



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^۱، محمد افتخاری یزدی^{۲*}، آرش میر عبداله لواسانی^۳

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد تهران مرکز، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد تهران مرکز، 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 به 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 پیش می‌آید. 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 Amraee¹, Mohammad Eftekhari Yazdi^{2,*}, Arash Mirabdollah Lavasani³

¹ PhD student, Department of Mechanical Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

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

³ 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.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۱۳۳۱۶۵۶؛ فکس: -

آدرس پست الکترونیک: moh.eftekhari_yazdi@iauctb.ac.ir

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؛ ولی نگرانی‌های 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 زمین‌گرایی، انرژی خورشید به دلیل پاک بودن و قابلیت تأمین 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، فناوری مؤثر برای تولید انرژی گرمایی و برق به‌منظور 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 پایین

می‌آید 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 به‌جای روغن‌های متداول طرحی بدیع است که نه‌تنها 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 به‌عنوان جاذب استفاده شود و 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^۱ 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 به‌صورت جذب مستقیم بررسی کردند، به‌گونه‌ای که بخش عمده‌ی تشعشع توسط سیال عامل به‌صورت 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.

تایگی و همکاران [۵] اثر اندازه نانو ذرات را بر بازدهی کلکتور مورد بررسی قرار دادند و همچنین اثر کسر حجمی نانو ذرات 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. اتانیکار و همکاران [۶] دریافتند که جذب حجمی در کلکتور جذب مستقیم خورشیدی باعث دور شدن دمای بیشینه از

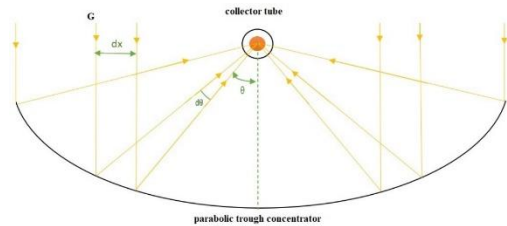
^۱ DATPS

خروجی مربوط به MWCNT/EG 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 نانو ذرات و افزایش دبی، بازدهی حرارتی افزایش می‌یابد. منبری و همکاران [۱۲] به بررسی اثر نانوسیال هیبرید (Al₂O₃+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. آزمایش با دبی‌های 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 نانو ذرات 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 نانوسیال نانو 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 برای نانوسیال و سیال پایه به دست آمده است. درصد بهبود کارایی در کسر

سطح سیال می‌شود که در واقع هر چه این ناحیه به مرکز لوله نزدیک‌تر باشد، افت کمتر می‌شود. آن‌ها به بررسی اثر ۱۳ نانو سیالات 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 پیدا می‌کند. 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 تشعشعی نانو ذرات گرافیت، مس، نقره، طلا و آلومینیوم در آب و ترمینول VP1 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 شرایط یکسان و استفاده از درصد وزنی ۰/۴ از همین نانو ذرات باعث افزایش بازده شده است. کسائی و همکاران [۱۰] به بررسی روش‌های افزایش بازدهی کلکتورهای سهموی متمرکزکننده جذب مستقیم به صورت تجربی پرداختند. آن‌ها از نانوسیالات MWCNT/EG 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

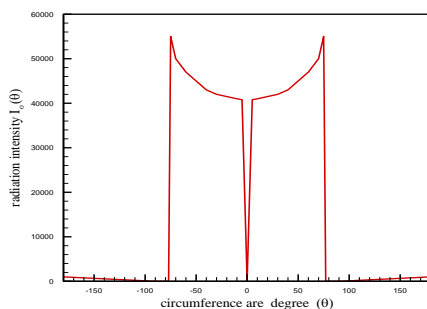
$$I_0(\theta) = 2fG \frac{dx}{d_1\theta} = 4fG \frac{p}{d_1} \frac{1 - \cos\theta}{\sin^2\theta} \quad (1)$$

که G شدت تابشی پرتو ورودی خورشیدی به آینه کلک تور، p طول فاصله کانونی کلکتور، f ضریب بازده نوری کلکتور [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 $(-\pi/5, \pi/5)$ 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 شکل گیری سایه خود لوله روی آینه کلکتور است.



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

۳- معادلات حاکم

با تعیین خواص ترموفیزیکی و تابشی سیال عامل، می‌توان به

جرمی 0.005 و دبی 0.15 kg/s نسبت به سیال پایه، حدود $23/2\%$ 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 آشفتنه 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 آشفتگی برای این‌گونه 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 | |
|-----------------------------|------------------------------|
| 0.07 | قطر داخلی لوله شیشه‌ای |
| 0.003 | ضخامت شیشه |
| 5 | طول لوله کلکتور |
| $5/76$ | عرض دیافراگم متمرکز کننده‌ها |
| 0.73 | ضریب بهره‌وری نوری |
| 0.94 | ضریب عبور شیشه |

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

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

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

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

که در آن:

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

در این معادله k_{eff} ضریب هدایت مؤثر و k_t ضریب هدایت حرارتی آشفته است که بر اساس 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_λ شدت طیفی تاش، $I_{\lambda b}$ گسیل جسم سیاه است که از رابطه پلانک به دست می‌آید، φ تابع فاز پخش، ω_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_{λ} 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

حل معادلات حاکم با استفاده از روش‌های حل عددی پرداخت. مدل عددی مورد استفاده در این تحقیق، مدل ترکیبی شامل، معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و معادله انتقال حرارت تشعشع است. در این مدل چگالی و سرعت و لزجت متوسط به صورت 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، ρ_m چگالی مخلوط، a_k کسر حجمی فاز k ام و μ_m لزجت مخلوط است. بدین منظور معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و همچنین معادله انتقال تابش به صورت هم‌زمان حل شده و سپس از تعیین توزیع دمای داخل کلکتور کارایی آن پیش‌بینی می‌شود. معادله بقای جرم برای سیال تراکم ناپذیر در حالت پایا سه‌بعدی 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 پایا سه‌بعدی به شکل معادلات (۲)، (۳) و (۴) است:

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

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

$$\rho_m \left(u_m \frac{\partial w_m}{\partial x} + v_m \frac{\partial w_m}{\partial y} + w_m \frac{\partial w_m}{\partial z} \right) \quad (8)$$

حرارت به صورت تابشی است، پس باید دمای لوله شیشه‌ای داخلی را در نظر گرفت.

محاسبه راندمان کلکتور:

توان مفید کلکتور از رابطه زیر بدست می‌آید:

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

و برای محاسبه کلکتور از رابطه زیر استفاده می‌شود [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 پهنای 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 می‌توان اختلاف دمای ورودی و خروجی را به این صورت در نظر گرفت.

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

۵- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی داده‌های عددی این تحقیق را با داده‌های 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 $0.50 \text{ kg/s}, (1/m)$) برای کلکتور با ابعاد هندسی (کلکتور تجاری LS-2 و سیال پایه (syltherm 800) در جدول ۲ آمده است. نتایج شبیه‌سازی فعلی به‌طور کلی بین نتایج تجربی و عددی قرار دارد و اختلاف نسبی آن‌ها در محدوده ۴ درصد است که می‌توان نتایج تحقیق پیش رو را معتبر دانست.

ANSYS برای حل معادلات جریان آشفته و از مدل k-epsilon استفاده شده است.

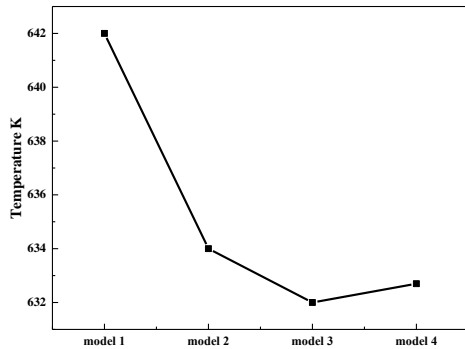
۴- شرایط مرزی

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

در این تحقیق از روغن (syltherm 800) برای سیال پایه و کربن به غلظت 0.02 g/l استفاده شده که برای این مقدار از کربن استفاده شده ضریب جذب 24 mm^{-1} را برای سیال مخلوط می‌توان 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 می‌شود با استفاده از معادلات بیر لامبرت می‌توان درصد جذب نور به صورت حجمی را در لوله کلکتور بدست آورد:

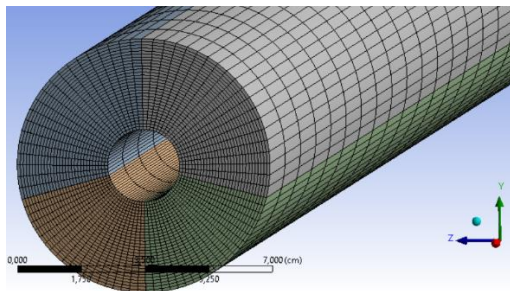
$$\text{absorbed solar radiation} = 1 - e^{-k_a D} \quad (12)$$

که در آن D قطر از لوله شیشه‌ای کلکتور که طول مسیر نور در آن قرار می‌گیرد و k_a ضریب جذب سیال عامل است. در این مطالعه نرخ جریان جرمی و روی سیال را 0.1 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 $\sigma_k = 1, c_{e1} = 1.44, c_{e2} = 1.92, c_\mu = 0.09$ استفاده شده است؛ همچنین از تابع دیوار در نزدیکی دیواره لوله به علت تأثیر ویسکوزیته غالب استفاده شده است. از آنجا که فضای بین دولوله شیشه تخلیه است h_{in} (ضریب جابه‌جایی فضای بین دو شیشه) کوچک $(h_{in} = 0.000174 \text{ w/m}^2.k)$ است [۲۳]؛ بنابراین عمده اتلاف



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 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 جذب‌کننده 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 و افت 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

جدول ۲- مقایسه داده‌های تجربی و عددی با نتایج شبیه‌سازی فعلی (T_a دمای محیط، T₀ دمای ورودی، دمای خروجی، G شدت تشعشع خورشیدی)

| مدل ۱ | مدل ۲ | مدل ۳ | جی |
|-------|--------|--------|------------------------------------|
| ۹۳۳ | ۹۶۸ | ۹۸۲ | دمای محیط |
| ۲۹۴ | ۲۹۵ | ۲۹۷ | دمای خروج |
| ۳۷۵ | ۴۲۴ | ۴۷۰ | دمای خروج (آزمایشگاهی) |
| ۳۹۶/۸ | ۴۴۶/۵۵ | ۴۹۲/۶۵ | دمای خروج (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 | |

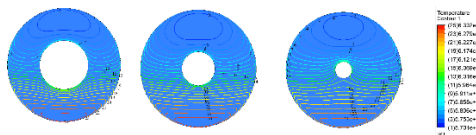
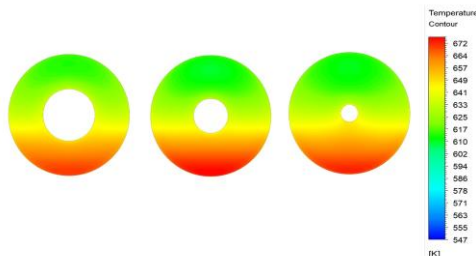
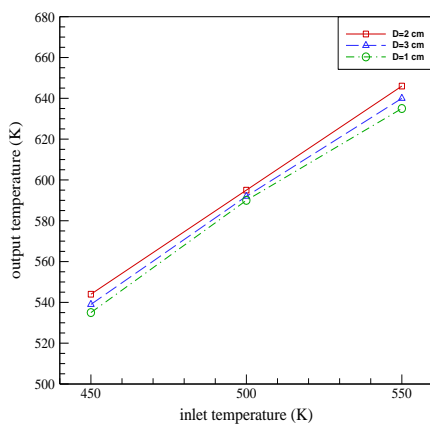
۶- آزمودن استقلال شبکه

برای حصول اطمینان از اینکه نتایج به 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 و T ₀ =550 k m=0.1, L=5m kg/s میانگین دمای خروجی) |
|-------|-------------|---|
| ۱ | ۲۶۴۰۰۰ | ۶۴۲ |
| ۲ | ۳۸۴۰۰۰ | ۶۳۴ |
| ۳ | ۶۵۲۰۰۰ | ۶۳۲ |
| ۴ | ۱۱۲۲۰۰۰ | ۶۳۲/۷ |

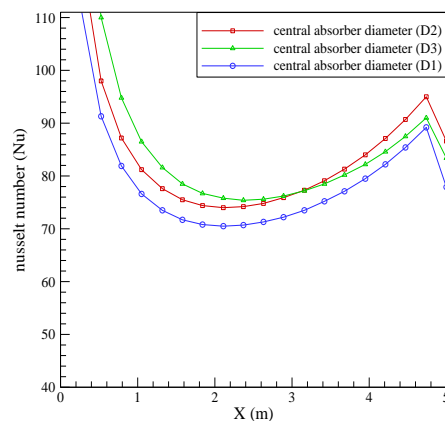
کانتورهای دمای خروجی سیال (شکل ۶) به خوبی نقش لوله مرکزی مسی توخالی در جذب سطحی تشعشع قابل مشاهده است. در بین لوله‌های جاذب سه قطر (۱،۲،۳) سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود، جاذب با قطر ۲ سانتی‌متر دارای بیشترین دمای خروجی سیال در دماهای ورودی از ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه کلوین است، همان‌گونه که در نمودار شکل ۵ ترسیم شده این مزیت در دمای ورودی ۵۵۰ درجه کلوین با اختلاف



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

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 میزان 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.

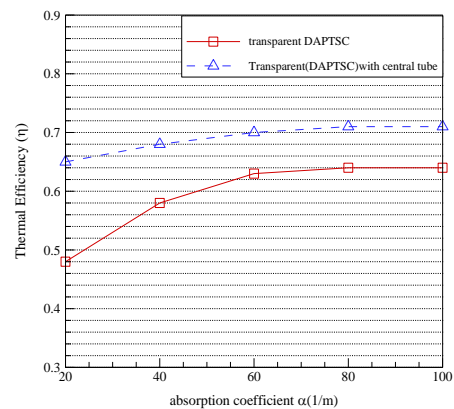


شکل ۵- عدد ناسلت در طول لوله شفاف کلکتور در مقایسه با هر سه قطر ۱،۲،۳ سانتیمتری لوله مسی مرکزی

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 یکسان 0.1 kg/s برای سیال عامل شده است که در

در شکل ۷ و ۸ اثر ضریب جذب سیال عامل بر دمای خروجی و راندمان کلکتور برای فرضیات تعیین شده دمای ورودی و $T_0=550\text{ k}$ و طول لوله $L=5\text{ m}$ و دبی جرمی ورودی $\dot{m}=0.1\text{ kg/s}$ و ظرفیت گرمایی 1140 J/kg.k و ظرفیت گرمایی نانوسیال کربن 710 J/kg.k مشاهده می‌کنیم، همان‌گونه که در پروفیل‌های دمایی نیز مشخص شده دمای خروجی کلکتور پیشنهادی برای غلظت نانو سیال (0.2 gr/l) که ضریب جذبش 100 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 ضرایب جذب سیال عامل 20 و 40 است مشاهده می‌شود که دمای مقطع خروجی برای کلکتور سهموی شفاف جذب مستقیم^۳ 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 10 حدود 19 درجه کلوین است و رفته‌رفته این اختلاف کمتر می‌شود و از ضریب جذب 80 به بعد ثابت می‌ماند و حدود 10 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 80 به بعد ثابت می‌ماند.

در شکل ۷ و ۸ اثر ضریب جذب سیال عامل بر دمای خروجی و راندمان کلکتور برای فرضیات تعیین شده دمای ورودی و $T_0=550\text{ k}$ و طول لوله $L=5\text{ m}$ و دبی جرمی ورودی $\dot{m}=0.1\text{ kg/s}$ نشان داده شده است که یک مقیاس مناسب برای درک کارایی بین کلکتور خورشیدی سهموی جذب مستقیم^۱ جذب حجمی معمولی (transparent DATPSC) و کلکتور جذب حجمی پیشنهادی با لوله‌ی مسی در مرکز^۲ در این تحقیق می‌تواند باشد. همان‌گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، به طور کلی برای تمامی ضرایب جذب سیال عامل راندمان کلکتور پیشنهادی بالاتر است؛ به طوری که در ضریب جذب $20\text{ (m}^{-1}\text{)}$ اختلاف راندمان 16 درصد و با بالا رفتن ضریب جذب این اختلاف کمتر شده و در ضریب جذب $100\text{ (m}^{-1}\text{)}$ راندمان کلکتور (transparent DATPSC with central tube) حدود 6 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 $60\text{ (m}^{-1}\text{)}$ می‌شود.



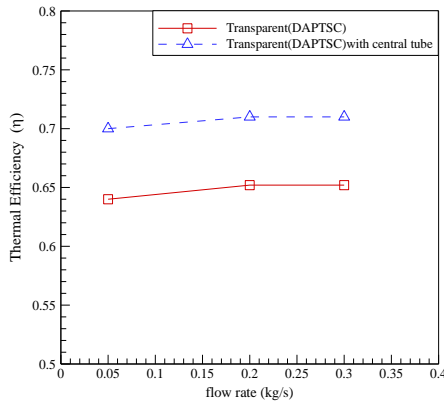
شکل ۷- اثر ضریب جذب سیال عامل بر راندمان کلکتور (دمای ورودی $T_0=550\text{ k}$ و $\dot{m}=0.1\text{ kg/s}$ و $L=5\text{ m}$)

در شکل ۸ تأثیرات ضریب جذب‌های مختلف را بر دمای خروجی کلکتور برای دمای ورودی $T_0=550\text{ k}$ و طول لوله

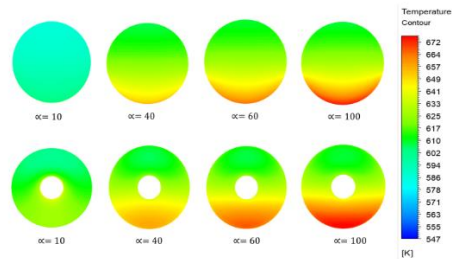
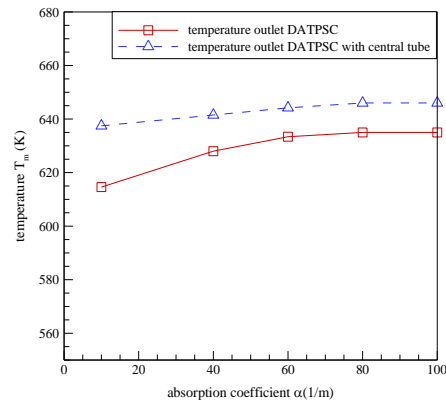
³ Direct absorcion transparent parabolic collector (DATPC)

¹ DATPS

² DATPSC with central tube



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



شکل ۸- اثر ضریب جذب سیال عامل بر راندمان کلکتور (دمای ورودی و $T_0=550\text{ k}$ و $T=5\text{ m m}=0.1\text{ kg/s}$)

۸- نتیجه گیری
 در این مقاله، با استفاده از یک هندسه جدید با یک لوله مرکزی سعی شد که برای کلکتورهای جذب حجمی به صورت 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 نتیجه گیری قرار دهیم. مشخص شد که با این هندسه جدید می توان برای یک دبی ثابت دمای خروجی را حداقل ۱۳ و حداکثر تا ۱۹ درجه کلون نسبت به کلکتورهای جذب حجمی معمول بالا برد و این باعث می شود که در بیشترین ترکیب نانو سیال 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 می ماند. به طور کلی پیشنهاد می شود که اثرات نانو سیال های 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 شیشه ای، cm
- L طول کلکتور، L

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 می یابد 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 محاسبه آن دخیل هستند، طبق شکل ۹ مشاهده می شود که راندمان کلکتور تا دبی 0.2 kg/s افزایش یافته و بعد از آن تا دبی 0.3 kg/s ثابت می ماند و این امر می تواند 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.

- [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., & Kiatsiriroat, 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-H₂O 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 (Al₂O₃-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.
- [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.
- ضریب انتقال حرارت جابجایی در لوله تخلیه شده، $W/(m^2.K)$ h_{in}
- شدت تابش، W/m^2 $I_o(\theta)$
- دمای محیط، K T_a
- دمای ورودی، K T_o
- میانگین دمای خروجی، K T_{out}
- دمای آسمان، K T_{sky}
- نرخ جریان جرمی، kg/s \dot{m}
- رسانایی گرمایی، $W/(m.K)$ k
- هدایت موثر، $W/(m.K)$ k_{eff}
- هدایت حرارتی آشفته، $W/m.K$ k_t
- effective collector power \dot{Q}
- افزایش دما از طریق کلکتور، K ΔT
- ضریب جذب نانو سیال، α
- انتشار، ε
- راندمان حرارتی کلکتور η
- ویسکوزیته ترکیبی، $(N.s)/m^2$ μ_m
- چگالی ترکیبی، kg/m^3 ρ_m
- قابلیت انتقال شیشه τ_{gla}
- مقدار میانگین m
- عدد فز k

۹- مراجع

- [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.

- [20] Joseph, A., Sreekumar, S., & Thomas, S. J. R. E. (2020). Energy and exergy analysis of SiO₂/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
- [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'Keeffe, 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.