۱- درصد تابش ورودی از خورشید که توسط سطح زمین، جو و ابرها منعکس و جذب می‌شود، تصویر با مجوز بازنشر از مرجع [۳].

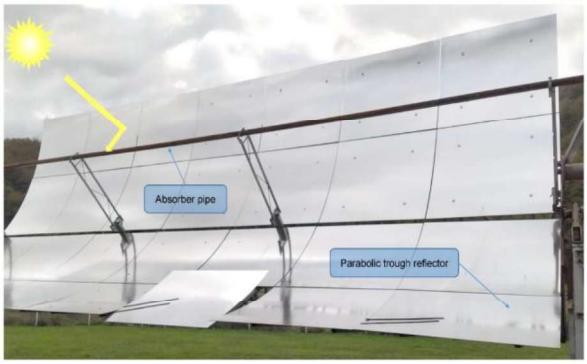
PTCها برای مصارف خانگی، گرمایش صنعتی، تأمین بخار یا گرمای فرآیندی در صنایع غذایی، شیمیایی، نساجی، شیرین‌سازی آب شور و در نیروگاه‌های خورشیدی برای تولید برق نیروگاهی استفاده می‌شوند [۷]. نمونه آزمایشگاهی یک سیستم PTC کوچک [۲۲]، واحدهای PTC یک نیروگاه خورشیدی در اتریش که بصورت سری در امتداد هم قرار گرفته‌اند [۲۲]، نمونه‌ای از کلکتور سهموی چندتکه [۲۳] و شماتیک نیروگاه خورشیدی شامل مجموعه واحدهای PTC، واحد ذخیره انرژی حرارتی و واحد تولید برق [۲۴] در شکل ۲ نشان داده شده‌است.

[1] Flat Plate Collectors
[2] Parabolic Trough Collectors
[3] Dish Stirling Systems
[4] Solar Power Tower
[5] Solar Air Heaters
[6] Solar Ponds

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]



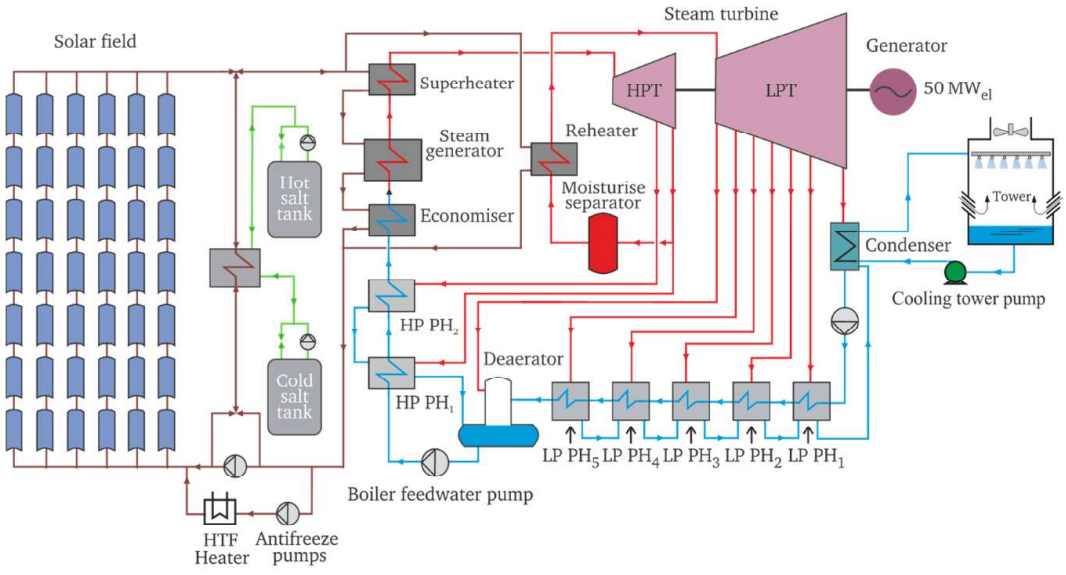
الف)



ج)



ب)



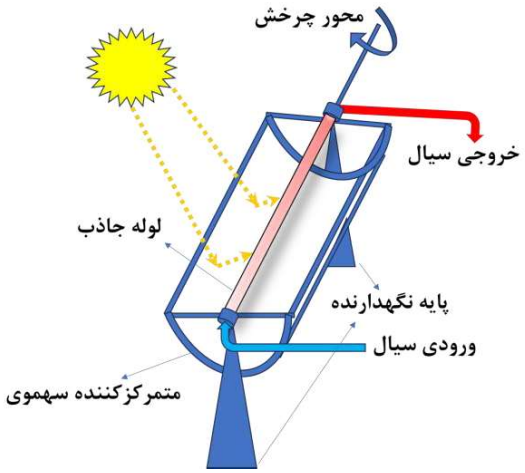
د)

شکل ۲- الف) نمونه‌ای از سیستم PTC کوچک [۲۲] ب) واحدهای PTC سری در یک نیروگاه خورشیدی در اتریش [۲۲] ج) نمونه‌ای از کلکتور سهموی چندتکه [۲۳] د) شماتیک نیروگاه خورشیدی شامل مجموعه واحدهای PTC، واحد ذخیره انرژی حراراتی و واحد تولید برق [۲۴].

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

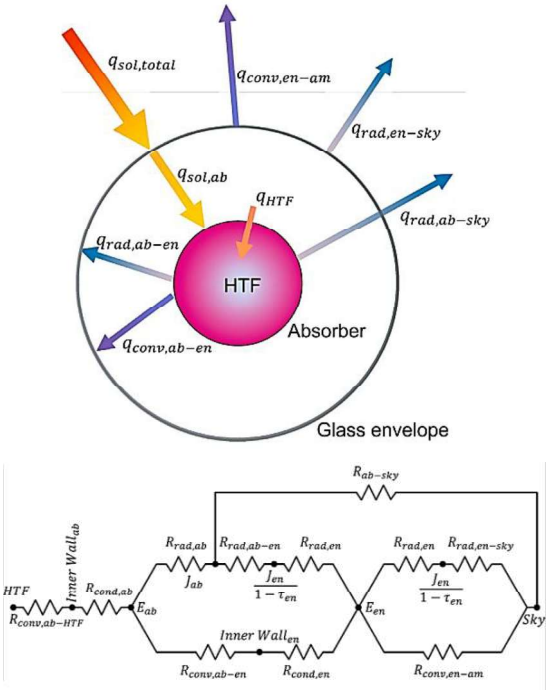
[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

در شکل ۳ اجزای کلی یک واحد PTC شامل آینه سهموی، لوله جاذب[1]، پایه نگهدارنده، سیستم جریان سیال و سیستم ردیابی خورشید[2] نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود آینه کلکتور به شکل سهمی طراحی شده است تا نور خورشید را روی خط کانونی متمرکز کند. در خط کانونی آینه، لوله جاذب قرار دارد. لوله جاذب از دو مجرای هم‌محور تشکیل شده است که مجرای مرکزی برای عبور سیال و جذب حرارت خورشید و پوسته بیرونی برای جلوگیری از اتلاف حرارتی است. سیستم ردیاب خورشیدی به‌صورت تک‌محوره یا دو محوره برای افزیش جذب، جهت تابش خورشید را دنبال می‌کند. در نمونه‌های صنعتی پایه‌های نگهدارنده معمولاً از جنس فولاد انتخاب می‌شوند.



شکل ۳- سیستم PTC متشکل از آینه سهموی، لوله جاذب، پایه نگهدارنده، سیستم جریان سیال و سیستم ردیابی خورشید.

در شکل ۴ مکانیزم‌های انتقال حرارت شامل تابش، جابجایی و رسانش از طریق تابش خورشید به پوسته جاذب، جذب و باز تابش پوسته و لوله جاذب، انتقال حرارت جابجایی پوسته بیرونی با اتمسفر، انتقال حرارت جابجایی فضای داخلی پوسته و لوله جاذب مرکزی، رسانش در دیواره پوسته و لوله جاذب و جذب انرژی توسط لوله جاذب در یک سیستم ساده PTC نشان داده شده است. انرژی خورشید با تابش به پوسته لوله جاذب وارد می‌شود. قسمتی از آن جذب مجرای داخلی و سیال جاذب حرارت می‌شود. قسمتی از آن بواسطه انتقال حرارت جابجایی و تابش از پوسته خارج می‌شود. شناسایی و برآورد دقیق مکانیزم‌های انتقال حرارت به طراحی بهینه سیستم در جهت افزایش بازده و کاهش تلفات حرارتی با شناسایی و کنترل عوامل اتلاف (مانند تلفات تشعشعی یا مقاومت حرارتی مواد) کمک می‌کند [۲۵]. در منابع موجود کاهش اتلاف حرارت از طریق بهبود پیکربندی‌های هندسی و ساختاری [۲۶ و ۲۷]، به‌کارگیری پوشش‌های مختلف [۲۸ و ۲۹] و استفاده از انواع مختلف سیال [۳۰] بررسی شده‌است.

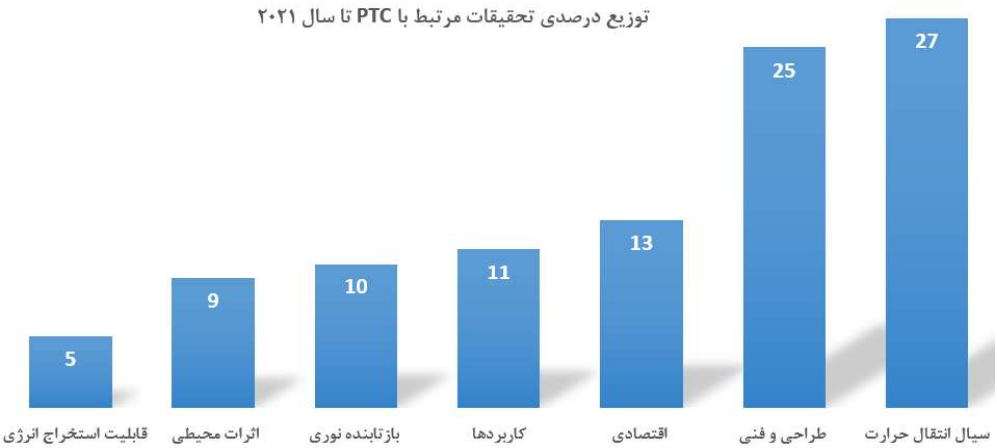


شکل ۴- مکانیزم‌های انتقال حرارت در سیستم PTC. تابش خورشید به پوسته جاذب، جذب و باز تابش پوسته و لوله جاذب، انتقال حرارت جابجایی پوسته بیرونی با اتمسفر، انتقال حرارت جابجایی فضای داخلی پوسته و لوله جاذب مرکزی، رسانش در دیواره پوسته و لوله جاذب و جذب انرژی توسط لوله جاذب [۲۵].

در نمودار شکل ۵ تقسیم‌بندی پژوهش‌های انجام شده پیشین در زمینه PTC در حوزه‌های مختلف طراحی و فنی، اقتصادی، کاربردها، قابلیت استخراج انرژی، سیال انتقال حرارت، بازتابنده نوری و اثرات محیطی براساس توزیع درصدی تا سال ۲۰۲۱ نشان داده شده است. این داده‌ها نشان می‌دهد که بیشترین تحقیقات انجام شده در حوزه سیال عامل انتقال حرارت و جنبه‌های فنی و طراحی بوده‌است [۳۱]. مرور جامعی از ساختار و مواد سازنده تجهیزات PTC در مقیاس بزرگ [۳۲]، معرفی کاربردهای صنعتی و تجاری آنها [۳۳] و تحلیل اکسرژی برای کاهش برگشت‌ناپذیری و افزایش راندمان [۳۴] در تحقیقات پیشین بررسی شده‌اند.

[1] Receiver Tube
[2] Tracking System

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]



شکل ۵- توزیع درصدی تحقیقات انجام‌شده مرتبط با PTC تا سال ۲۰۲۱ شامل طراحی و فنی، اقتصادی، کاربردها، قابلیت استخراج انرژی، سیال انتقال حرارت، بازتابنده نوری و اثرات محیطی.

۲- معادلات حاکم

با توجه به تنوع سیستم‌های PTC تاکنون فرمول‌ها و معیارهای متعددی برای ارزیابی عملکرد و راندمان حرارتی انواع PTCها ارائه شده‌است [۳۵]. در این بخش، برخی از فرمول‌های پرکاربرد، آورده شده است. مرور جامعی از فرمول‌ها و تقریب‌های بکار رفته برای محاسبه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در منبع [۳۶] و معادلات مبسوط انتقال حرارت و مدل‌های گوناگون در منبع [۳۷] گردآوری شده‌است.

در شرایط پایدار، راندمان حرارتی کلکتور[1] با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A_{ap} I_D} \quad (۱)$$

که در اینجا A_{ap} مساحت باز شده بازتابنده[2] (m^2)، I_D تابش مستقیم عمودی (W/m^2) و Q_u انرژی مفید منتقل شده به سیال انتقال حرارت (W) است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_u = \dot{m} C_{p,f} \left(T_{out} - T_{in}\right) \quad (۲)$$

که $\dot{m}$ دبی جرمی (kg/s)، $C_{p,f}$ ضریب انتقال حرارت سیال و T متوسط دمای داخلی و خارجی است. پارامتر مهم دیگری که برای تعیین اثربخشی روش انتقال حرارت در PTC بکار می‌رود، عملکرد حرارتی[3] (η) است. این پارامتر، اثر جریان را ارزیابی می‌کند و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{\left(Nu/Nu_p\right)}{\left(f/f_p\right)^{1/3}} \quad (۳)$$

در اینجا Nu عدد ناسلت و f ضریب اصطکاک جریان است. عملکرد حرارتی، بهبود عدد ناسلت نسبت به تغییر ضریب اصطکاک در اثر تغییر یک پارامتر خاص یا PTCهای مختلف را نشان می‌دهد. بازده اکسرژی، η_{exr} که بیانگر هدررفت فشار و ورودی حرارتی مفید در PTC است بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\eta_{exr} = \frac{Ex_u}{Ex_a} \quad (۴)$$

در اینجا Ex_u و Ex_a به ترتیب نرخ اکسرژی لوله جاذب و اکسرژی تابش خورشیدی جذب شده توسط لوله گیرنده و بازتابنده هستندکه بصورت زیرتعریف می‌شوند:

$$Ex_u = \dot{m} C_{p,f} \left[\left(T_{out} - T_{in}\right) - T_{amb} \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right)\right] \quad (۵)$$

$$Ex_a = A_{ap} I_D \left[1 - \frac{4}{3}\left(\frac{T_{amb}}{T_s}\right) + \frac{1}{3}\left(\frac{T_{amb}}{T_s}\right)^4\right] \quad (۶)$$

در اینجا T_{amb} دمای محیط و T_s=5762 K دمای ظاهری خورشید است.

۳- عملکرد سیستم PTC

تاکنون مطالعات نظری و تجربی بسیاری برای بهبود عملکرد حرارتی PTCها، بر اساس عملکرد انرژی و اکسرژی انجام شده‌است [۳۱ و ۳۸]. بازده و عملکرد سیستم‌های کلکتور خورشیدی به ترکیبی از پارامترهای مختلف مانند پوشش

[1] Thermal efficiency of collector
[2] Aperture area of the PTC
[3] Thermal performance

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

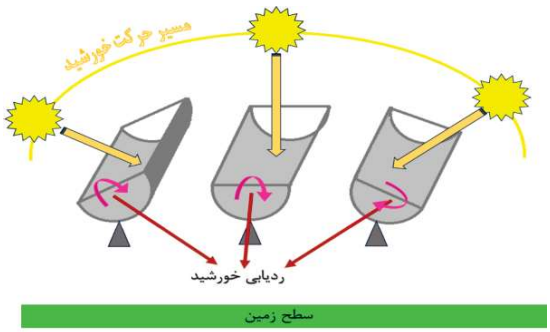
سطوح شامل ضریب جذب سطح گیرنده[1]، ضریب تابش سطح گیرنده[2]، جهت تابش و سیستم ردیاب، نسبت تمرکز[3]، زاویه و کیفیت آینه‌ها[4] [۳۹]، دمای محیط، سرعت باد، دمای کارکرد، نوع و دبی جرمی سیال انتقال حرارت و عایق‌بندی و هندسه لوله جاذب [۴۰] بستگی دارد. در ادامه به مواردی که بیشتر مورد توجه پژوهشگران بوده‌است، پرداخته می‌شود.

۳-۱- پوشش سطوح

مطالعات نشان می‌دهد که افزایش بازتابندگی و کاهش گسیلندگی پوشش خارجی و لوله جاذب می‌تواند عملکرد و راندمان کل را به ترتیب ٪۲۵/۸ و ٪۲۶/۵ افزایش دهد [۴۱]. تابش حرارتی، مکانیسم غالب اتلاف گرما برای واحدهای گیرنده در PTC در دماهای بالا است. برای کاهش این تلفات معمولاً از پوشش‌های نوری مانند لایه‌های نازک فلزی بازتابنده مادون قرمز (مانند نقره، طلا، مس یا آلومینیوم، کروم سیاه) نیمه‌هادی‌های با شکاف نواری مناسب و لایه‌های کامپوزیتی استفاده می‌شود. این پوشش‌ها نور مرئی را خوب جذب می‌کنند ولی در ساطع کردن نور مادون قرمز ضعیف هستند. پژوهشگران استفاده از پوشش آینه‌ای داغ (اکسید قلع ایندیوم، طلا و نقره) روی پوشش شیشه‌ای گیرنده را بصورت عددی و آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که پوشش آینه‌ای داغ، تابش حرارتی را برای جذب مجدد به لوله جاذب منعکس می‌کند و در نتیجه دمای بالاتری نسبت به پوشش‌های معمولی (بالاتر از ۷۰۰ کلوین) ایجاد می‌کند [۴۲]. تحقیقات قابل توجهی برای توسعه بازتابنده‌های ورقه‌ای فلزی و پلیمری انجام شده است، اما دوام آنها در شرایط آب و هوایی تناوبی چالشی است. در این میان همچنان از نظر بازتابندگی آینه‌ای و دوام، بازتابنده‌های شیشه‌ای بهترین گزینه در این حوزه هستند [۴۳].

۳-۲- جهت تابش و سیستم ردیاب

جذب انرژی در PTCها فقط از تابش مستقیم خورشید است بنابراین استفاده از سیستم‌های نوری و ردیاب‌های خورشیدی برای دنبال کردن جهت تابش مستقیم بسیار حائز اهمیت است. همان‌گونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، مسیر حرکت خورشید در طول روز و همچنین فصول مختلف متغییر است. از این رو لازم است که برای حداکثر بهره‌برداری و جذب انرژی تابشی خورشید، سیستم ردیابی مناسبی برای PTC تعبیه شود. روش‌های مختلفی برای ردیابی پرتو به همراه تأثیر پارامترهای مختلف مانند شکل خورشید، زاویه لبه، نسبت تمرکز هندسی، شکل گیرنده، خطاهای نوری، بازتابنده ثانویه و زاویه تابش بر توزیع شار ارائه شده‌است [۴۴]. تحقیقات نشان می‌دهد تأثیر خطای ردیاب خورشیدی بر راندمان نوری و ترمودینامیکی به درجه انحراف از تابش مستقیم بستگی دارد. به عنوان مثال در دو نمونه PTC مختلف آزمایش شده حداکثر خطای زاویه ردیاب ۱/۵ درجه و ۰/۹ درجه تأثیر چندانی در کاهش راندمان آنها نداشت. این در حالی است که در انحراف ۲ درجه به ترتیب کاهش راندمانی ٪۴/۷ و ٪۴۲/۵ برای این دو نمونه گزارش شد [۴۵]. از این رو مشخص می‌شود که حساسیت به جهت تابش مستقیم خورشید به نوع و هندسه PTC نیز بستگی دارد. سیستم‌های ردیابی اولیه از حلقه‌های بازخورد حسگر نور و سایه معمولی استفاده می‌کردند ولی هم‌اکنون سیستم‌های مدرن مبتنی بر هوش مصنوعی پردازش تصویر با افزایش فوق‌العاده در دقت ردیابی ارائه شده‌اند [۴۳].



شکل ۶- تغییر محل قرارگیری خورشید در زمان‌های مختلف.

حساسیت زیاد بازده به انحراف زاویه‌ای، خطاهای نوری تجمعی ناشی از شکل آینه و گیرنده، محدودیت سیستم‌های ردیابی در دنبال کردن خودکار جهت تابش بصورت در لحظه[5] و سرعت تغییر جهت گیرنده در جهت تابش مهم‌ترین چالش‌ها در این زمینه است که در مطالعات پیشین بطور کامل بررسی نشده است. در این راستا تحقیقات جدید برای طراحی پوشش‌های ضد انعکاس هوشمند روی گیرنده برای کاهش حساسیت به انحرافات جزئی، شبیه‌سازی تأثیر پارامترهای هندسی مانند نسبت تمرکز، زاویه لبه بر توزیع شار

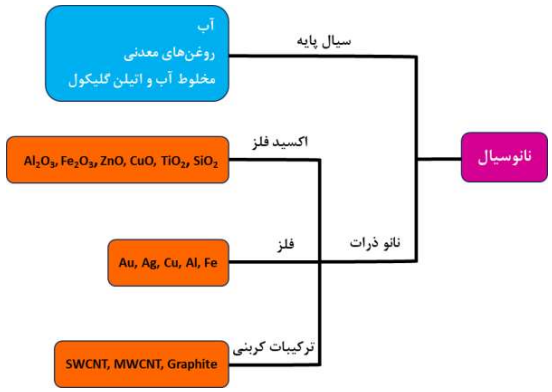
[1] Absorptivity
[2] Emissivity
[3] Concentration Ratio
[4] Reflectivity
[5] Real Time

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

متمرکز و بهینه‌سازی آنها، به کار بردن الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای کاهش اثر خطاهای زاویه‌ای بر پایه پردازش تصاویر برای ارتقائ سیستم ردیاب از زمینه‌های پژوهشی مورد نیاز است که می‌توانند دقت ردیابی را افزایش و تلفات نوری را به حداقل برسانند.

۳-۳- سیال انتقال حرارت

بیشترین مطالعاتی که در جهت افزایش بازده و کاهش افت حرارتی در PTCها انجام شده است در حوزه سیال انتقال حرارت بوده‌است. انتخاب سیال انتقال حرارت مناسب برای بهبود راندمان کلی سیستم نقش اساسی دارد [۴۶]. نسل اول نیروگاه‌های PTC از روغن مصنوعی به عنوان سیال انتقال حرارت استفاده می‌کردند. در ادامه برای تولید بخار مستقیم از آب به عنوان سیال انتقال حرارت استفاده شد [۴۷]. پس از آن نانوسیالات مختلف با قابلیت فوق‌العاده در افزایش میزان انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفتند. در نانوسیالات کسر جرمی بسیار کوچکی از نانوذرات، بهبود قابل توجهی در خواص ترموفیزیکی سیال پایه ایجاد می‌کند [۴۸]. آزمایشات افزایش ٪۷۵/۵ در راندمان حرارتی را در هنگام استفاده از نانوسیال TiO_2 به عنوان سیال انتقال حرارت گزارش کرده‌اند [۴۹]. به‌کارگیری نانوسیال‌های هیبریدی مانند مخلوطی از Al_2O_3 و نانولوله‌های کربنی چندجداره با غلظت ٪۰/۰۴ در آب، راندمان حرارتی را در مقایسه با آب خالص به میزان ٪۱۹۷/۱ بهبود می‌بخشد [۵۰]. نوع و غلظت‌های مختلف نانوسیال هیبریدی تأثیرات متفاوتی بر بهبود انتقال حرارت سیستم دارند. نانوسیال هیبریدی اکسید ایتریم و نانولوله‌های کربنی چند جداره با غلظت ٪۰/۱ در آب راندمان حرارتی را ٪۲۴/۹ افزایش می‌دهند [۵۱]. اگرچه افزودن نانو ذرات منجر به افزایش انتقال حرارت در سیال می‌شود از طرفی حضور این ذارت در سیال منجر به افزایش افت فشار در سیستم می‌شود که باید به آن توجه کرد. جنبه‌های گوناگون استفاده از نانو سیالات با انواع و غلظت‌های متفاوت بر کارکرد PTC در منابع متعددی بررسی شده‌است [۵۲-۵۷]. در شکل ۷ انوع پرکاربرد سیال پایه شامل آب، مخلوط آب و اتیلن گلیکول و روغن‌های معدنی و همچنین نانوذرات شامل نانوذرات فلزی، نانوذارت اکسید فلزی، نانو ذرات کربنی و انواع دیگر نانوذرات به‌کار برده شده در PTCهای مختلف نشان داده شده‌است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نانوسیال‌ها نه تنها (در بیشتر موارد) راندمان حرارتی، ضریب انتقال حرارت جابجایی و راندمان اکسرژی سیستم را افزایش می‌دهند، بلکه می‌توانند تولید آنتروپی سیستم را نیز کاهش دهند. تنها ایراد استفاده از نانوسیال‌ها در PTCها، افزایش افت فشار است که می‌توان با بهینه‌سازی کسر حجمی نانوذرات و دبی جرمی، آن را کنترل کرد [۵۸ و ۵۹]. اگرچه کارکرد انواع مختلفی از نانوذرات در این زمینه بررسی شده است با این‌حال بررسی و بهینه‌سازی اثر غلظت‌های مختلف نانوذرات، ارائه راهکارهایی برای حفظ پایداری در دمای بالا و کاهش تلفات هیدرودینامیکی سیال حاوی نانوذرات در این بخش نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.



شکل ۷- برخی از سیالات پایه و نانوذرات مختلف به‌کار برده شده در PTC.

۴-۳- لوله جاذب

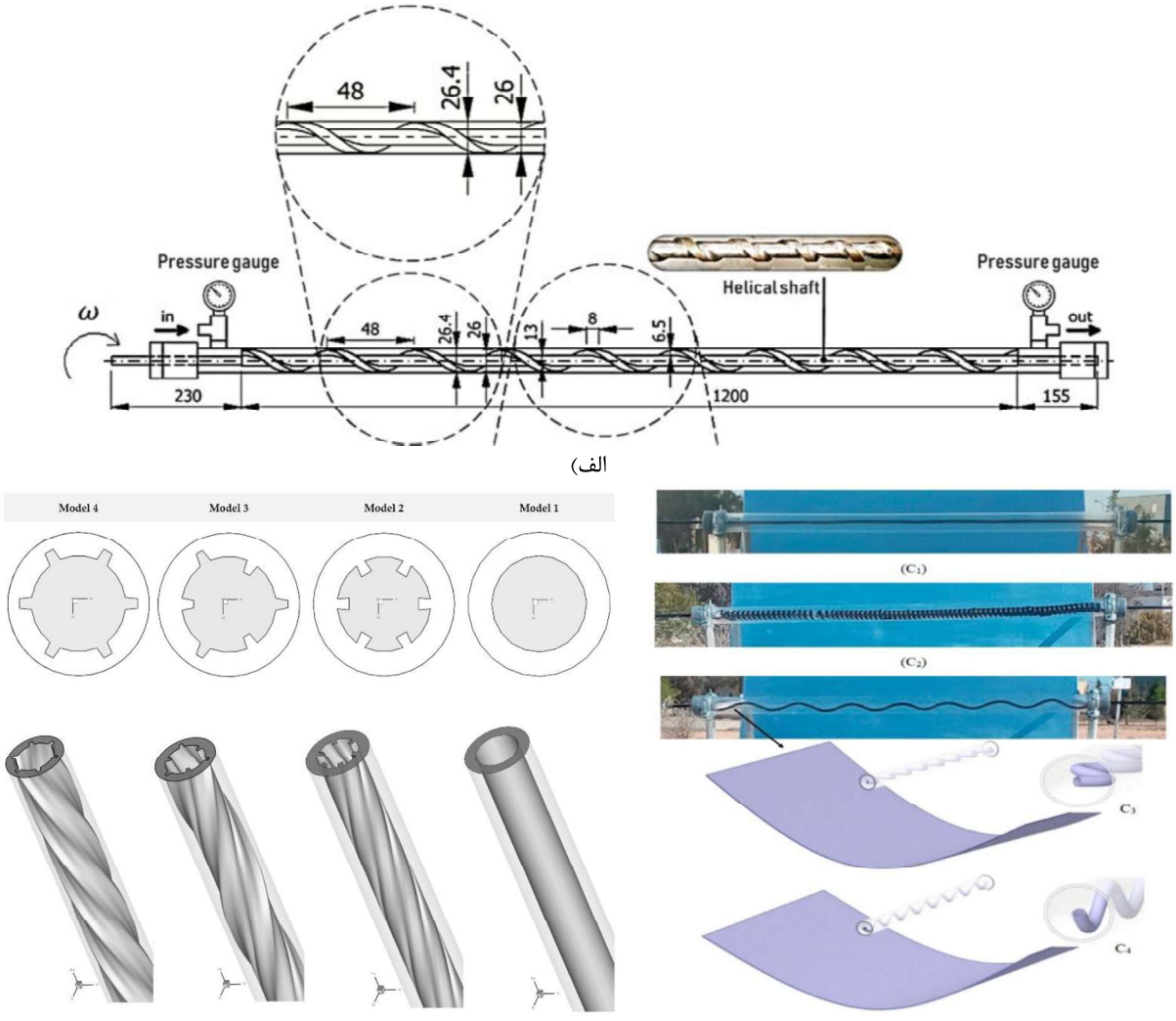
پس از سیال انتقال حرارت، بیشترین تحقیقات در PTC بر روی لوله جاذب انجام شده‌است [۶۰]. راهکارهای متعددی برای جلوگیری از اتلاف حرارتی و افزایش انتقال حرارت در بخش لوله جاذب در PTC ارائه شده است که شامل به‌کارگیری گیرنده نیمه‌عایق، گیرنده‌های حفره‌ای[1]، پوسته بیرونی خلاء [۶۱]، گنجاندن قطعات داخلی در مسیر سیال، بافل‌ها، زبری مصنوعی در جداره و استفاده از هندسه‌های غیرخطی برای لوله مرکزی می‌شود [۴۰, ۶۲]. در شکل ۸ نمونه‌هایی از مغشوش‌کننده‌های مختلف در لوله جاذب PTC مانند شفت مارپیچی داخل لوله گیرنده و لوله جاذب با پره‌های محوری مارپیچ داخلی نشان داده شده است. عایق‌بندی لوله جاذب منجر به جلوگیری از اتلاف انرژی می‌شود و افزایش توربولانسی جریان سیال، منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود [۶۳]. هر دوی این عوامل باعث افزایش بازده حرارتی سیستم می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد گیرنده‌های خلأ نیمه‌عایق آئروژلی شفاف، مواد مات و سپر

[1] Cavity receiver

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

تابشی با عایق کردن نواحی خاصی از لوله جاذب یا فضای اطراف آن خصوصاً در دمای بالا از اتلاف حرارت جلوگیری می‌کنند [۶۴]. گیرنده‌های حفره‌ای در صورت هم‌ترازی با خط کانونی، شار حرارتی جذب‌شده توسط حفره و بازده نوری را بهبود می‌بخشند [۶۵]. تاثیر مهم هندسه لوله جاذب بر عملکرد PTC کاملاً بدیهی و اثبات شده است [۶۶]. مطالعات نشان داده‌است که اگرچه با افزایش طول لوله جاذب میزان درمعرض بودن تابش افزایش می‌یابد و بنابراین جذب حرارت به سیستم افزایش می‌یابد ولی با افزایش طول لوله، میزان تلفات حرارتی نیز افزایش می‌یابد. با افزایش طول کلکتور ممکن است سیستم به حالتی برسد که افزایش گرمای جذب شده با تلفات حرارتی برابر شود؛ بنابراین، طول اضافی غیرفعال خواهد بود [۶۷]. بررسی انواع مغشوش‌کننده‌ها در مسیر جریان در لوله جاذب نشان می‌دهد که لوله شیاردار و میله داخلی هم‌مرکز، بهینه‌ترین مغشوش‌کننده‌ها هستند. علاوه بر این، کلکتور سهموی ناودانی مجهز به ترکیبی از کانال موج‌دار و مانع، عملکرد حرارتی بسیار بهتری نسبت به کلکتورهایی دارد که از هر یک از این مغشوش‌کننده‌ها به صورت جداگانه استفاده می‌کنند [۶۶]. علاوه بر افزایش میزان انتقال حرارت با گسترش سطح تماس سیال و سطح، به‌کارگیری مغشوش‌کننده‌ها در مسیر جریان منجر به توزیع یکنواخت دما در لوله جاذب و درنتیجه کاهش تنش حرارتی و تلفات حرارتی در دماهای بالاتر و افزایش راندمان سیستم می‌شود.



شکل ۸- استفاده از مغشوش‌کننده‌های متنوع در لوله جاذب PTC. الف) مقطع طولی نمونه آزمایشگاهی شفت مارپیچی داخل لوله گیرنده، ابعاد به میلی‌متر [۶۸] ب) نمونه آزمایشگاهی مسیر مارپیچی [۶۹] ج) لوله جاذب با پره‌های محوری مارپیچ داخلی [۷۰]..

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

در تکمیل مطالعات پیشین بهینه‌سازی همزمان عایق‌بندی، هندسه لوله و مغشوش‌کننده‌ها برای کاهش تلفات و تنش‌های حرارتی در دمای بالا، توسعه گیرنده‌های هیبریدی (ترکیب خلأ و سیال با چیدمان‌های مختلف)، استفاده از مواد تغییرفازدهنده در ساختار لوله جاذب، بهینه‌سازی هندسه مغشوش‌کننده‌ها با روش‌های محاسباتی پیشرفته برای دستیابی به بازده مطلوب نیازمند پژوهش‌های بیشتر است.

۴- ذخیره‌سازی انرژی

PTCها قابلیت استفاده از واحدهای ذخیره‌ساز انرژی برای ساعات بدون خورشید را دارند. در فاز شارژ، انرژی خورشیدی متمرکز شده، در تانک‌های ذخیره‌سازی عایق‌بندی شده در دمای بالا ذخیره می‌شود و در فاز تخلیه، حرارت ذخیره شده از طریق مبدل‌های حرارتی برای تولید بخار فوق‌داغ برای راه‌اندازی توربین‌ها به‌کار می‌رود. تحقیقات نشان می‌دهد از میان موادی که قابلیت ذخیره انرژی را دارند نمک مذاب با ظرفیت حرارتی بالا (حدود ۱/۵ کیلوژول بر کیلوگرم-کلوین در محدوده دمایی ۲۹۰ تا ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد)، پایداری حرارتی ممتاز و توان ذخیره‌سازی انرژی تا بیش از ۱۰ ساعت با بازدهی ۹۳ تا ۹۸ درصد انتخاب مناسبی برای ذخیره‌سازی انرژی و تأمین انرژی پایدار در مقیاس بزرگ محسوب می‌شود. بررسی روغن صنعتی ترمینول[1] به عنوان جایگزین نمک مذاب نشان می‌دهد که پایداری حرارتی در دماهای بالا، بازده انرژی و اگزرژی برای نمک مذاب بیشتر است. با این‌حال ترمینول-VP1 به‌دلیل چگالی انرژی حجمی بالاتر، به حجم ذخیره‌سازی کمتری نسبت به نمک مذاب (حدوداً یک‌سوم حجم مورد نیاز برای نمک مذاب) نیاز دارد. این قابلیت برای نیروگاه‌های با محدودیت فضا مناسب است [۷۱]. نمک مذاب در این کاربرد عمدتاً ترکیبی از نیترات سدیم و پتاسیم است با این حال تحقیقاتی برای افزودن انوع نانو ذرات مانند (Al_2O_3–TiO_2) برای افزایش ظرفیت حرارتی نمک مذاب ترکیبی، ارزیابی مکانیکی سیالاتی- حرارتی استراتژی‌های مختلف بازیابی انجماد نمک‌های مختلف [۷۲] و کاربرد نمک مذاب به عنوان خنک‌کننده، در واحدهای PTC [۷۳] انجام شده است. از جمله چالش‌های این واحد، ارتقائ خواص حرارتی و ذخیره‌سازی ماده ذخیره کننده انرژی با ارائه راهکارهای مناسب برای بهبود نمک‌های مذاب یا یافتن جایگزین مناسب، طراحی حرارتی و بهینه سیستم‌های عایق‌بندی، مخازن ذخیره و مسائل خوردگی سازه‌هاست که نیازمند مطالعات بیشتر جهت افزایش بهره‌وری همزمان با کاهش هزینه‌ها است.

۵- بحث در نتایج

این مقاله به معرفی کلکتورهای خطی سهموی خورشیدی پرداخته است. کلکتورهای خطی سهموی یکی از قدیمی‌ترین و ساده‌ترین فناوری‌های انرژی خورشیدی هستند که هم‌اکنون در مقیاس صنعتی برای تولید انرژی پاک و پایدار به‌کار می‌روند. استفاده از این سیستم‌ها در مناطقی با تابش خورشیدی بالا می‌تواند نقش مهمی در تأمین برق و کاهش نیاز به سوخت‌های فسیلی در درازمدت ایفا کند. کلکتورهای سهموی با قابلیت تولید حرارت در محدوده دمایی گسترده در مقایس‌های کوچک و بزرگ کاربرد دارند. با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی این سیستم برای تولید برق پایدار بکار می‌رود. بهبود اجزای سازنده به لحاظ هندسی و جنس مواد سازنده، تأثیرات چشمگیری در افزایش بازده حرارتی این سیستم و همچنین کاهش هزینه ساخت نسبت به انرژی تولیدی مفید در آنها دارد. عملکرد بهینه این سیستم به جهت تابش نور خورشید بستگی دارد که توسط سیستم ردیاب اشعه تأمین می‌شود. برای کلکتور سهموی سطوح آینه‌ای شیشه‌ای نسبت به فلزات پرداخت‌شده سطحی بازده بهتری را ارائه می‌دهند. عملکرد حرارتی این سیستم به شدت به ساختار هندسی لوله جاذب و سیال انتقال حرارت بستگی دارد. استفاده از انواع نانوسیالات میزان انتقال حرارت در این سیستم‌ها را افزایش می‌دهد این درحالی است که متناظر با آن سبب افت فشار در سیستم نیز می‌شود. استفاده از اصول سیالاتی مانند استفاده از مغشوش‌کننده‌های جریان نقش مهمی در افزایش انتقال حرارت، تنظیم توزیع حرارت یکنواخت در لوله جاذب و جلوگیری از تمرکز تنش حرارتی در لوله جاذب می‌شود. اگرچه در حال حاضر انواع مختلف کلکتور خورشیدی سهموی تجاری وجود دارند با این‌حال همچنان نیاز به ارتقاء عوامل موثر در افزایش بازده حرارتی این سیستم با در نظر گرفتن کاهش هزینه اقتصادی آن مورد توجه محققان است. زیرا این عوامل در پیشرفت و توسعه نیروگاه‌های بزرگ کلکتور خورشیدی سهموی خطی به عنوان منابع انرژی پاک و تجدیدپذیر مورد توجه است. از طرف دیگر توسعه کلکتور خورشیدی سهموی خطی کوچک می‌تواند جایگزین مناسبی برای خطوط انتقال نیرو به مناطق صعب‌العبور یا خاص باشد. برای زمینه‌های تحقیقاتی جدید در

[1] Therminol-PV1

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

این حوزه می‌توان به توسعه سیستم‌های هوشمند ترکیبی هوش مصنوعی دیجیتالی برای ردیابی درلحظه، طراحی پوشش‌های هوشمند با قابلیت تنظیم طیف جذب/انتشار، ساخت گیرنده‌های هیبریدی چندمنظوره (ترکیب نمک مذاب، مواد تغییرفاز و نانوسیال)، بهینه‌سازی ساختارهای نگهدارنده سبک‌وزن توپولوژیک، سیستم‌های خنک‌کاری غیرفعال پیشرفته (مانند میکروکانال‌های تغییرفازدهنده)، ادغام فناوری‌های نوین مانند ترموالکتریک‌های نانوساختار و چرخه‌های بازیابی انرژی تلف‌شده، اشاره کرد.

منابع

[1] Saini P, Singh S, Kajal P, Dhar A, Khot N, Mohamed M, et al. A review of the techno-economic potential and environmental impact analysis through life cycle assessment of parabolic trough collector towards the contribution of sustainable energy. Heliyon. 2023; 9(7). [DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e17626]

[2] Dewitte S, Clerbaux N. Measurement of the Earth radiation budget at the top of the atmosphere—A review. Remote Sensing. 2017; 9(11):1143. [DOI:10.3390/rs9111143]

[3] al. JMKCDe. Energy Education. 2024 [Available from: J.M.K.C. Donev et al. (2024). Energy Education. Available: https://energyeducation.ca. [Accessed: 2024].

[4] Sivakumar C, Robinson Y, Joe Patrick Gnanaraj S, Jithendra K. Analysis of the performance of V-type solar stills coupled with flat plate collectors and the potential use of artificial intelligence. Desalination and Water Treatment. 2024; 318:100365. [DOI:10.1016/j.dwt.2024.100365]

[5] El-Sebaey MS, Mousavi SM, Sathyamurthy R, Panchal H, Essa FA. A detailed review of various design and operating parameters affecting the thermal performance augmentation of flat-plate solar collectors. International Journal of Ambient Energy. 2024; 45(1):2351100. [DOI:10.1080/01430750.2024.2351100]

[6] Fatemi SAZ, Zgham W, Shirzad S, Serat Z. Feasibility Study of Theoretical Efficiency Calculation for Flat-Plate Collectors in Solar Water Heating Systems. Archives of Advanced Engineering Science. 2025; 3(2):73-82. [DOI:10.47852/bonviewAAES32021384]

[7] Kim H, Chinnasamy V, Ham J, Cho H. Parabolic trough collectors: A comprehensive review of design innovations, optimization studies and applications. Energy Conversion and Management. 2025; 327:119534. [DOI:10.1016/j.enconman.2025.119534]

[8] Li K, Ru J, Wu D, Ru Y, Alkhalifah T, Marzouki R. Exergy destruction and heat transfer of parabolic trough collector using porous medium: Machine learning algorithms. Applied Thermal Engineering. 2025; 276:126922. [DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.126922]

[9] Edalatpour A, Hosseinalipour S, Moghimi M. An experimental analysis of the performance of direct absorption parabolic trough collectors with laser-processed copper surfaces. Scientific Reports. 2025; 15(1):8921. . [DOI:10.1038/s41598-025-92689-z]

[10] Zhang Z, Zheng G, Wang L, Ding N, Xu J. Environmental, energy and economic assessment of thermionic enhanced solar dish–Stirling power generation. Solar Energy. 2025; 285:113125. [DOI:10.1016/j.solener.2024.113125]

[11] Ntegmi GJB, Babikir MH, Chara-Dakou VS, Chopkap HN, Mounkang O, Kenfack AZ, et al. Thermo-economic and environmental analysis of a Dish-Stirling/Stirling thermal solar refrigerator for cold production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025; 216:115701. [DOI:10.1016/j.rser.2025.115701]

[12] Li X, Bai F. A Review on the Thermal Modeling Method for Molten Salt Receivers of Concentrating Solar Power Tower Plants. Energies. 2025; 18(2):19961073. [DOI:10.3390/en18020292]

[13] Mohamed L, Abdelkader R, Laroussi K, Singh AR, Bajaj M, Tuka MB. Comprehensive techno-economic optimization and performance analysis of molten salt concentrated solar power tower plants in Algeria. Scientific Reports. 2025; 15(1):14456. [DOI:10.1038/s41598-025-97236-4]

[14] Ghritlahre HK, Verma M. Solar air heaters performance prediction using multi-layer perceptron neural network–a systematic review. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2025; 47(1):7682-99. [DOI:10.1080/15567036.2021.1923869]

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

spectrum. Sensors. 2020; 20(21):6249. [DOI:10.3390/s20216249]

[24] Al-Maliki WAK, Al-Hasnawi AGT, Abdul Wahhab HA, Alobaid F, Epple B. A Comparison Study on the Improved Operation Strategy for a Parabolic trough Solar Power Plant in Spain. Applied Sciences. 2021; 11(20):9576. [DOI:10.3390/app11209576]

[25] Alamdari P, Khatamifar M, Lin W. Heat loss analysis review: Parabolic trough and linear Fresnel collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2024; 199:114497. [DOI:10.1016/j.rser.2024.114497]

[26] Ajbar W, Parrales A, Huicochea A, Hernández J. Different ways to improve parabolic trough solar collectors' performance over the last four decades and their applications: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022; 156:111947. [DOI:10.1016/j.rser.2021.111947]

[27] Wang Q, Yao Y, Shen Z, Yang H. A hybrid parabolic trough solar collector system integrated with photovoltaics. Applied Energy. 2023; 329:120336. [DOI:10.1016/j.apenergy.2022.120336]

[28] Al-Rabeeah AY, Seres I, Farkas I. Experimental investigation of parabolic trough solar collector thermal efficiency enhanced with different absorber coatings. International Journal of Thermofluids. 2023; 19:100386. [DOI:10.1016/j.ijft.2023.100386]

[29] Selvam L, Hossain I, Aruna M, Venkatesh R, Karthigairajan M, Prabagaran S, et al. Enhancement and characteristics study of parabolic trough solar collector by using magnesium oxide coating on solar tubes. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024;149(21):12001-10. [DOI:10.1007/s10973-024-13576-9]

[30] Raza SH, Qamar A, Noor F, Riaz F, Usman M, Farooq M, et al. Experimental analysis of thermal performance of direct absorption parabolic trough collector integrating water based nanofluids for sustainable environment applications. Case Studies in Thermal Engineering. 2023; 49:103366. [DOI:10.1016/j.csite.2023.103366]

[31] Naveenkumar R, Ravichandran M, Stalin B, Ghosh A, Karthick A, Aswin LSRL, et al. Comprehensive review on various parameters that influence the performance of parabolic trough collector. Environmental Science and

[15] Hegde AK, Pai R, Karanth KV. Energy and exergetic analysis of a solar air heater for enhanced thermohydraulic performance with side wall treatment. Energy. 2025; 315:134333. [DOI:10.1016/j.energy.2024.134333]

[16] Venkatesh R, Logesh K, Kumar R, Singh S, Singh PK, Vijay SM, et al. Thermal and exergy analysis of solar air heater enhanced with sodium carbonate decahydrate and Magnesium sulfate heptahydrate PCM: Performance evaluation. Applied Thermal Engineering. 2025; 258:124556. [DOI:10.1016/j.applthermaleng.2024.124556]

[17] Mbelu OV, Adeyinka AM, Yahya DI, Adediji YB, Njoku H. Advances in solar pond technology and prospects of efficiency improvement methods. Sustainable Energy Research. 2024; 11(1):18. [DOI:10.1186/s40807-024-00111-5]

[18] Farsijani E, Shafizadeh A, Mobli H, Akbarzadeh A, Tabatabaei M, Peng W, et al. Enhanced performance and stability of a solar pond using an external heat exchanger filled with nano-phase change material. Energy. 2024; 292:130423. [DOI:10.1016/j.energy.2024.130423]

[19] Poorani B, Poyyamozhi N, Prabhakar P. Optimization of thermal performance in solar Ponds: Synergistic effects of phase change materials and Fe3O4 nanoparticles. Thermal Science and Engineering Progress. 2025; 59:103385. [DOI:10.1016/j.tsep.2025.103385]

[20] Krishna Y, Faizal M, Saidur R, Ng K, Aslfattahi N. State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020; 152:119541. [DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119541]

[21] Awan AB, Khan M, Zubair M, Bellos E. Commercial parabolic trough CSP plants: Research trends and technological advancements. Solar Energy. 2020; 211:1422-58. [DOI:10.1016/j.solener.2020.09.072]

[22] Felsberger R, Buchroithner A, Gerl B, Wegleiter H. Conversion and Testing of a Solar Thermal Parabolic Trough Collector for CPV-T Application. Energies. 2020; 13(22):6142. [DOI:10.3390/en13226142]

[23] Usamentiaga R, Fernández A, Carús JL. Evaluation of dust deposition on parabolic trough collectors in the visible and infrared

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

Express. 2024; 6(1):012001. [DOI:10.1088/2631-8695/ad1c0b]

[41] Mohamad K. Exploring the influence of optical and thermal parameters on the effectiveness of parabolic trough collector receiver units. Clean Energy. 2024; 8(4):15-33. [DOI:10.1093/ce/zkae033]

[42] Kaluba V, Mohamad K, Ferrer P. Experimental and simulated performance of hot mirror coatings in a parabolic trough receiver. Applied Energy. 2020; 257:114020. [DOI:10.1016/j.apenergy.2019.114020]

[43] Gharat PV, Bhalekar SS, Dalvi VH, Panse SV, Deshmukh SP, Joshi JB. Chronological development of innovations in reflector systems of parabolic trough solar collector (PTC)-A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021; 145:111002. [DOI:10.1016/j.rser.2021.111002]

[44] Malan A, Kumar KR. A comprehensive review on optical analysis of parabolic trough solar collector, Sustain. Energy Technol. Assessments. 46 (2021) 101305. [DOI:10.1016/j.seta.2021.101305]

[45] Stanek B, Węcel D, Bartela Ł, Rulik S. Solar tracker error impact on linear absorbers efficiency in parabolic trough collector–Optical and thermodynamic study. Renewable Energy. 2022; 196:598-609. [DOI:10.1016/j.renene.2022.07.021]

[46] Malviya R, Agrawal A, Baredar PV. A comprehensive review of different heat transfer working fluids for solar thermal parabolic trough concentrator. Materials Today: Proceedings. 2021; 46:5490-500. [DOI:10.1016/j.matpr.2020.09.240]

[47] Pal RK, Kumar R. Investigations of thermo-hydrodynamics, structural stability, and thermal energy storage for direct steam generation in parabolic trough solar collector: a comprehensive review. Journal of Cleaner Production. 2021; 311:127550. [DOI:10.1016/j.jclepro.2021.127550]

[48] Panduro EAC, Finotti F, Largiller G, Lervåg KY. A review of the use of nanofluids as heat-transfer fluids in parabolic-trough collectors. Applied Thermal Engineering. 2022; 211:118346. [DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.118346]

[49] Hamada MA, Khalil H, Abou Al-Sood M, Sharshir SW. An experimental investigation of nanofluid, nanocoating, and energy storage materials on the performance of parabolic Pollution Research. 2021; 28(18):22310-33. [DOI:10.1007/s11356-021-13439-y]

[32] Fredriksson J, Eickhoff M, Giese L, Herzog M. A comparison and evaluation of innovative parabolic trough collector concepts for large-scale application. Solar Energy. 2021; 215:266-310. [DOI:10.1016/j.solener.2020.12.017]

[33] Tagle-Salazar PD, Nigam KD, Rivera-Solorio CI. Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards. Green Processing and Synthesis. 2020; 9(1):595-649. [DOI:10.1515/gps-2020-0059]

[34] Kumar A, Sharma M, Thakur P, Thakur VK, Rahatekar SS, Kumar R. A review on exergy analysis of solar parabolic collectors. Solar Energy. 2020; 197:411-32. [DOI:10.1016/j.solener.2020.01.025]

[35] Akbarzadeh S, Valipour MS. Heat transfer enhancement in parabolic trough collectors: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018; 92:198-218. [DOI:10.1016/j.rser.2018.04.093]

[36] Sandeep H, Arunachala U. Solar parabolic trough collectors: A review on heat transfer augmentation techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017; 69:1218-31. [DOI:10.1016/j.rser.2016.11.242]

[37] Conrado LS, Rodriguez-Pulido A, Calderón G. Thermal performance of parabolic trough solar collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017; 67:1345-59. [DOI:10.1016/j.rser.2016.09.071]

[38] Abed N, Afgan I. An extensive review of various technologies for enhancing the thermal and optical performances of parabolic trough collectors. International Journal of Energy Research. 2020; 44(7):5117-64. [DOI:10.1002/er.5271]

[39] Felsberger R, Buchroithner A, Gerl B, Schweighofer B, Preßmair R, Mitter T, et al. Optical performance and alignment characterization of a parabolic trough collector using a multi-junction CPV solar cell. Solar Energy. 2022; 239:40-9. [DOI:10.1016/j.solener.2022.04.058]

[40] Bhattacharya K, Paradeshi S, Karthik M, VR S, Bibin B, Edison G. Analyzing the performance of a parabolic trough solar collector with advanced techniques adopted in the absorber-a review. Engineering Research

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

nanofluids in thermal performance enhancement of parabolic trough solar collector: state-of-the-art. Applied Sciences. 2019; 9(3):463. [DOI:10.3390/app9030463]

[59] Sainz-Mañas M, Bataille F, Caliot C, Vossier A, Flamant G. Direct absorption nanofluid-based solar collectors for low and medium temperatures. A review. Energy. 2022; 260:124916. [DOI:10.1016/j.energy.2022.124916]

[60] Sharma M, Jilte R. A review on passive methods for thermal performance enhancement in parabolic trough solar collectors. International Journal of Energy Research. 2021; 45(4):4932-66. [DOI:10.1002/er.6212]

[61] Shokrnia M, Cagnoli M, Grena R, D'Angelo A, Lanchi M, Zanino R. Comparative Techno-Economic Analysis of Parabolic Trough and Linear Fresnel Collectors with Evacuated and Non-Evacuated Receiver Tubes in Different Geographical Regions. Processes. 2024; 12(11):2376. [DOI:10.3390/pr12112376]

[62] Kumaresan G, Sudhakar P, Santosh R, Velraj R. Experimental and numerical studies of thermal performance enhancement in the receiver part of solar parabolic trough collectors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017; 77:1363-74. [DOI:10.1016/j.rser.2017.01.171]

[63] Donga RK, Karn A. Improving the thermal performance of parabolic trough solar collectors by incorporating cylindrical attachments within the absorber tube. Applied Thermal Engineering. 2025; 273:126587. [DOI:10.1016/j.applthermaleng.2025.126587]

[64] Li Q, Zhang Y, Wen Z-X, Qiu Y. An evacuated receiver partially insulated by a solar transparent aerogel for parabolic trough collector. Energy Conversion and Management. 2020; 214:112911. [DOI:10.1016/j.enconman.2020.112911]

[65] Loni R, Sharifzadeh M. Performance comparison of a solar parabolic trough concentrator using different shapes of linear cavity receiver. Case Studies in Thermal Engineering. 2024; 60:104603. [DOI:10.1016/j.csite.2024.104603]

[66] Nazir MS, Shahsavar A, Afrand M, Arıcı M, Nižetić S, Ma Z, et al. A comprehensive review of parabolic trough solar collectors equipped with turbulators and numerical evaluation of hydrothermal performance of a novel model. Sustainable energy technologies trough collector. Applied Thermal Engineering. 2023; 219:119450. [DOI:10.1016/j.applthermaleng.2022.119450]

[50] Mashhadian A, Heyhat MM, Mahian O. Improving environmental performance of a direct absorption parabolic trough collector by using hybrid nanofluids. Energy Conversion and Management. 2021; 244:114450. [DOI:10.1016/j.enconman.2021.114450]

[51] Al-Oran O, Shaban NA, Manna R, Ayadi O, A'saf A, Lezsovits F. Performance study of parabolic trough solar collector using hybrid nanofluids under Jordanian weather conditions. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024; 149(9):3981-98. [DOI:10.1007/s10973-024-12961-8]

[52] Nawsud ZA, Altouni A, Akhijahani HS, Kargarsharifabad H. A comprehensive review on the use of nano-fluids and nano-PCM in parabolic trough solar collectors (PTC). Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022; 51:101889. [DOI:10.1016/j.seta.2021.101889]

[53] Bamisile O, Cai D, Adun H, Adedeji M, Dagbasi M, Dika F, et al. A brief review and comparative evaluation of nanofluid application in solar parabolic trough and flat plate collectors. Energy Reports. 2022; 8:156-66. [DOI:10.1016/j.egyr.2022.08.078]

[54] Gupta SK. A short & updated review of nanofluids utilization in solar parabolic trough collector. Materials Today: Proceedings. 2023. [DOI:10.1016/j.matpr.2023.06.204]

[55] Gupta SK, Saxena A. A progressive review of hybrid nanofluid utilization in solar parabolic trough collector. Materials Today: Proceedings. 2023. [DOI:10.1016/j.matpr.2023.06.204]

[56] Kumar S, Kumar A. Effect of mono/hybrid nanofluids and passive techniques on thermal performance of parabolic trough solar collector: A review. Energy Sources Part A: Recovery, Utilization & Environmental Effects. 2023; 45(1). [DOI:10.1080/15567036.2023.2178551]

[57] Omeiza LA, Abid M, Subramanian Y, Dhanasekaran A, Bakar SA, Azad AK. Challenges, limitations, and applications of nanofluids in solar thermal collectors—a comprehensive review. Environmental Science and Pollution Research. 2023:1-29. [DOI:10.1007/s11356-023-30656-9]

[58] Olia H, Torabi M, Bahiraei M, Ahmadi MH, Goodarzi M, Safaei MR. Application of

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]

and assessments. 2021; 45:101103. [DOI:10.1016/j.seta.2021.101103]

[67] Mohamad A, Orfi J, Alansary H. Heat losses from parabolic trough solar collectors. International journal of energy research. 2014; 38(1):20-8. [DOI:10.1002/er.3010]

[68] Allam M, Tawfik M, Bekheit M, El-Negiry E. Experimental investigation on performance enhancement of parabolic trough concentrator with helical rotating shaft insert. Sustainability. 2022; 14(22):14667. [DOI:10.3390/su142214667]

[69] Mahdhi J, Hamdi F, Ebadi H, Bouabidi A, Ennetta R, Savoldi L. Experimental Study of a Stationary Parabolic Trough Collector with Modified Absorbers for Domestic Water Heating. Energies. 2025; 18(13):3261. [DOI:10.3390/en18133261]

[70] Zaboli M, Mousavi Ajarostaghi SS, Saedodin S, Saffari Pour M. Thermal Performance Enhancement Using Absorber Tube with Inner Helical Axial Fins in a Parabolic Trough Solar Collector. Applied Sciences. 2021; 11(16):7423. [DOI:10.3390/app11167423]

[71] Alaidaros AM, AlZahrani AA. Thermal performance of parabolic trough integrated with thermal energy storage using carbon dioxide, molten salt, and oil. Journal of Energy Storage. 2024; 78:110084. [DOI:10.1016/j.est.2023.110084]

[72] Herruzo JC, Imponenti L, Valverde J, Shininger R, Price H. A coupled fluid-thermo-mechanical evaluation of various freeze recovery strategies for molten salt parabolic trough collectors. Solar Energy. 2024; 267:112250. [DOI:10.1016/j.solener.2023.112250]

[73] Raheem A, Siddique W, Awais M, Qureshi K, Nawaz R, Shabbir MA. To evaluate the performance of molten salt coolants in parabolic trough collectors (PTCs). International Journal of Energy for a Clean Environment. 2025; 26:13-33. [DOI:10.1615/InterJEnerCleanEnv.2024051859]

[Downloaded from yujs.yu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOI: 10.61186/jste.4.2.25]