



## بررسی کلکتور سهموی جذب مستقیم با یک لوله مرکزی جاذب به منظور جذب سطحی و حجمی به طور همزمان و اثر نانو سیال کربن در بهبود عملکرد حرارتی

علی اصغر امرایی<sup>۱</sup>، محمد افتخاری یزدی<sup>۲\*</sup>، آرش میر عبداله لواسانی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، گروه مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup>استادیار، گروه مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۳</sup>دانشیار، گروه مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

### چکیده

هدف از این کار بررسی یک هندسه متفاوت در کلکتور سهموی به منظور افزایش راندمان حرارتی از طریق جذب همزمان سطحی و حجمی صورت ترکیبی هست. اخیراً مشاهده شده که اگر دمای ورودی بالای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد، کلکتورهای جذب مستقیم می‌تواند راندمان را تا ۱۰٪ افزایش دهد. با توجه به اینکه رابطه مستقیمی بین غلظت نانوسیال و قطر لوله شفاف حامل سیال با ضریب جذب وجود دارد، از طرفی هرچه غلظت نانوسیال بالا رود، مشکلات رسوب‌گذاری سیال و نگهداری سیستم پیشمی‌آید. در این تحقیق مقدار نانوکربن استفاده شده به صورت سوسپانسیون ۰/۰۲ gr/l در سیال پایه روغن در نظر گرفته شده است که طبق داده‌های تجربی این مقدار غلظت نانو کربن پرتوهای نور را در عمق ۲۴ (میلی‌متر) کاملاً جذب می‌کند و از همین ضریب جذب برای این هندسه خاص از کلکتور استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد، بقیه تشعشع به صورت سطحی با استفاده از لوله مرکزی جذب می‌شود، به طوری که راندمان حرارتی را تا ۶ درصد نسبت به کلکتور معمول جذب مس را داریم که حدود ۱۹ درجه کلوین است. در واقع در این پژوهش با استفاده از لوله جاذب مرکزی مسی درون لوله شفاف کلکتور، علاوه بر جذب مستقیم تشعشع توسط سیال، از جذب سطحی لوله مرکزی هم استفاده شود و باعث می‌شود تلفات حرارتی به حداقل برسد.

**کلمات کلیدی:** کلکتور سهموی؛ نانوسیال؛ جذب سطحی؛ عملکرد حرارتی.

## Investigating the direct absorption planar collector with a central absorber tube for simultaneous surface and volume absorption and the effect of carbon nanofluid in improving thermal performance

Ali Asghar Amraee<sup>1</sup>, Mohammad Eftekhari Yazdi<sup>2\*</sup>, Arash Mirabdollah Lavasani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD student, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

### Abstract

The purpose of this work is to investigate a different geometry in the parabolic collector in order to increase the thermal efficiency through simultaneous surface and volume absorption in a combined condition. Recently, it has been observed that if the inlet temperature is above 250 °C, Direct absorption collectors can increase efficiency up to 10%. Considering that there is a direct relationship between the concentration of nanofluid and the diameter of the transparent tube carrying the fluid with the absorption coefficient, On the other hand, as the concentration of nanofluid increases, fluid sedimentation and system maintenance problems occur. In this research, the amount of nanocarbon used as a suspension of 0.02 gr/l in oil base fluid is considered. According to experimental data, this amount of nano carbon concentration completely absorbs light rays at a depth of 24 (mm) and this absorption coefficient has been used for this specific geometry of the collector. The results show that the rest of the radiation is absorbed on the surface using the central tube, so that the thermal efficiency is up to 6% compared to the usual copper absorption collector, which is about 19 degrees Kelvin. In fact this research utilizes a copper central absorber tube inside the transparent tube of the collector to minimize heat loss. By doing this, not only does the fluid directly absorb radiation, but the surface absorption of the central tube is also used.

**Keywords:** Parabolic collector; Nanofluid; Surface Adsorption; Thermal performance.

## ۱- مقدمه

از آنجا که در قرن‌های گذشته سوخت‌های فسیلی بسیار ارزان‌تر و در دسترس‌تر از دیگر منابع انرژی بودند، تأمین تقاضای انرژی جهان، بیشتر با استفاده از این نوع سوخت‌ها صورت گرفته است؛ ولینگرانی‌های بشر در مورد افزایش دمای جهانی، افزایش جمعیت و پایان‌پذیری سوخت‌های فسیلی، ایجاب می‌کند، روش‌های جمع‌آوری و مصرف انرژی تغییر یابد تا بتوان در آینده امکان استفاده فراگیر از منابع انرژی تجدید پذیر را فراهم آورد. در میان منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید، باد، زیست‌توده و زمین‌گرمایی، انرژی خورشید به دلیل پاک بودن و قابلیت‌تأمین آن بدون هرگونه آلودگی زیست‌محیطی، جایگزین مناسب‌تری برای سوخت‌های فسیلی است. یکی از نکات مهم در این زمینه، افزایش کارایی تجهیزات خورشیدی است تا کاربرد آن‌ها توجیه اقتصادی داشته باشد. در زمینه استفاده از این منبع چندین روش برای بهبود راندمان انتقال حرارت وجود دارد. برخی از این روش‌ها شامل استفاده از سطوح گسترده، استفاده از لرزش به سطوح انتقال حرارت و استفاده از کانال‌های میکرو است. یکی دیگر از روش‌های افزایش راندمان حرارتی و افزایش هدایت حرارتی سیال عامل است. سیستم متمرکزکننده خورشیدی، فتاوری مؤثر برای تولید انرژی گرمایی و برق به منظور کاهش مشکلات آلودگی و جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی در پژوهش‌های آتی هستند. جاذب‌های خورشیدی یکی از اصلی‌ترین اجزای دستگاه‌های متمرکزکننده خورشیدی هستند. در این راستا مطالعات زیادی در رابطه با جذب‌کننده‌های خورشیدی در تحقیق‌های اخیر انجام شده است. در این بین جذب‌کننده‌های حجمی و مستقیم مورد توجه بسیاری از دانشمندان در پژوهش‌های اخیر قرار گرفته است. افزایش قدرت جذب تشعشع و انتقال آن به سیال عامل و کاهش افت‌های حرارتی از مهم‌ترین فاکتورها در افزایش عملکرد این سیستم‌ها هستند. استفاده از نانو سیالات بعنوان محیط‌های جذب مستقیم (حجمی) در کلکتورهای خورشیدی تحولی جدید در توسعه و ساخت این کلکتورها ایجاد کرده است [۱]. در کلکتورهای جذب مستقیم، فرآیند جذب تشعشع سطحی نیست و توسط سیالات جاذب در حجم صورت می‌گیرد. به همین دلیل در مقایسه با کلکتورهای جذب سطحی، دمای سطح بیرونی

پایینی‌آید و باعث کاهش افت‌های تشعشعی و جابجایی می‌شود. استفاده از جذب مستقیم تشعشع با سیال پایه و افزودن ذرات نانو به سیال پایه روغن و استفاده از آن به جای روغن‌های متداول طرحی بدیع است که نه تنها موجب افزایش عملکرد حرارتی و قابلیت‌های ترمودینامیکی سیستم می‌گردد، بلکه به دلیل افزایش ظرفیت حرارتی در نانو سیال بازده کلی سیستم نیز افزایش می‌یابد؛ لذا در این تحقیق هدف بر آن است که با یک هندسه متفاوت از سیال عامل به عنوان جاذب استفاده شود؛ در پایان تأثیر استفاده از نانو سیال بر عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی کلکتور در مقایسه با سیال پایه روغن حرارتی مورد بررسی و مطالعه قرار بگیرد. در کلکتورهای جذب مستقیم که تشعشع خورشید مستقیماً سیال عامل را گرم می‌کند، دمای سطح بیرونی لوله انتقال سیال کاهش می‌یابد و باعث کاهش افت‌های تشعشعی می‌شود [۲]. وی پنگ و همکاران [۳] مدل جدیدی از کلکتور خورشیدی جذب مستقیم<sup>۱</sup> ارائه شده است که در آن برای اولین بار از تله (دریچه) اشعه خورشید برای جذب هر چه بیشتر انرژی خورشیدی و در نتیجه افزایش کارایی استفاده شده است، در نهایت نتیجه‌گیری شد که استفاده از کلکتور ارائه شده نه تنها حدود ۴ درصد بازده بیشتر را نسبت به DASC معمولی به همراه دارد، همچنین می‌تواند تجمع نانو ذرات را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. کین و همکاران [۴] اثر یک پوشش جذب‌کننده در نیمه بالایی لوله انتقال را به صورت جذب مستقیم بررسی کردند، به گونه‌ای که بخش عمده‌ی تشعشع توسط سیال عامل به صورت حجمی جذب می‌شود و باقیمانده آن توسط پوشش بالایی جذب و به سیال عامل گرما را انتقال می‌داد که در این تحقیق این پوشش نیمه باعث افزایش راندمان و خروجی حرارتی در دماهای بالاتر می‌شد.

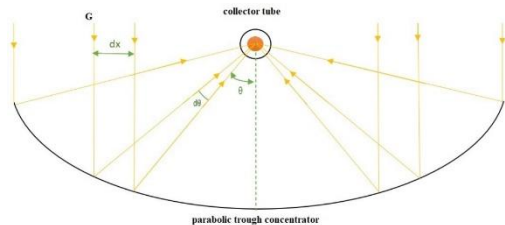
تابگی و همکاران [۵] اثر اندازه نانو ذرات را بر بازدهی کلکتور مورد بررسی قرار دادند و همچنین اثر کسر حجمی نانوذرات را بر بازدهی کلکتور صفحه تخت بررسی کردند و دریافتند که با افزایش کسر حجمی در مقادیر پایین، بازدهی به سرعت افزایش می‌یابد، اما این روند هنگامی کسر حجمی به مقادیر بیشتر از ۲٪ می‌رسد، اثر خود را روی بازدهی از دست می‌دهد. اتانیکارو همکاران [۶] دریافتند که جذب حجمی در کلکتور جذب مستقیم خورشیدی باعث دوردن دمای بیشینه

<sup>۱</sup>DATPS

با کسر حجمی ۰/۳٪ است که به میزان ۹/۳ K دما افزایش یافته است؛ اما در مقایسه با حالت سیال خالص افزایش دما در حدود ۱۵/۷ k است. بازدهی حرارتی MWCNT/EG با کسر حجمی ۰/۳٪ در مقایسه با سیال خالص به طور متوسط ۱۷٪ بیشتر شده است. منبری و همکاران [۱۱] به منظور افزایش بازدهی اپتیکی و حرارتی کلکتورهای سهموی جذب مستقیم از نانوسیال اکسید مس و آب استفاده کردند. این مطالعه هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که با فاصله گرفتن از دیواره، دمای متوسط شعاعی و ترم تولید انرژی ناشی از جذب و پراکنش کاهش می‌یابد. نتایج آن‌ها بیانگر این حقیقت است که با افزایش کسر حجمی نانوذرات و افزایش دبی، بازدهی حرارتی افزایش می‌یابد. منبری و همکاران [۱۲] به بررسی اثر نانوسیال هیبرید (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO/Water) روی عملکرد کلکتور سهموی جذب مستقیم پرداختند. آن‌ها دو نانوذره که یکی قدرت جذب بالا و دیگری قدرت پراکنش بالا دارد را با سیالات پایه متفاوت ترکیب کردند. نتایج نشان می‌دهد، بازدهی این کلکتورها نسبت به کلکتورهای بالاتر است که از یک نانوذره استفاده می‌کنند. کرمی و همکاران [۱۳] عملکرد کلکتور خورشیدی جذب مستقیم را برای کاربردهای مسکونی را با طراحی و ساخت دستگاه بر اساس استاندارد EN 12975-2 بررسی کردند و یک نمونه اولیه از این نوع کلکتور را برای کاربری آب گرم کن خانگی ساختند. آزمایش‌های مختلفی در دو حالت سطح داخلی کلکتور جاذب و بازتابنده انجام شد. بازده کلکتور با سطح داخلی جاذب حدود ۴/۱۱٪ بیشتر از حالت سطح داخلی بازتابنده در دبی ۹۰ Iph به دست آمد. آن‌ها برای بررسی عملکرد کلکتور با استفاده از نانوذرات اکسید فلزی در سیال عامل، نانوسیال اکسید مس را تهیه کرده و مشاهده کردند که با افزایش کسر حجمی نانوسیال و دبی آن، بازده کلکتور حدود ۹٪-۱۷٪ در مقایسه با سیال پایه بهبود می‌یابد. وکیلی و همکاران [۱۴] عملکرد کلکتورهای خورشیدی حجمی را که در دستگاه‌های آب گرم خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند را با استفاده از نانوسیال‌نانو صفحات گرافن بررسی کردند. نتیجه‌های آزمایش نشان داد که بازده کلکتور با افزایش کسر جرمی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج، بهترین بازده کلکتور در دبی ۰/۱۵ kg/s و برای نانوسیال و سیال پایه به دست آمده است. درصد بهبود کارایی در کسر جرمی ۰/۰۰۵ و دبی ۰/۰۱۵ kg/s

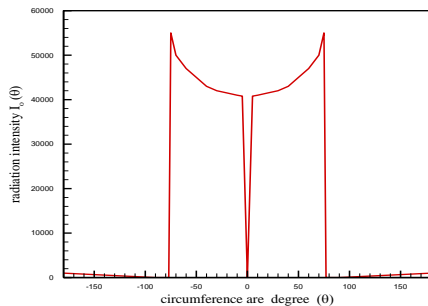
از سطح سیالی می‌شود که در واقع هر چه این ناحیه به مرکز لوله نزدیک‌تر باشد، افت کمتر می‌شود. آن‌ها به بررسی اثر ۱۳ نانوسیالات مختلف کربن، گرافیت و نقره (روی عملکرد کلکتورهای خورشیدی جذب مستقیم به صورت تجربی و عددی پرداختند. آن‌ها با مقایسه نتایج کلکتورهای جذب مستقیم با کلکتورهای رایج (جذب توسط صفحه جاذب) دریافتند که با افزودن مقدار کمی نانوذره بازدهی افزایش چشمگیری پدید می‌آید. این روند تا جایی که کسر حجمی به ۰/۵٪ برسد ادامه می‌یابد. با افزایش کسر حجمی به بیش از ۰/۵٪ میزان افزایش بازدهی کاهش می‌یابد تا جایی که در برخی موارد بازدهی کلکتور کاهش می‌یابد. پولنگری و همکاران [۷] به بررسی کلکتورهای صفحه تخت پرداختند. در این مطالعه نانوذره نقره با قطر ۲۰ nm به آب خالص با غلظت‌های ۱۰۰۰ pm و ۱۰۰۰۰ pm اضافه شده است. آن‌ها به بررسی اثرات دبی و دمای ورودی سیال پرداختند. نتایج نشان می‌دهد، ضریب انتقال حرارت در حالتی که غلظت نانو سیال ۱۰۰۰۰ pm باشد، ۲ برابر حالتی است که سیال عامل آب خالص باشد. در ادامه آن‌ها نشان دادند، هنگامی که دمای ورودی بالا باشد، بازدهی بهتر افزایش می‌یابد. تیلور و همکاران [۸] به بررسی خواص تشعشع‌ینانو ذرات گرافیت، مس، نقره، طلا و آلومینیوم در آب و ترمینول VPI به عنوان سیال عامل پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۹۵٪ از تشعشع ورودی به نانو سیال در ضخامت بیش از ۱۰ cm و کسر حجمی کمتر از ۵-۱۰ درصد، جذب می‌شود. یوسفی و همکاران [۹] به روش تجربی اثر استفاده از نانو ذرات اکسید آلومینیوم و MWCNT در سیال پایه آب را در کلکتورهای صفحه تخت بررسی کرده‌اند. نانو ذرات اکسید آلومینیوم با درصد وزنی ۰/۲ باعث افزایش راندمان در حدود ۲۸٪ شده‌اند که این مسئله با استفاده از سورفکتانت به ۱۵٪ کاهش یافته است. در مقابل، استفاده از نانوذره MWCNT با درصد وزنی ۰/۲٪ باعث کاهش راندمان شده است، اما در شرایطیکسان و استفاده از درصد وزنی ۰/۴ از همین نانو ذرات باعث افزایش بازده شده است. کسانیان و همکاران [۱۰] به بررسی روش‌های افزایش بازدهی کلکتورهای سهموی متمرکزکننده جذب مستقیم به صورت تجربی پرداختند. آن‌ها از نانوسیالات MWCNT/EG 5.2 و Silica/EG 5.2 و با کسرهای حجمی ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۳ درصد استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد، بیشترین افزایش دمای خروجی مربوط به MWCNT/EG

که  $G$  شدت تابشی پرتو ورودی خورشیدی به آینه‌کلک تور،  $p$  طول فاصله کانونی کلکتور،  $f$  ضریب بازده نوریکلکتور [۱۶، ۱۷] هست.



شکل ۱- نمودار شماتیک سطح مقطع یک کلکتور خورشیدی متمرکز سهموی.

که با استفاده از فرمول (۱) و داده‌های جدول ۲ و همچنین با فرض تشعشع ورودی ( $G=1000 \text{ W/m}^2$ ) شدت تابش ورودی بر روی لوله متمرکز مرکزی را برای بازه  $(-\pi/2, \pi/2)$  برای سطح زیرین لوله کلکتور بدست آمده و در شکل ۲ نشان داده شده است. در واقع در این شکل به خوبی اوج تمرکز و پراکنش نور را روی سطح زیرین لوله مرکزی کلکتور مشاهده می‌شود و سقوط یکباره تشعشع در حوالی زاویه صفر به دلیل شکل‌گیری سایه خود لوله روی آینه کلکتور است.



شکل ۲- شدت تابش خورشیدی به صورت متمرکز روی محیط‌دایره‌ای لوله کلکتور

### ۳- معادلات حاکم

با تعیین خواص ترموفیزیکی و تابشی سیال عامل، می‌توان به حل معادلات حاکم با استفاده از روش‌های حل عددی پرداخت. مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق، مدل ترکیبی شامل،

نسبت به سیال پایه، حدود ۲۳/۲٪ گزارش شده است. در این مقاله از یک هندسه جدید با استفاده از یک لوله جاذب مرکزی مسی در درون لوله شفاف کلکتور، علاوه بر جذب مستقیم تشعشع توسط سیال، از جذب سطحی لوله مرکزی هم استفاده شود و باعث می‌شود تلفات حرارتی به حداقل برسد.

### ۲- مدل تئوری و معادلات حاکم

در شبیه‌سازی عددی پیش رو با توجه به سرعت جریان در مقطع لوله و شرایط مسئله، جریان به صورت آشفته خواهد بود که با توجه به وجود کسر حجمی کمی نانو ذرات کربن در محیط سیال پایه از مدل  $k-\epsilon$  در نرم‌افزار انسیس فلونت ورک بنچ  $ansys$  استفاده شده است. قابل ذکر است که حل معادلات حاکم در این مدل با توجه به شرایط مسئله و مقایسه آن با داده‌های تجربی نشان از مناسب بودن این مدل حل آشفته‌گی برای این گونه مسائل دارد. ابتدا با استفاده از روش ردیابی مونت کارلو برای یک کلکتور متمرکزکننده [۱۵] و پارامترهای لیست شده در جدول ۱ (جدول پارامترهای هندسی مسئله) و شکل ۱، تشعشع خورشیدی رسیده شده به مقطع دایره‌ای لوله کلکتور را حساب می‌کنیم. ابعاد کلکتور استفاده شده از ابعاد کلکتور مدل تجاری IS-3 در منبع [۴] نمونه‌برداری شده است. این کلکتور شامل یک آینه سهموی با ابعاد  $5/76$  متر پهنا و طول  $5$  متر است که دارای لوله‌ی شفاف شیشه‌ای با ضریب عبور  $0/94$  است. دیگر پارامترهای هندسی مسئله در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای هندسی کلکتور جذب مستقیم استفاده شده در محاسبات عددی

۰/۰۷	قطر داخلی لوله شیشه‌ای
۰/۰۰۳	ضخامت شیشه
۵	طول لوله کلکتور
۵/۷۶	عرض دیافراگم متمرکز کننده‌ها
۰/۷۳	ضریب بهره‌وری نوری
۰/۹۴	ضریب عبور شیشه

برای مثال با توجه به شکل ۱ زمانی که  $\theta$  در بازه  $(-\frac{5\pi}{12}, \frac{5\pi}{12})$  می‌توان  $I_0(\theta)$  این‌گونه حساب کرد:

$$I_0(\theta) = 2fG \frac{dx}{d_1 \theta} = 4fG \frac{p}{d_1} \frac{1 - \cos \theta}{\sin^2 \theta} \quad (1)$$

معادله انرژی در جریان سه بعدی پایا، با جمله چشمه تشعشع صورت معادله زیر است:

$$\rho_m c_{pm} \left[ u_m \frac{\partial T}{\partial x} + v_m \frac{\partial T}{\partial y} + w_m \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_{eff} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \mu_m \varphi - \nabla \cdot q_r \quad (9)$$

که در آن:

$$k_{eff} = \sum a_k (k_k + k_t) \quad (10)$$

در این معادله ضریب هدایت مؤثر و  $k_t$  ضریب هدایت حرارتی آشفته است که براساس مدل آشفته‌گی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای حل معادلات نیاز به تعیین جمله  $q_r$  است. جمله  $q_r$  همان شار حرارتی تشعشعی است که با انتگرال‌گیری از جواب رابطه (۶) در زوایای فضایی و طول موج‌های مختلف محاسبه می‌شود [۱۸]:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -(k_{a\lambda} + k_{s\lambda}) I_\lambda(s) + k_{a\lambda} I_{\lambda b}(s) + \frac{k_{s\lambda}}{4} \int_{\omega_i=0}^4 I_\lambda(s, \omega_i) (\varphi, \omega_i) d\omega_i \quad (11)$$

که  $I_\lambda$  شدت طیفی تابش،  $I_{\lambda b}$  گسیل جسم سیاه است که از رابطه پلانک به دست می‌آید،  $\varphi$  تابع فاز پخش،  $\omega_i$  زاویه فضایی و  $s$  مسیر دلخواه است.  $k_{a\lambda}$  ضریب جذب طیفی و  $k_{s\lambda}$  ضریب پخش طیفی است. جمع این دو ضریب را  $k_{e\lambda}$  ضریب اطفاء طیفی را نشان می‌دهد. جمله اول سمت راست معادله فوق، میرایی تابش ناشی از جذب و پخش تابش توسط محیط، جمله دوم افزایش شدت تابش به دلیل گسیل تابش توسط محیط (در اثر بالا رفتن دمای محیط) و جمله سوم نیز، افزایش تابش در اثر پخش برخوردی توسط محیط را نشان می‌دهد. در واقع تمام مدل‌های تشعشعی از جمله مدل (ordinate DO-direction) که در این مطالعه استفاده شده برای حل این معادله تشعشع استفاده می‌شوند. در مطالعه حاضر از نرم‌افزار ANSYS برای حل معادلات جریان آشفته و از مدل k-epsilon استفاده شده است.

معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و معادله انتقال حرارت تشعشع است. در این مدل چگالی و سرعت و لزجت متوسط به‌صورت زیر بدست آمده و سپس در معادلات حاکم استفاده می‌شود:

$$V_m = \frac{\sum_{k=1}^n a_k \rho_k V_k}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n a_k \rho_k \quad (3)$$

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n a_k \mu_k \quad (4)$$

که در معادلات بالا n معرف تعداد فازها،  $V_m$  سرعت متوسط جرمی،  $\rho_m$  چگالی مخلوط،  $a_k$  کسر حجمی فاز k ام و  $\mu_m$  لزجت مخلوط است. بدین منظور معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و همچنین معادله انتقال تابش به‌صورتهم‌زمانحل شده و سپس از تعیین توزیع دمای داخل کلکتور کارایی آن پیش‌بینی می‌شود. معادله بقای جرم برای سیال تراکم ناپذیر در حالت پایایسه‌بعدی به شکل معادله (۵) است:

$$\frac{\partial u_m}{\partial x} + \frac{\partial v_m}{\partial y} + \frac{\partial w_m}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

بقای مومنتم برای جریان تراکم ناپذیر و پایای سه‌بعدی به شکل معادلات (۲)، (۳) و (۴) است:

$$\rho_m \left( u_m \frac{\partial u_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial u_m}{\partial y} + w_m \frac{\partial u_m}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_m \left( \frac{\partial^2 u_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_m}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\rho_m \left( u_m \frac{\partial v_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial v_m}{\partial y} + w_m \frac{\partial v_m}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_m \left( \frac{\partial^2 v_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_m}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho_m \left( u_m \frac{\partial w_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial w_m}{\partial y} + w_m \frac{\partial w_m}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu_m \left( \frac{\partial^2 w_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_m}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \quad (13)$$

و برای محاسبه کلکتور از رابطه زیر استفاده می شود [۲۶]:

$$\eta = \frac{\dot{m} \int_{T_0}^{T_{out}} c_p(T) dT}{LWG_T} \quad (14)$$

که در آن  $\dot{m}$  نرخ ورود جرم،  $L$  طول میله کلکتور،  $W$  پهناي کلکتور و  $G_T$  میزان تابش ورودی است باید توجه داشت که منظور از  $T_{out}$  در واقع دمای میانگین کل سطح مقطع خروجی است. با توجه به فرض ثابت بودن  $c_p$  برای بازه دمایی کاری کلکتور می توان اختلاف دمای ورودی و خروجی را به این صورت در نظر گرفت.

$$\Delta T = T_{out} - T_{in} \quad (15)$$

#### ۵- اعتبار سنجی

جهت اعتبارسنجی داده های عددی این تحقیق را با داده های تجربی آزمایشگاه ملی ساندا [۲۴] و نتایج عددی کابین کوبین و همکاران [۴] برای چندین مورد انتخاب شده با استفاده از پارامترهای یکسان (ضریب جذب  $\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}$ ) برای کلکتور با ابعاد هندسی (کلکتور تجاری LS-2 و سیال پایه (syltherm 800) در جدول ۲ آمده است. نتایج شبیه سازی فعلی به طور کلی بین نتایج تجربی و عددی قرار دارد و اختلاف نسبی آنها در محدوده ۴ درصد است که می توان نتایج تحقیق پیش رو را معتبر دانست.

#### جدول ۲- مقایسه داده های تجربی و عددی با نتایج

شبیه سازی فعلی، (T\_a دمای محیط، T\_0 دمای ورودی، دمای

خروجی، G شدت تشعشع خورشیدی

مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳	
۹۳۳	۹۶۸	۹۸۲	جی
۲۹۴	۲۹۵	۲۹۷	دمای محیط
۳۷۵	۴۲۴	۴۷۰	دمای خروج

#### ۴- شرایط مرزی

اندازه کلکتور از مدل تجاری IS-3 در منبع [۴] نمونه برداری شده است که در شکل ۳ شماتیک آن را مشاهده می کنید. نرخ تمرکز در این کلکتور  $w/D=82.3$  است؛ همچنین ضریب انتقال شیشه  $\tau_{gla}=0.94$  است، اما ضریب انتشار پرتوهای فروسرخ  $\tau_{gla}=0.86$  است و این ضرایب برای لوله شیشه ای داخلی و بیرونی یکسان است [۲۰ و ۱۹]. باید توجه داشت که در طول لوله و کلکتور هیچ گونه تغییر قطری نخواهیم داشت و شرایط را پایا در نظر می گیریم. در مطالعات قبلی و این مطالعه از ضریب پراکندگی (scattering factor) به دلیل ریز بودن نانو ذرات چشم پوشی شده است [۲۱]؛ همچنین ضریب جذب را برای سیال پایه و نانو ذرات به صورت ثابت در نظر گرفته ایم.

در این تحقیق از روغن (syltherm 800) برای سیال پایه و کربن به غلظت  $0.02 \text{ g/l}$  استفاده شده که برای این مقدار از کربن استفاده شده ضریب جذب  $24 \text{ mm}^{-1}$  را برای سیال مخلوط می توان در نظر گرفت [۲۲]؛ همچنین مشخصات کلکتور در جدول ۱ آمده است. باید توجه داشت که چون در این هندسه هم از جذب حجمی و هم از جذب سطحی برای داغ کردن سیال پایه استفاده می شود با استفاده از معادلات بیر لامبرت می توان درصد جذب نور به صورت حجمی را در لوله کلکتور بدست آورد:

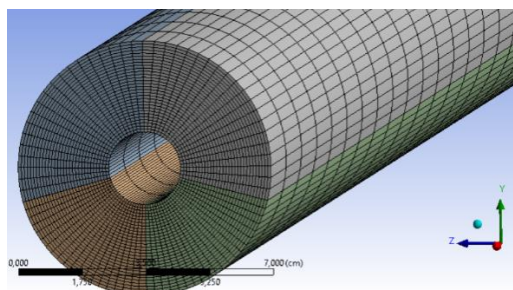
$$\text{absorbed solar radiation} = 1 - e^{-k_a D} \quad (12)$$

که در آن  $D$  قطر از لوله شیشه ای کلکتور که طول مسیر نور در آن قرار می گیرد و  $k_a$  ضریب جذب سیال عامل است. در این مطالعه نرخ جریان جرمی و روی سیال را  $0.1 \text{ kg/s}$  در نظر گرفته شده که رینولدز آن فراتر از  $2300$  است؛ در نتیجه جریان به صورت آشفته داریم و از مدل k-e استاندارد با پارامترهای  $c_{\mu} = 0.09, c_{e1} = 1.44, c_{e2} = 1.92, \sigma_k = 1, \sigma_{\epsilon} = 1.3$  استفاده شده است؛ همچنین از تابع دیوار در نزدیکی دیواره لوله به علت تأثیر ویسکوزیته غالب استفاده شده است. از آنجا که فضای بین دو لوله شیشه تخلیه است  $h_{in}$  (ضریب جابه جایی فضای بین دو شیشه) کوچک  $(h_{in} = 0.000174 \text{ w/m}^2 \cdot \text{k})$  است [۲۳]؛ بنابراین عمده اتلاف حرارت به صورت تابشی است، پس باید دمای لوله شیشه ای داخلی را در نظر گرفت.

محاسبه راندمان کلکتور:

توان مفید کلکتور از رابطه زیر بدست می آید:

و با توجه به در نظر داشتن زمان محاسبات مش شماره ۳ برای (شکل ۴) محاسبات استفاده شده است.



شکل ۴- شماتیکی از مش بندی لوله جذب کننده کلکتور سه‌موی (قطر لوله اصلی کلکتور ۷ سانتیمتر و قطر لوله مرکزی مسی ۲ سانتیمتر در این مش بندی در نظر گرفته شده است)

### ۷- بحث و نتایج

۱- اثر تغییر قطر لوله داخلی بر عدد ناسلت و تغییرات دمای خروجی در نمودار شکل ۵ سعی شده است، به گونه‌ای تفاوت یافت و خیز عدد ناسلت در طول لوله کلکتور که جریان سیال درون آن برقرار است، به نحوی نشان داده شود که قابل بررسی باشد.

با توجه به ماهیت عدد ناسلت که در واقع نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی را به انتقال حرارت رسانشی بیان می‌کند و با توجه به متفاوت بودن دمای سطح و دمای سیال در طول لوله شاهد یک افت قابل توجه در طول لوله برای هر سه نمونه کلکتور با قطر جاذب‌های مختلف هستیم و می‌توان عدد ناسلت در میانه مسیر سیال به پایین‌ترین حد خود می‌رسد، البته باید به این نکته اهمیت داد که چون ضریب جذب سیال عامل بسیار بالا است، عدد ناسلت در طول لوله و حتی در کمترین مقادیر خود همچنان از لحاظ انتقال حرارت بالا بوده و مقدار خود را در کمترین حالت این پژوهش برای مقادیر بالای ۷۰ حفظ کرده است. سپس رفته‌رفته با تقویت دمای سیال در طول لوله مشاهده می‌شود که عدد ناسلت افزایش می‌یابد، به طوری که برای کلکتور سه‌موی جذب مستقیم با لوله جاذب مرکزی ( $D=3\text{ cm}$ ) این عدد حدود ۳ درصد نسبت به لوله جاذب مرکزی ( $D=2\text{ cm}$ ) در دهانه خروجی و حدود ۱۲ درصد نسبت به لوله جاذب مرکزی ( $D=1\text{ cm}$ ) بیشتر است.

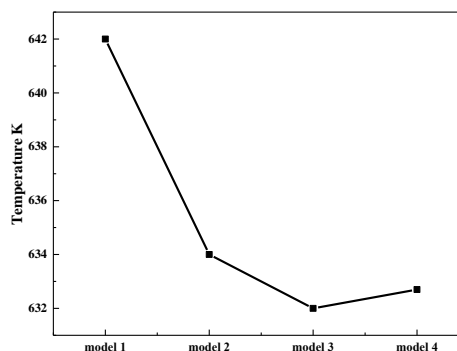
دمای خروجی (آزمایشگاهی)	۳۹۶/۸	۴۴۶/۵۵	۴۹۲/۶۵
دمای خروجی (مقاله عددی)	۳۹۷/۹	۴۴۷/۲۶	۴۹۳/۳۳
اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی	۴۰۰/۳	۴۵۰/۱	۴۹۸/۲
اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی	۴	۳	۴

### ۶- آزموذناستقلال شبکه

برای حصول اطمینان از اینکه نتایج دست آمده نسبت به مش بندی شبکه تغییر محسوسی نداشته باشد. شبکه‌های با تعداد سلول‌های مختلف در جدول ۳ و شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

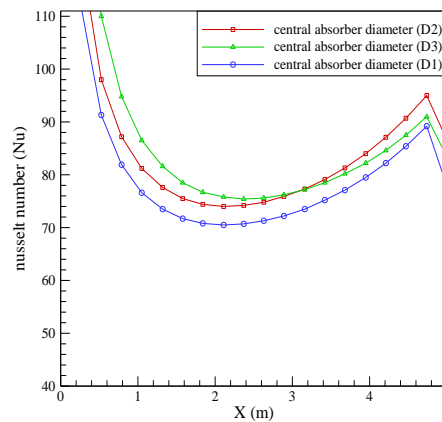
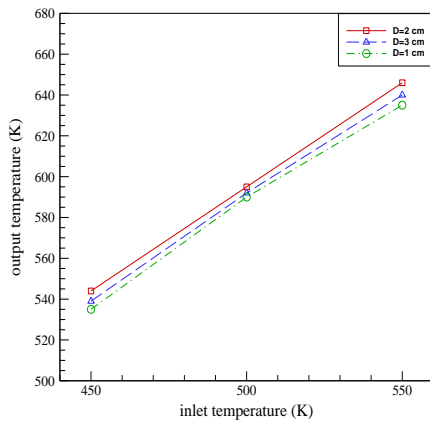
جدول ۳- نتایج حاصل از استقلال شبکه

شماره	اندازه شبکه	دمای ورودی $T_0=550\text{ k}$ و $m=0.1$ , $L=5\text{ m}$ میانگین $\text{kg/s}$ دمای خروجی
۱	۲۶۴۰۰۰	۶۴۲
۲	۳۸۴۰۰۰	۶۳۴
۳	۶۵۲۰۰۰	۶۳۲
۴	۱۱۲۲۰۰۰	۶۳۲/۷

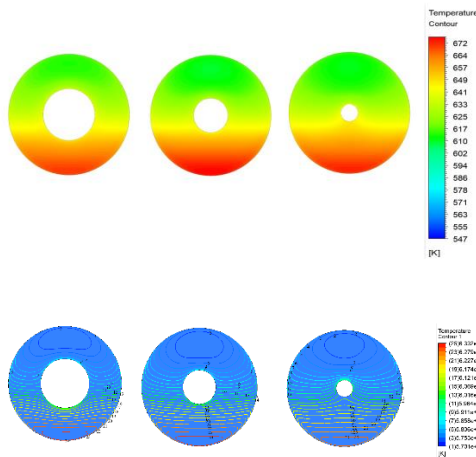


شکل ۳- نمودار استقلال مش

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش اندازه شبکه تا مش شماره ۳ اختلاف محسوسی دیده می‌شود، اما بین اندازه شبکه شماره ۳ و ۴ این اختلاف دمای خروجی کمتر از ۰/۰۲٪ بوده



شکل ۵- عدد ناسلت در طول لوله شفاف کلکتور در مقایسه با هر سه قطر ۱، ۲، ۳ سانتیمتری لوله مسی مرکزی



شکل ۶- اثر تغییر قطر لوله مرکزی بر دما و کانتور خروجی سیال با خطوط ایزوترم

۲- اثر ضریب جذب بر راندمان کلکتور و دمای خروجی در شکل ۷ و ۸ اثر ضریب جذب سیال عامل بر دمای خروجی و راندمان کلکتور برای فرضیات تعیین شده دمای ورودی  $T_0=550$  k و طول لوله  $L=5$  m و دبی جرمی ورودی  $m=0.1$  kg/s نشان داده شده است که یک مقیاس مناسب برای درک کارایی بین کلکتور خورشیدی سهموی جذب مستقیم<sup>۱</sup> جذب حجمی معمولی (transparent DATPSC) و کلکتور جذب حجمی پیشنهادی با لوله‌ی مسی در مرکز<sup>۲</sup> در این تحقیق می‌تواند باشد. همانگونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، به طور کلی برای تمامی ضرایب جذب سیال عامل

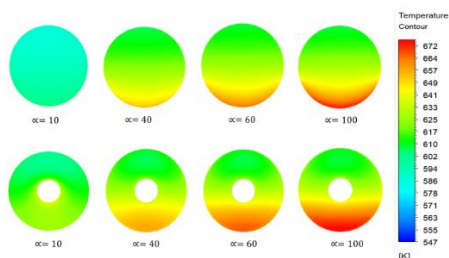
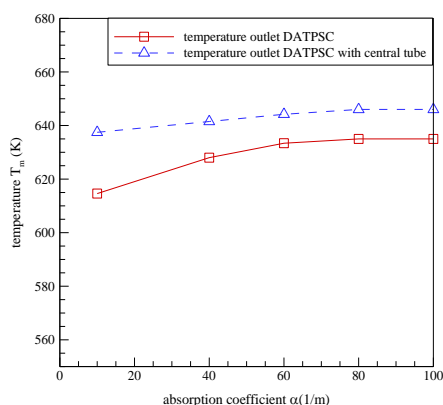
همچنین با توجه به شکل ۵ در کانتورهای دما لوله جاذب مرکزی بخشی از تشعشع ورودی را جذب کرده و با توجه به توخالی بودن لوله جاذب و خلأ نسبی دوباره گرمای جذب شده را به سیال اطرافش انتقال داده و خود این هندسه با به حداقل رساندن اتلاف حرارتی باعث افزایش دمای خروجی برای دبی جرمی کسسان  $0.1$  kg/s برای سیال عامل شده است که در کانتورهای دمای خروجی سیال (شکل ۶) به خوبی نقش لوله مرکزی مسی توخالی در جذب سطحی تشعشع قابل مشاهده است. در بین لوله‌های جاذب سه قطر (۱، ۲، ۳) سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود، جذب با قطر ۲ سانتی‌متر دارای بیشترین دمای خروجی سیال در دماهای ورودی از ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه کلوین است، همان‌گونه که در نمودار شکل ۵ ترسیم شده این مزیت در دمای ورودی ۵۵۰ درجه کلوین با اختلاف

<sup>۲</sup>DATPSC with central tube

<sup>۱</sup>DATPS

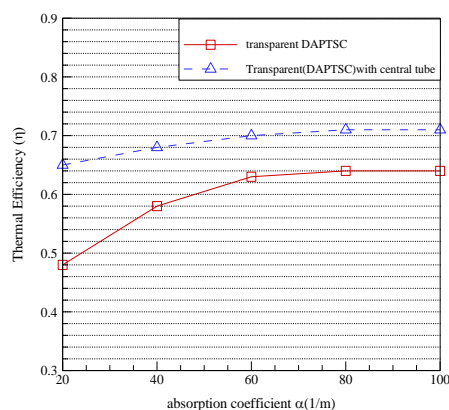


ضرایب جذب سیال عامل ۲۰ و ۴۰ است مشاهده می‌شود که دمای مقطع خروجی برای کلکتور سهموی شفاف جذب مستقیم<sup>۱</sup> معمول به صورت یکنواخت‌تر نشان داده می‌شود؛ زیرا به علت کم بودن ضریب جذب تشعشع به عمق بیشتری از سیال نفوذ کرده و همین امر باعث یکنواختی دمایی مقطع خروجی نسبت به کلکتور شفاف با لوله مرکزی مسی شده است. در مورد دمای خروجی و به تبع آن راندمان کلکتور از شکل ۸ دو نکته مشهود است؛ یکی اینکه بیشترین اختلاف دمای خروجی بین دو نمودار دو کلکتور در ضریب جذب ۱۰ حدود ۱۹ درجه کلوین است و رفته‌رفته این اختلاف کمتر می‌شود و از ضریب جذب ۸۰ به بعد ثابت می‌ماند و حدود ۱۰ درجه کلوین ثابت می‌ماند. نکته دیگر این است که در دمای خروجی کلکتور پیشنهادی دیده می‌شود که شیب نمودار در شکل ۷ حساسیت کمتری را به ضریب جذب نشان می‌دهد و شیب افزایشی کمتری داشته و از ضریب جذب ۸۰ به بعد ثابت می‌ماند.



راندمان کلکتور پیشنهادی بالاتر است؛ به طوری که در ضریب جذب ۲۰ (m/1) اختلاف راندمان ۱۶ درصد و با بالا رفتن ضریب جذب این اختلاف کمتر شده و در ضریب جذب ۱۰۰ (m/1) راندمان کلکتور (transparent DATPSC with central tube) حدود ۶ درصد بیشتر از کلکتور حجمی معمول است.

در واقع چون در غلظت‌های پایین نانوسیال کسر بیشتر از تشعشع توسط لوله مرکزی به صورت سطحی جذب می‌شود و از اتلاف حرارتی بیشتر جلوگیری می‌کند و همین امر باعث اختلاف بالای راندمان دو کلکتور در ضرایب جذب پایین‌تر از ۶۰ (m/1) می‌شود.



شکل ۷- اثر ضریب جذب سیال عامل بر راندمان کلکتور (دمای ورودی  $T_0=550$  k و  $T=5$  min  $=0.1$  kg/s)

در شکل ۸ تأثیرات ضریب جذب‌های مختلف را بر دمای خروجی کلکتور برای دمای ورودی  $T_0=550$  k و طول لوله  $L=5$  m و دبی جرمی ورودی  $m=0.1$  kg/s و ظرفیت گرمایی روغن ۱۱۴۰ j/kg.k و ظرفیت گرمایی نانوسیال کربن ۷۱۰ j/kg.k مشاهده می‌کنیم، همان‌گونه که در پروفیل‌های دمایی نیز مشخص شده دمای خروجی کلکتور پیشنهادی برای غلظت نانو سیال (۰.۲ gr/l) که ضریب جذبش ۱۰۰ (m/1) به صورت یکنواخت‌تر دما را در مقطع خروجی پخش کرده است، علت این امر این است که چون ضریب هدایت دمایی بالای لوله مسی مرکزی باعث شده بخشی از دما را به صورت سطحی به بخش بالایی مقطع خروجی برساند. البته در غلظت‌های پایین‌تر نانوسیال که

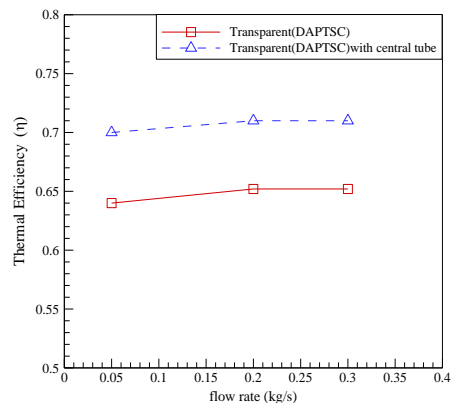
<sup>1</sup>Direct absorption transparent parabolic collector (DATPC)

شکل ۸- اثر ضریب جذب سیال عامل بر راندمان کلکتور

(دمای ورودی  $T_0=550$  k و  $T=5$  m  $\dot{m}=0.1$  kg/s)

۳- اثر نرخ جریان ورودی بر راندمان کلکتور

با توجه به میزان ثابت بودن تشعشع ورودی برای نرخ جریان ورودی باید توجه داشت که با بالا رفتن دبی جریان، دمای میانگین سیال خروجی کاهش می‌یابد و این امری بدیهی است و طبق نیاز باید دبی ورودی را مشخص کرد، ولی در مورد راندمان کلکتور چون هم پارامترهای دمایی و هم خود جریان جرم ورودی برای محاسبه‌ی آن دخیل هستند، طبق شکل ۹ مشاهده می‌شود که راندمان کلکتور تا دبی  $0.2$  kg/s افزایش یافته و بعد از آن تا دبی  $0.3$  kg/s ثابت می‌ماند و این امر می‌تواند برای به کارگیری کلکتور در زمینه اقتصادی مسئله کمک شایانی را به ما ارائه دهد. باید توجه داشت که همین نسبت هم برای کلکتورهای جذب حجمی معمول DATPS هم صادق هست.



شکل ۹- تاثیر دبی ورودی برای کلکتور جذب حجمی با لوله مرکزی و کلکتور جذب حجمی معمول (DATPS)

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از یک هندسه جدید با یک لوله مرکزی سعی شد که برای کلکتورهای جذب حجمیبه‌صورت مؤثر جذب تشعشع را هم به صورت حجمی و هم به صورت سطحی برای سیال عامل فراهم کنیم و اثرات پارامترهای ضریب جذب، دبی ورودی را بر راندمان و دمای میانگین خروجی را مورد بحث و نتیجه‌گیری قرار دهیم. مشخص شد که با این هندسه جدید می‌توان برای یک دبی ثابت دمای خروجی را حداقل ۱۳ و حداکثر تا ۱۹ درجه کلونین نسبت به کلکتورهای جذب حجمی معمول

بالا برد و این باعث می‌شود که در بیشترین ترکیب نانوسیال در (غلظت  $0.2$  gr/l) راندمان حرارتی را تا ۶ درصد نسبت به کلکتور معمول جذب مستقیم بالا ببریم؛ همچنین اثرات تغییر دبی را هم مورد بررسی قرار دادیم و مشخص شد که راندمان کلکتور تا دبی  $0.2$  kg/s افزایش یافته و بعد از آن تا دبی  $0.3$  kg/s ثابت می‌ماند. به طور کلی پیشنهاد می‌شود که اثرات نانو سیال‌های مؤثر دیگر با دماهای کاری متفاوت برای این نوع از هندسه مورد توجه و کار تحقیقاتی محققان در آینده قرار گیرد.

علائم

$C_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $J/kg.K$
$D$	قطر داخلی لوله شیشه‌ای، $cm$
$L$	طول کلکتور، $L$
$h_{in}$	ضریب انتقال حرارت جابجایی در لوله تخلیه شده، $W/(m^2.K)$
$I_o(\theta)$	شدت تابش، $W/m^2$
$T_a$	دمای محیط، $K$
$T_o$	دمای ورودی، $K$
$T_{out}$	میانگین دمای خروجی، $K$
$T_{sky}$	دمای آسمان، $K$
$\dot{m}$	نرخ جریان جرمی، $kg/s$
$k$	رسانایی گرمایی، $W/(m.K)$
$k_{eff}$	هدایت موثر، $W/(m.K)$
$k_t$	هدایت حرارتی آشفته، $W/m.K$
$\dot{Q}$	effective collector power
$\Delta T$	افزایش دما از طریق کلکتور، $K$
$\alpha$	ضریب جذب نانو سیال، انتشار،
$\varepsilon$	انتشار،
$\eta$	راندمان حرارتی کلکتور
$\mu_m$	ویسکوزیته ترکیبی، $(N.s)/m^2$
$\rho_m$	چگالی ترکیبی، $kg/m^3$
$\tau_{gla}$	قابلیت انتقال شیشه
زیروند	
$m$	مقدار میانگین
$k$	عدد فاض

۹- مراجع

- [13] Karami, M., Akhavan-Bahabadi, M., Delfani, S., Raisee, M. J. R., & Reviews, S. E. (2015). Experimental investigation of CuO nanofluid-based direct absorption solar collector for residential applications. 52, 793-801.
- [14] Vakili, M., Hosseinalipour, S., Delfani, S., Khosrojerdi, S., & Karami, M. J. S. E. (2016). Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems. 131, 119-130.
- [20] Qin, C., Kim, J. B., & Lee, B. J. J. R. E. (2019). Performance analysis of a direct-absorption parabolic-trough solar collector using plasmonic nanofluids. 143, 24-33.
- [15] Jeter, S. M. J. S. E. (1986). Calculation of the concentrated flux density distribution in parabolic trough collectors by a semifinite formulation. 37(5), 335-345.
- [16] Forristall, R. (2003). Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver. Retrieved from
- [17] Kalogirou, S. A. J. E. (2012). A detailed thermal model of a parabolic trough collector receiver. 48(1), 298-306.
- [18] Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., Taylor, R. A. J. J. o. r., & energy, s. (2010). Nanofluid-based direct absorption solar collector. 2(3).
- [20] Qin, C., Kim, J. B., & Lee, B. J. J. R. E. (2019). Performance analysis of a direct-absorption parabolic-trough solar collector using plasmonic nanofluids. 143, 24-33.
- [19] O'Keefe, G., Mitchell, S., Myers, T., Cregan, V. J. I. J. o. H., & Transfer, M. (2018). Modelling the efficiency of a low-profile nanofluid-based direct absorption parabolic trough solar collector. 126, 613-624.
- [1] Yılmaz, İ. H., & Mwesigye, A. J. A. e. (2018). Modeling, simulation and performance analysis of parabolic trough solar collectors: A comprehensive review. 225, 135-174..
- [2] Arai, N., Itaya, Y., & Hasatani, M. J. S. E. (1984). Development of a "volume heat-trap" type solar collector using a fine-particle semitransparent liquid suspension (FPSS) as a heat vehicle and heat storage medium Unsteady, one-dimensional heat transfer in a horizontal FPSS layer heated by thermal radiation. 32(1), 49-56.
- [3] Peng, W., Sadaghiani, O. K. J. T. S., & Progress, E. (2020). Using a sunrays trap in direct-absorption solar collector (DASC) to enhance the thermal efficiency of collector. 20, 100740.
- [4] Qin, C., Kim, J. B., & Lee, B. J. J. R. E. (2019). Performance analysis of a direct-absorption parabolic-trough solar collector using plasmonic nanofluids. 143, 24-33.
- [5] Tyagi, H., Phelan, P., & Prasher, R. (2009). Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector.
- [6] Otanicar, T. P., Phelan, P. E., Prasher, R. S., Rosengarten, G., Taylor, R. A. J. J. o. r., & energy, s. (2010). Nanofluid-based direct absorption solar collector. 2(3).
- [7] Polvongsri, S., & Kiatsirirot, T. J. H. t. e. (2014). Performance analysis of flat-plate solar collector having silver nanofluid as a working fluid. 35(13), 1183-1191.
- [8] Otanicar, T. P., Phelan, P. E., & Golden, J. S. J. S. E. (2009). Optical properties of liquids for direct absorption solar thermal energy systems. 83(7), 969-977..
- [9] Yousefi, T., Veisy, F., Shojaeizadeh, E., Zinadini, S. J. E. t., & science, f. (2012). An experimental investigation on the effect of MWCNT-H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. 39, 207-212.
- [10] Kasaeian, A., Daneshazarian, R., Rezaei, R., Pourfayaz, F., & Kasaeian, G. J. J. o. C. P. (2017). Experimental investigation on the thermal behavior of nanofluid direct absorption in a trough collector. 158, 276-284.
- [11] Menbari, A., & Alemrajabi, A. A. J. O. M. (2016). Analytical modeling and experimental investigation on optical properties of new class of nanofluids (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CuO binary nanofluids) for direct absorption solar thermal energy. 52, 116-125.
- [12] Menbari, A., Alemrajabi, A. A., Rezaei, A. J. E. T., & Science, F. (2017). Experimental investigation of thermal performance for direct absorption solar parabolic trough collector (DASPTC) based on binary nanofluids. 80, 218-227.

- [20] Joseph, A., Sreekumar, S., & Thomas, S. J. R. E. (2020). Energy and exergy analysis of SiO<sub>2</sub>/Ag-CuO plasmonic nanofluid on direct absorption parabolic solar collector. 162, 1655-1664.
- [21] Bortolato, M., Dugaria, S., Agresti, F., Barison, S., Fedele, L., Sani, E., . . . management. (2017). Investigation of a single wall carbon nanohorn-based nanofluid in a full-scale direct absorption parabolic trough solar collector. 150, 693-703.
- [22] Xu, G., Chen, W., Deng, S., Zhang, X., & Zhao, S. J. N. (2015). Performance evaluation of a nanofluid-based direct absorption solar collector with parabolic trough concentrator. 5(4), 2131-2147.
- [23] Forristall, R. (2003). Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver. Retrieved from
- [24] Dudley, V. E., Kolb, G. J., Mahoney, A. R., Mancini, T. R., Matthews, C. W., Sloan, M., & Kearney, D. (1994). Test results: SEGS LS-2 solar collector. Retrieved from