



Numerical Study of Nanofluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Linear Parabolic Trough Solar Collector

Reza Babaei Spouei¹ , Reza Naseri^{2*}

¹PhD, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 09.06.2021

Revised: 11.12.2021

Accepted: 12.20.2021

Keyword:

Linear parabolic trough solar collector

Nanofluid

Soltrace

Ansys fluent

Heat transfer coefficient

***Corresponding Author:**

Reza Naseri

Email: rnaseri@tvu.ac.ir

ABSTRACT

In the present study, the performance of nanofluid flow in a Linear Parabolic Trough Solar Collector was simulated and studied. The flow is considered three-dimensional, turbulent and incompressible. Flow modeling is a combination of Monte Carlo Ray Tracing (MCRT) and numerical simulation which was implemented by Soltrace and Ansys Fluent software, respectively. The radiative flux reflected from reflector on the absorber tube was calculated by Soltrace software and introduced to Ansys Fluent by UDF code. Thermophysical properties including density, specific heat, thermal conductivity and viscosity were considered as a function of temperature. It was observed that in Reynolds 1000 number and in two volume fractions of 2 and 5 percent, the enhancement of heat transfer coefficients were respectively 3 and 11 percent for Al₂O₃, 7 and 15 percent for copper powder (Cu), and 7 and 42 percent for silver powder (Ag). In Reynolds number 15,000, increases of 8 and 33 for Al₂O₃, 9 and 29% for copper powder (Cu), and 8 and 25% for silver powder (Ag) were respectively observed. The results showed that at a constant Reynolds number, the heat transfer coefficient increased with increased nanofluid volume. It was also observed that the performance of silver powder (Ag) nanoparticles at low Reynolds numbers was better than other nanoparticles, but it decreased with increasing Reynolds number. Unlike silver powder (Ag), the performance of Al₂O₃ at low Reynolds number was insufficient, but improved with increasing Reynolds number.



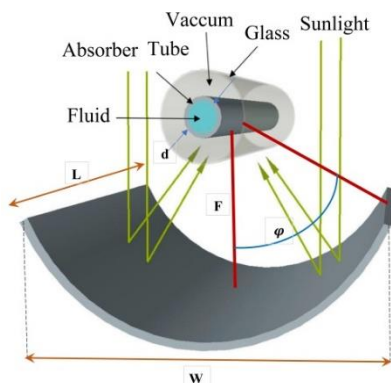
EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Using Linear Parabolic Trough Solar Collector is one method of producing electric power by solar energy. In this collector, the radiative flux reflected from reflector is concentrated on the absorber tube, which is placed at the focal point. It causes an increase in the temperature of the working fluid (usually liquid oil) [1]. In the current research, a comprehensive and integrated work including the Monte Carlo method, numerical solution, variable properties and Nanofluid was carried out, which is rarely found in past research. The combined method includes Monte Carlo statistical method and numerical method in Ansys Fluent software. In addition, the properties of the base fluid and nanoparticles are introduced as a function of temperature. The nanoparticles used in this work are aluminum oxide (Al_2O_3), copper powder (Cu), and silver powder (Ag).

Methodology

In this article, the performance of a Linear Parabolic Trough Solar Collector with Syltherm 800 base fluid (liquid oil) in the presence of aluminum oxide (Al_2O_3), copper powder (Cu), and silver powder (Ag) nanoparticles in different volume fractions was investigated. Geometrical specification including the reflector (length, width, focal length and solar reflection coefficient) and the receiver including the absorber tube and the glass tube (diameter, absorption coefficient and transmission coefficient) are presented in Figure 1.



Reflector	Length	5.0(m)
	Width	7.8(m)
	Focal Length	1.84(m)
	Reflection Coefficient	0.93
Absorber Tube	diameter	0.07(m)
	Absorption Coefficient	0.96
	Transmission Coefficient	0.95

Figure 1. Geometrical specification of Linear Parabolic Trough Solar Collector

First, the geometry of the linear parabolic collector was introduced to the Soltrace software, and the amount of radiative flux reflected from the reflector on the absorber tube calculated via this software. Soltrace software uses the Monte Carlo method (MCRT) to determine the heat flux distribution. Then, drawing and meshing of the geometry of the absorber or receiver tube was carried out by Gambit 4.3.2 software. Then, for hydrodynamic-thermal simulation, the geometry was introduced to Ansys Fluent 15 software. In Ansys Fluent software, two programs in C language (UDF) were written to introduce the properties of the base fluid (liquid oil) and Nanofluid as a function of temperature and also to introduce the variable heat flux on the absorber tube. SIMPLE

velocity-pressure correction algorithm and 3rd degree discretization (QUICK) were used for analysis. The residual value for equations 10^{-5} and the time step was 0.05 seconds. RNG k-epsilon model was used in Ansys Fluent software to model the flow turbulence.

Results and discussion

The validation of simulation results with data reported by Wu et al. [2] is presented in Table 1. There is good agreement between simulations and data by Wu et al. [2]. It was observed that the error values are within an acceptable range.

Table 1. Validation of simulation results with Wu et al. [2]

Error (%)	Tout (K) [This work]	Tout [2]	Tin (K)	m(kg/s)	DNI (W/m ²)
0.6	399	397	375	0.63	933
0.56	448.5	446	424	0.67	968
0.35	493.5	492	471	0.64	972

Figure 2 illustrates the contour of temperature and velocity at the outlet of the absorber tube for radiative flux 933 W/m². The minimum and maximum temperatures are shown to be 393 and 525 K, respectively. It was observed that the maximum value of the velocity did not occur in the center of the pipe, but rather in the lower half of the pipe. The reason for that was the variability of thermophysical properties as a function of temperature.

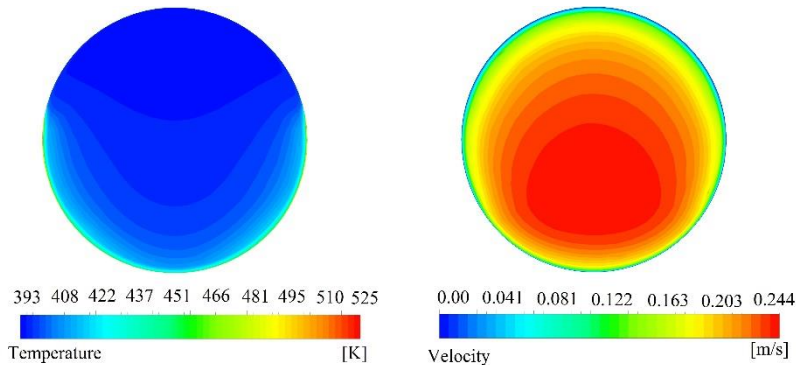


Figure 2. Contour of temperature and velocity at outlet of the absorber tube

In this section, the effect of aluminum oxide (Al_2O_3), copper powder (Cu), and silver powder (Ag) Nanofluids in the base fluid at volume fractions of 0, 2 and 5% and Reynolds numbers of 1000, 1500, 3000, 5000, 7500 and 15000 are investigated. Figure 3 shows the increase of the heat transfer coefficient as a function of the type and volume fraction of the nanoparticle compared to the base state (without Nanofluid). It was observed that at a Reynolds number of 1000 and at two volume fractions of 2 and 5%, the increase in heat transfer coefficient for Al_2O_3 is 3 and 11%, for Cu is 7 and 15%, and for Ag is 7 and 42%. At Reynolds number 15000, Al_2O_3 showed an increase of 8 and 33%, Cu showed an increase of 9 and 29%, and for Ag an increase of 8 and 25% was observed.

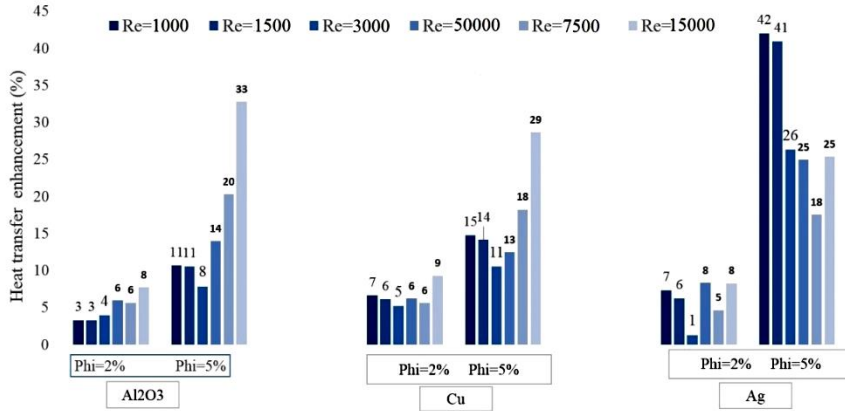


Figure 3. Increase in heat transfer coefficient compared to the base fluid for different nanoparticles

Conclusion

The findings demonstrated that at a constant Reynolds number, the heat transfer coefficient increased with an increase in the volume fraction of the Nanofluid, and with an increase in the Reynolds number, the effect of the volume fraction of the Nanofluid also increased. The performance of Ag nanoparticle at low Reynolds numbers was better than other nanoparticles and its performance decreased with the increase of the Reynolds number. Unlike Ag, the performance of Al₂O₃ was not favorable at a low Reynolds number, but its performance improved by increasing the Reynolds number. Finally, the best choice for the value of the heat transfer coefficient in low and high Reynolds numbers were Ag and Al₂O₃, respectively.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



بررسی عددی مشخصه‌های جریان نانوسیال و انتقال حرارت در یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی

رضا بابائی اسپوئی^۱، رضا ناصری^{۲*}

- ۱- دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

در پژوهش حاضر رفتار و عملکرد جریان نانوسیال در یک کلکتور خورشیدی سهموی (پارابولیک) خطی، شبیه‌سازی و مطالعه شده است. جریان به صورت سه‌بعدی، آشفته و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی جریان به صورت ترکیبی از روش مونت کارلو (MCRT) و شبیه‌سازی عددی بود که به ترتیب توسط نرم‌افزارهای soltrace و انسیس فلونت اجرا گردید. شار تابشی بازتابیده شده از آینه بر روی لوله جاذب توسط نرم‌افزار soltrace محاسبه شد و توسط کد UDF به انسیس فلونت معرفی گردید. خواص ترموفیزیکی شامل دانسیته، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت، تابعی از دما در نظر گرفته شد. مشاهده شد که در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و در دو کسر حجمی ۲ و ۵ درصد میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای اکسید آلومینیوم به ترتیب ۳ و ۱۱ درصد، برای پودر مس ۷ و ۱۵ درصد و پودر نقره ۷ و ۴۲ درصد است. در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ به ترتیب اکسید آلومینیوم ۸ و ۳۳ درصد، پودر مس ۹ و ۲۹ درصد و پودر نقره ۸ و ۲۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که با ثابت ماندن عدد رینولدز، میزان ضریب انتقال حرارت با افزایش مقدار حجمی نانوسیال، افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که عملکرد نانوذره پودر نقره در اعداد رینولدز پایین، بهتر از دیگر نانوذرات بود و با افزایش عدد رینولدز از میزان عملکرد آن کاسته می‌شود. عملکرد اکسید آلومینیوم برخلاف پودر نقره در عدد رینولدز کم مطلوب نمی‌باشد ولی با افزایش عدد رینولدز، عملکرد آن بهبود می‌یابد.

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

کلید واژگان:

کلکتور سهموی خطی
نانوسیال
Soltrace
انسیس فلونت
ضریب انتقال حرارت

*نویسنده مسئول: رضا ناصری

پست الکترونیکی:

rnaseri@tvu.ac.ir



مقدمه

منابع تجدیدپذیر مانند سوخت‌های فسیلی علاوه بر رو به پایان بودن، سبب آلودگی‌های زیان‌بار زیست‌محیطی نیز می‌شود [۱]. در سال‌های اخیر، تمایل بشر به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر (انرژی‌های نو)^۱ شامل انرژی خورشیدی، باد، زمین گرمایی یا موج دریا افزایش یافته است. یکی از روش‌های تولید توان الکتریکی به‌وسیله انرژی خورشیدی، استفاده از کلکتور خورشیدی سهموی خطی^۲ می‌باشد. در این نوع کلکتور، شار تابشی بازتابیده شده از آینه بر روی لوله جاذب که در نقطه کانونی قرار می‌گیرد، متمرکز می‌شود و سبب افزایش دمای سیال عامل (معمولاً روغن مایع) می‌گردد [۲]. مطالعات متعددی به‌صورت آزمایشگاهی و عددی بر روی کلکتور خورشیدی سهموی خطی انجام گرفته است. در ادامه به مهم‌ترین مطالعات پرداخته خواهد شد.

رولدان و همکاران [۳] در یک پژوهش عددی و تجربی، مقادیر توزیع و گرادیان دمایی در یک لوله جاذب با سیال عامل بخار فوق‌داغ را به‌دست آوردند. آنها نشان دادند که بخار فوق‌داغ با وجود کاهش در هزینه‌های نگهداری، به دلیل پایین بودن ضریب هدایت حرارتی، سبب ایجاد تنش‌های حرارتی بالا می‌شود. از این رو آنها یک تحلیل اقتصادی برای انتخاب سیال عامل پیشنهاد دادند.

آلمانزا و همکاران [۴] از لوله‌های جاذب با جنس مس و فولاد به‌همراه سیال عامل بخار آب استفاده کردند. آنها یک افزایش دمای ۵۰ درجه سلسیوسی را در لوله فولادی مشاهده کردند که سبب خمش در لوله فولادی شد. آنها نشان دادند که استفاده از لوله‌های مسی به دلیل بالا بودن ضریب رسانش گرمایی (تا ۷ برابر بیشتر از لوله‌های فولادی) سبب کاهش قابل‌ملاحظه در گرادیان‌های دمایی می‌شود.

اک و همکاران [۵] در یک تحقیق ترکیبی عددی و آزمایشگاهی نشان دادند که تنش دمایی در ناحیه تبدیل مایع به بخار داغ می‌افتد. آنها نشان دادند که با افزایش مقدار دبی جریان و همچنین شیب‌دار کردن لوله جاذب می‌توان از تولید گرادیان شدید دمایی کاست.

وانگ و همکاران [۶] ابتدا با استفاده از روش SRT، توزیع شار تابشی بازتابیده بر لوله جاذب را محاسبه کردند. سپس به‌وسیله شبیه‌سازی عددی، تأثیر تغییرات سرعت و دمای ورودی سیال عامل به همراه تغییر تشعشع مستقیم خورشید (DNI) را بر میزان اختلاف دمای جاذب با محیط بررسی کردند. آنها نشان دادند که تغییرات سرعت ورودی از ۱ الی ۴ متر بر ثانیه، تشعشع مستقیم خورشید از ۵۰۰ الی ۱۲۵۰ وات بر مترمربع و دمای سیال از ۳۷۳ الی ۶۷۳ کلوین سبب اختلاف دمای محیطی از ۲۲ تا ۹۲ درجه کلوین می‌شود.

قاسمی و همکاران [۷] تأثیر نانوسیال آلومینا در سیال عامل آب بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی را به‌صورت عددی بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان‌دهنده افزایش راندمان کلکتور با افزایش درصد حجمی سیال می‌باشد؛ به طوری که در درصد حجمی ۴ درصد، حدود ۵ درصد افزایش راندمان مشاهده شد.

فوجیانگ و همکاران [۸] با استفاده از روش مونت کارلو (MCRT)^۳ تأثیر پوشش شیشه‌ای را بر توزیع شار حرارتی روی جاذب، تجزیه و تحلیل کردند. آنها برای کم کردن گرادیان دما که به کاهش تنش حرارتی منجر می‌شود، از کاور شیشه‌ای با سطح مقطع دایروی سهموی استفاده کردند و تا ۳۲ درصد میزان بیشینه شار حرارتی را کاهش دادند.

ردی و همکاران [۹] به روش تجربی، راندمان یک کلکتور سهموی به سطح ۱۵ مترمربع در دو حالت بدون و با پوشش شیشه‌ای و همچنین در شرایطی که چهار نوع دیسک متخلخل در جاذب قرار گرفته‌اند بررسی و مطالعه کردند. آزمایش برای دبی‌های ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ لیتر بر ساعت و تشعشع مستقیم خورشید (DNI) بین ۷۶۱ تا ۷۸۶ وات بر

¹ Renewable energy

² Parabolic trough

³ Monte Carlo Ray Tracing

مترمربع انجام شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که دیسک متخلخل، راندمان کلکتور را افزایش داده است به طوری که راندمان کلکتور بین ۶۴ تا ۶۶ درصد افزایش می‌یابد.

دریسی و همکاران [۱۰] از نانوسیال با سیال پایه گازی به‌عنوان سیال عامل استفاده کردند. آنها همچنین از یک جاذب گذرا (شفاف) استفاده کردند تا نانوسیال بتواند مستقیماً در معرض تشعشع خورشید قرار گیرد. در این مطالعه از ترکیب نانوذرات اکسیدمس و نیکل برای جذب بهتر تشعشع خورشید استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های آنها نشان داد که ماکزیمم راندمان حرارتی برای دمای خروجی نانوسیال ۶۵۰ درجه سلسیوس و کسر حجمی ۰.۳ درصد نانوسیال برابر با ۶۲.۵ درصد می‌باشد.

خسروی و همکاران [۱۱] در یک میدان مغناطیسی، از نانوسیال ترکیبی ترمینول-اکسید آهن در درصدهای بین ۱ تا ۴ درصد استفاده کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که افزایش میدان مغناطیسی و افزایش نانوذرات، سبب افزایش عملکرد کلکتور خورشیدی می‌شود.

ژو و همکاران [۱۲] در یک تحقیق تجربی و عددی، تأثیرات شدت تابش خورشید، سرعت جریان هوا، ضخامت گلس، ضخامت عایق، زاویه ریم، دبی جرمی و دمای آب ورودی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که با افزایش تابش خورشید، دمای سطح لوله، افزایش می‌یابد و این افزایش دما سبب افزایش ضریب جابه‌جایی هوای اطراف آن می‌گردد و منجر به کاهش راندمان کلکتور می‌شود. همچنین با افزایش دبی جرمی آب، میزان جذب حرارت نیز افزایش یافته است و سبب افزایش راندمان کلکتور می‌گردد. پارامترهایی مانند سرعت هوا، ضخامت عایق و گلس اثر کمتری بر راندمان کلکتور در کار آنها داشت.

حسینعلی‌پور و همکاران [۱۳] به بررسی تأثیر دندانه‌دار کردن لوله جاذب در اعداد رینولدز مختلف بر عملکرد کلکتور سهموی خطی پرداختند. آنها پارامتر نسبت دندانه را بین ۲.۵ تا ۱۰ و عدد رینولدز را بین 10^4 و 10^6 تنظیم کردند. نتایج کار آنها نشان داد که در بازه‌های بیان‌شده عدد ناسلت بین ۲ تا ۲.۷ برابر افزایش ولی ضریب اصطکاک نیز بین ۱.۸ تا ۴.۱ افزایش می‌یابد. ضریب عملکرد کلکتور نیز بین ۰.۸ تا ۱.۱ متغیر بود.

سیاوشی و همکاران [۱۴] تأثیر نانوذره پودر نقره بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی را بررسی کردند. آنها نشان دادند که در درصد حجمی ۱.۵، میزان افزایش عدد ناسلت و راندمان کلکتور به ترتیب ۱۲ و ۱.۲ درصد می‌باشد. آنها همچنین ثابت کردند که استفاده از ناحیه متخلخل سبب افزایش ۱۱ و ۵ برابری عدد ناسلت و ضریب اصطکاک می‌شود.

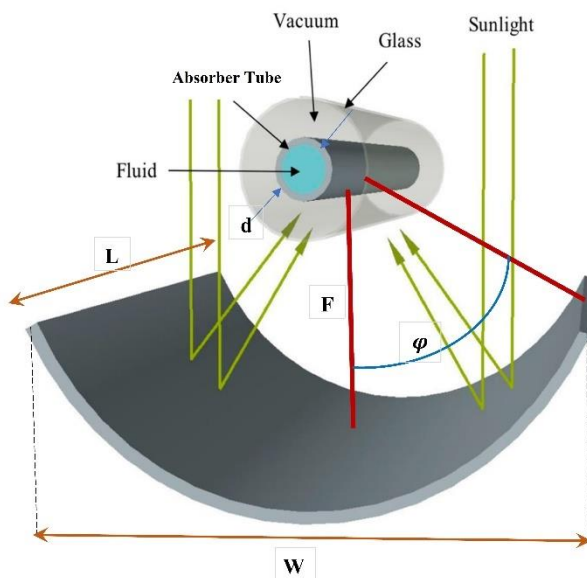
نظیر و همکاران [۱۵] تأثیر توربولاتور را بر پارامترهای عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و راندمان هیدرولیکی-حرارتی، ارزیابی کردند. آنها یک ترکیب‌بندی برای بهینه‌سازی توربولاتور ارائه دادند که در آن عدد ناسلت بیشینه و ضریب اصطکاک کمینه بود.

در پژوهش حاضر یک کار جامع و تلفیقی شامل موارد روش مونت کارلو، حل عددی، خواص متغیر و نانوسیال انجام شده است که در پژوهش‌های گذشته به‌ندرت یافت می‌شود. روش ترکیبی شامل روش آماری مونت کارلو و روش عددی در نرم‌افزار انسیس فلونت می‌باشد. همچنین خواص سیال پایه و نانوذرات به‌صورت واقعی و تابعی از دما معرفی می‌شود. نانوذرات مورد استفاده در تحقیق حاضر اکسیدآلومینیوم، پودر مس و پودر نقره می‌باشد.

روش‌شناسی

بیان مسئله

در تحقیق حاضر، تأثیر نانوسیال بر عملکرد کلکتور سهموی خطی (شکل ۱) به صورت عددی بررسی می‌شود. به منظور اعتبارسنجی، از نتایج تجربی، کار وو و همکاران [۱۶] استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات هندسه موردنظر شامل آینه یا رفلکتور (طول، پهنا، فاصله کانونی و ضریب انعکاس تابش خورشیدی) و مشخصات دریافت‌کننده^۱ شامل لوله جاذب و لوله گلس (شیشه) مانند قطر و ضریب جذب و ضریب عبور ارائه شده است.



شکل ۱. شماتیک هندسه کلکتور خورشیدی سهموی خطی

مقدار زاویه ریم (ϕ) با توجه به جدول ۱ و با استفاده از رابطه (۱)، ۹۴ درجه به دست می‌آید.

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{8 \frac{F}{W}}{16 \left[\frac{F}{W} \right]^2 - 1} \right] \quad (1)$$

خواص سیال و نانوذرات مورد استفاده

سیال پایه مورد استفاده، روغن مایع نوع ۸۰۰ Syltherm می‌باشد. البته تأثیر نانوسیال‌های مختلف شامل سه نانوذره Cu (پودر مس)، Al_2O_3 (اکسید آلومینیوم) و Ag (پودر نقره) در سیال پایه در درصدهای حجمی مختلف بررسی می‌شود.

¹ Reciever

جدول ۱. پارامترهای طراحی کلکتور خورشیدی سهموی خطی [۱۶]

پارامتر ورودی و خروجی	مقدار	پارامتر	
W (m)	۷.۸	پهنای کلکتور	
L (m)	۵.۰	طول کلکتور	
F (m)	۱.۸۴	فاصله کانونی	رفلکتور یا آینه
R _c (-)	۰.۹۳	ضریب انعکاس	
d (m)	۰.۰۷	قطر لوله جاذب	
	۰.۹۶	ضریب جذب لوله جاذب	لوله جاذب یا رسیور
	۰.۹۵	ضریب عبور شیشه (گلس)	

خواص سیال پایه و نانوذرات شامل دانسیته، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه تابعی از دما می‌باشد. خواص ترموفیزیکی سیال پایه روغن مایع نوع ۸۰۰ Syltherm در ادامه ارائه شده است [۱۶]:

$$C_p = 1.1 + 0.001708T \quad (۲)$$

$$K = 1.9 \times 10^{-1} - 1.87 \times 10^{-4}T - 5.75 \times 10^{-4}T^2 \quad (۳)$$

$$\rho = 1.105 \times 10^3 - 4.15 \times 10^{-1}T \quad (۴)$$

$$\mu = 8.48 \times 10^4 - 5.5 \times 10^2T + 1.388T^2 - 1.566 \times 10^{-3}T^3 + 6.67 \times 10^{-7}T^4 \quad (۵)$$

خواص ترموفیزیکی Al_2O_3 (اکسید آلومینیوم) [۱۷]:

$$C_p = -531.43 + 7.135T - 0.0119T^2 + 9.31 \times 10^{-6}T^3 - 2.7679 \times 10^{-9}T^4 \quad (۶)$$

$$K = 148 - 0.568T + 9.794 \times 10^{-4}T^2 - 8.04 \times 10^{-7}T^3 + 2.55 \times 10^{-10}T^4 \quad (۷)$$

$$\rho = 3970 \quad (۸)$$

خواص ترموفیزیکی Ag (پودر نقره) [۱۷]:

$$C_p = 244 - 0.1195T + 4.1 \times 10^{-4}T^2 - 4.25 \times 10^{-7}T^3 + 1.6 \times 10^{-10}T^4 \quad (۹)$$

$$K = 420.2 + 0.10T - 3.15 \times 10^{-4}T^2 + 2.41 \times 10^{-7}T^3 - 7.14 \times 10^{-11}T^4 \quad (۱۰)$$

$$\rho = 10500 \quad (۱۱)$$

خواص ترموفیزیکی Cu (پودر مس) [۱۷]:

$$C_p = 285.8 + 0.446T - 5.205 \times 10^{-4} T^2 + 2.39 \times 10^{-7} T^3 \quad (12)$$

$$K = 441.6 - 0.17T + 1.544 \times 10^{-4} T^2 - 7.29 \times 10^{-8} T^3 \quad (13)$$

$$\rho = 8933 \quad (14)$$

برای تعیین خواص محلول نانوسیال از روش تک‌فازی که ژوان و همکاران [۱۸] ارائه کرده‌اند استفاده می‌شود. مقدار چگالی محلول نانوسیال از رابطه (۱۵) به دست می‌آید [۱۸]:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (15)$$

مقدار ضریب حرارتی ویژه محلول نانوسیال از رابطه (۱۶) به دست می‌آید [۱۸]:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_p C_{p,p} + (1 - \phi) \rho_f C_{p,f}}{\rho_{nf}} \quad (16)$$

ویسکوزیته دینامیکی محلول نانوسیال از رابطه (۱۷) به دست می‌آید:

$$\mu_{nf} = \mu_f (123\phi^2 + 73\phi + 1) \quad (17)$$

ضریب هدایت حرارتی محلول نانوسیال از رابطه براگمن^۱ (رابطه ۱۸) و (۱۹) حاصل می‌شود [۱۸]:

$$K_{nf} = 0.25 \left[(3\phi - 1) K_p + (2 - 3\phi) K_f + \sqrt{\Delta} \right] \quad (18)$$

$$\Delta = \left[(3\phi - 1) K_p + (2 - 3\phi) K_f \right]^2 + 8\lambda_p \cdot \lambda_b \quad (19)$$

اندیس f اشاره به سیال پایه، اندیس p اشاره به نانوذره و nf نیز اشاره به خواص ترموفیزیکی محلول نانوسیال دارد.

معادلات حاکم

معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی می‌باشد که در ادامه آمده‌اند:
معادله پیوستگی [۱۹]:

¹ Bruggeman model

$$\frac{\partial \rho_{nf}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_{nf} u_i) = 0 \quad (20)$$

معادله انتقال مومنتوم [۱۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{nf} u_i) + u_j \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_{nf} u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\mu_{nf} + \mu_t) \bar{S}_{ij}] \quad (21)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (22)$$

معادله انرژی [۱۸]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_{p,nf} T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho c_{p,nf} u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[K_{nf} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (23)$$

در روابط بالا u_i سرعت سیال، p فشار، T دما و \bar{S}_{ij} نرخ کرنش سیال می‌باشد.

روش حل

مدل‌سازی

در مقاله حاضر، عملکرد یک کلکتور خورشیدی سهموی خطی با هندسه مشخص و سیال پایه روغن مایع نوع Syltherm ۸۰۰ در حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم، پودر مس و پودر نقره در درصدهای حجمی مختلف بررسی می‌شود. روش کار بدین گونه است که ابتدا هندسه کلکتور سهموی خطی به نرم‌افزار Soltrace معرفی می‌شود و میزان شار تابشی بازتابیده شده از آینه بر روی لوله جاذب توسط این نرم‌افزار محاسبه می‌شود. نرم‌افزار Soltrace^۱ از روش مونت کارلو (MCRT)^۲ برای تعیین توزیع شار حرارتی استفاده می‌کند. سپس هندسه لوله جاذب یا دریافت‌کننده توسط نرم‌افزار گمبیت ۴.۳.۲^۳ ترسیم و شبکه‌بندی می‌شود. سپس به منظور شبیه‌سازی هیدرودینامیکی-حرارتی، هندسه به نرم‌افزار انسیس فلونت ۱۵^۴ معرفی می‌شود. در نرم‌افزار انسیس فلونت، دو برنامه به زبان C تحت عنوان UDF^۵ به منظور معرفی خواص سیال پایه (روغن مایع) و نانوسیال به صورت تابعی از دما و همچنین معرفی شار حرارتی متغیر روی لوله جاذب نوشته شد. برای تحلیل از الگوریتم تصحیح سرعت-فشار سیمپل و گسسته‌سازی درجه ۲ (QUICK)^۶ استفاده می‌گردد. مقدار باقیمانده^۶ برای معادلات ۱۰^{-۵} و گام زمانی^۷ ۰.۰۵ ثانیه می‌باشد. برای مدل‌سازی آشفستگی جریان از مدل RNG k-epsilon در نرم‌افزار انسیس فلونت بهره گرفته شد.

¹ NREL. SolTrace optical modelling software. SolTrace; 2012.

² Monte Carlo Ray Tracing

³ Gambit 4.3.2

⁴ Ansys Fluent 15

⁵ User Define Function

⁶ Residual

⁷ Time step

شبکه‌بندی و شرایط مرزی

با توجه به ماهیت تقارن در هندسه می‌توان با در نظر گرفتن نیمی از دامنه حل تعداد شبکه را کاهش داد و در نتیجه از هزینه محاسباتی کاست. به‌منظور افزایش دقت حل در کنار دیوار، شبکه‌بندی در این ناحیه با استفاده از دستور لایه مرزی در نرم‌افزار گمبیت ترسیم می‌گردد (شکل ۲). در ناحیه بیرون از لایه مرزی از شبکه ساختاریافته و مربعی استفاده می‌شود. با توجه به شرایط مرزی در شکل ۲ سیال پایه یا محلول نانوسیال با یک دیو و دمای مشخص وارد لوله جاذب می‌گردد. برای شرط مرزی خروجی سیال نیز شرط مرزی جریان توسعه‌یافته خروجی^۱ در نظر گرفته می‌شود. خط تقارن نیز شرط سیمتریک^۲ انتخاب شد. بر روی لوله جاذب نیز شار تابشی غیریکنواخت به وسیله UDF می‌گردد که نحوه اعمال آن در بخش قبل تشریح شد.

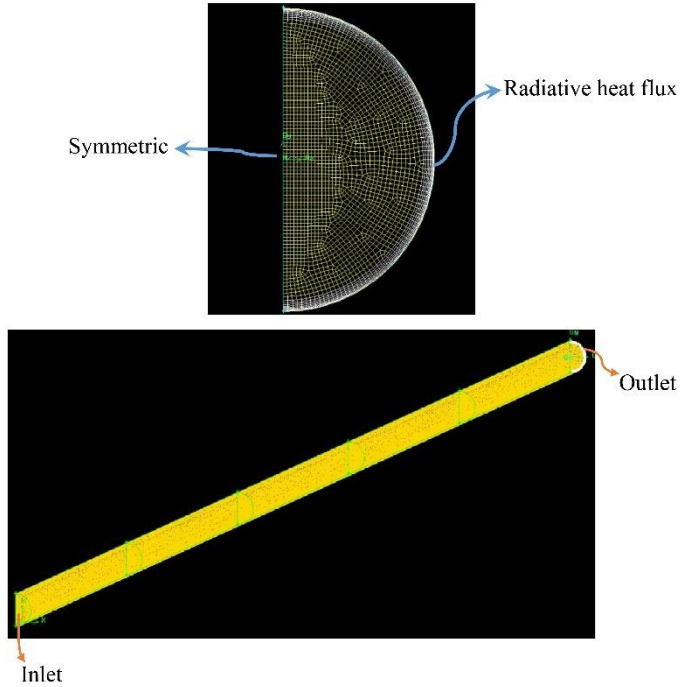
نتایج و بحث

استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

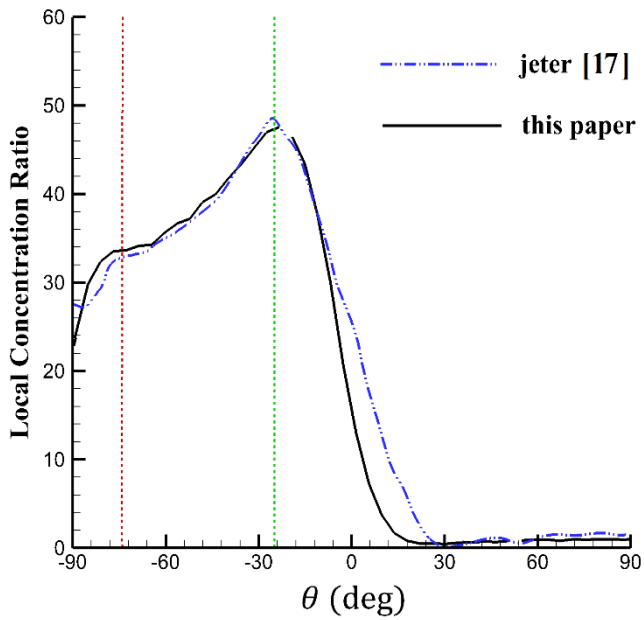
رویه حل شبیه‌سازی عددی بدین صورت است که ابتدا شبکه‌بندی توسط نرم‌افزار گمبیت ایجاد و سپس استقلال از شبکه بررسی می‌گردد و در انتها نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت صحت‌سنجی می‌شود. اما در کار حاضر شرط مرزی شار تابشی توسط نرم‌افزار soltrace محاسبه می‌شود و بنابراین نیاز است که ابتدا نتایج این نرم‌افزار نیز صحت‌سنجی شود. بدین منظور از نتایج جتر و همکاران [۲۰] استفاده شد که در آن زاویه ریم ۹۰ درجه و نسبت پهنا به قطر برابر ۲۱ می‌باشد. در شکل ۳ صحت‌سنجی نتایج به همراه هماهنگی در رفتار تغییرات نمودار در قله‌ها مشاهده شد. بنابراین می‌توان به نتایج نرم‌افزار soltrace در مقاله حاضر اعتماد کرد.

¹ Outflow

² Symmetric

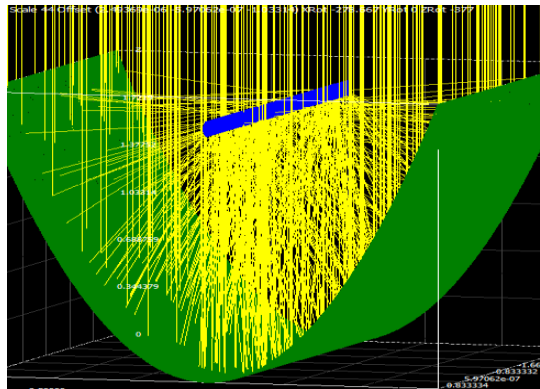


شکل ۲. شبکه بندی و شرایط مرزی



شکل ۳. صحت سنجی نتایج نرم افزار Soltrace با جتر و همکاران [۱۷]

پس از اعتبارسنجی نرم‌افزار soltrace، حال شار تابشی بر روی لوله جاذب در کار حاضر محاسبه می‌گردد. شکل ۴ انعکاس تابش خورشید بر روی لوله جاذب را در نرم‌افزار soltrace نشان می‌دهد. شکل ۵ نیز پروفیل شار تابشی را به‌ازای مقدار تابش ورودی (DNI)^۱ واحد نشان می‌دهد. سپس مقادیر شار تابشی به‌دست‌آمده از این نرم‌افزار در مقادیر ضریب انعکاس آینه، ضریب جذب لوله جاذب و ضریب عبور شیشه یا گلس (مقادیر جدول ۱) ضرب شده و در انتها نیز با مقدار تابش واقعی خورشید ضرب شده تا میزان واقعی شار دریافتی توسط جاذب به‌دست آید. سپس تغییرات شار تابشی بر روی لوله جاذب به وسیله UDF به فلونت معرفی می‌شود که در شکل ۶ توزیع شار حرارتی به عنوان شرط مرزی مشاهده می‌شود.



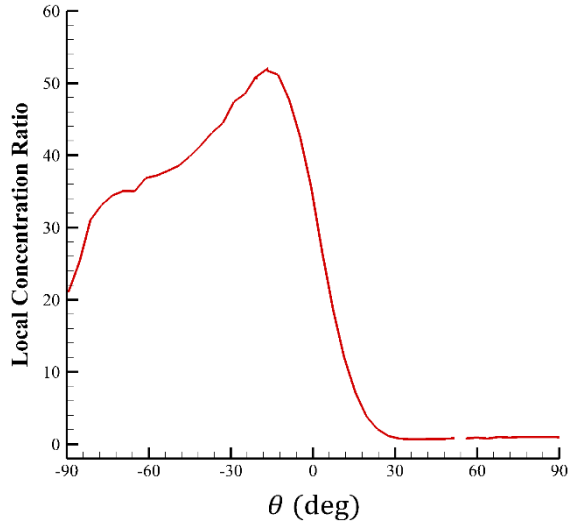
شکل ۴. توزیع شار تابشی خروجی از نرم‌افزار soltrace

در ادامه استقلال از شبکه برای تعداد شبکه‌های ۲۱۱،۰۰۰، ۴۱۳،۰۰۰، ۶۰۳،۰۰۰، ۸۵۲،۰۰۰ و ۱،۱۱۵،۰۰۰ بررسی می‌شود. شکل ۷ نشان می‌دهد که تغییرات دمایی در بازه تعداد شبکه نه‌هصد هزار تا حدود یک‌میلیون و صد هزار کمتر از یک درصد می‌باشد و بنابراین تعداد شبکه مسئله حاضر حدود نه‌هصد هزار شبکه در نظر گرفته می‌شود. در پایان این بخش صحت‌سنجی نتایج ارائه می‌گردد. مقایسه بین نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی وو و همکاران [۱۶] در جدول ۲ نشان می‌دهد که محدوده خطای محاسباتی زیر ۲ درصد است و این نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی، قابل‌اعتماد می‌باشند.

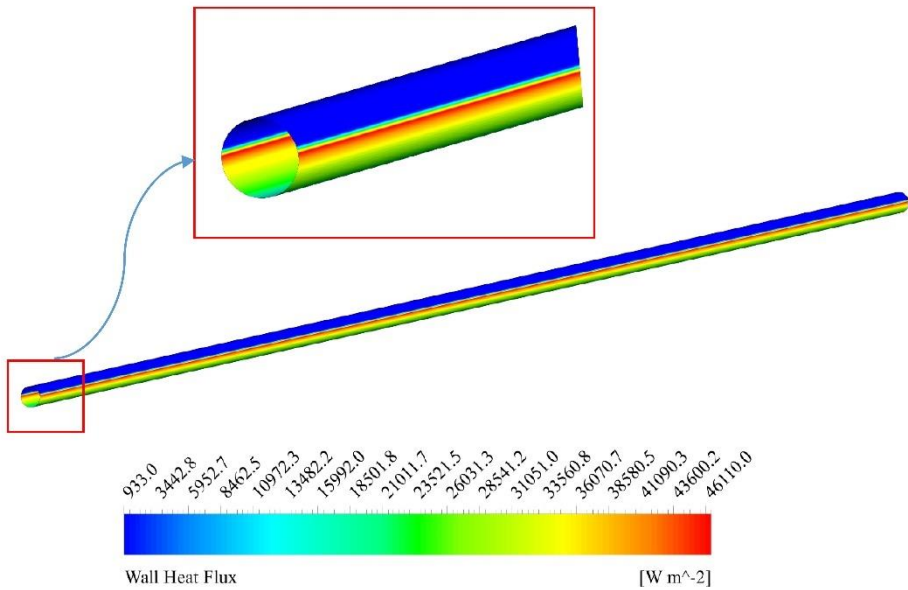
جدول ۲. صحت‌سنجی نتایج حل عددی با نتایج وو و همکاران [۱۶]

خطا (%)	T_{out} (K) [This work]	T_{out} [۱۶]	T_{in} (K)	m(kg/s)	DNI (W/m ²)
۱.۶	۳۹۹	۳۹۷	۳۷۵	۰.۶۳	۹۳۳
۱.۴	۴۴۸.۵	۴۴۶	۴۲۴	۰.۶۷	۹۶۸
۱.۲	۴۹۳.۵	۴۹۲	۴۷۱	۰.۶۴	۹۷۲

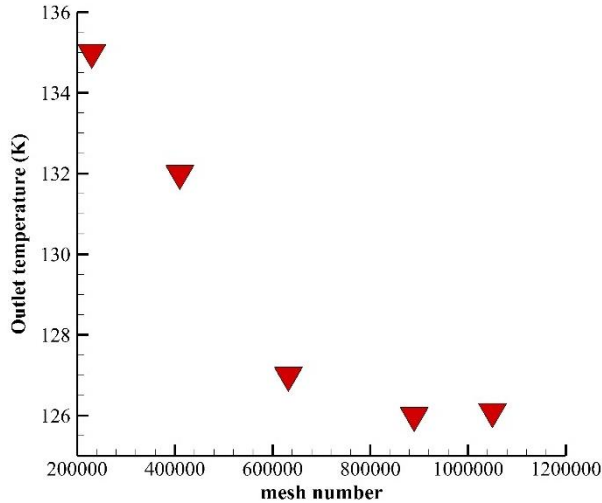
^۱ Direct Normal Irradiation



شکل ۵. توزیع شار تابشی بر روی جاذب برای کار حاضر با مقدار DNI واحد



شکل ۶. توزیع شار تابشی بر روی لوله جاذب به عنوان شرط مرزی در نرم افزار انسیس فلونت

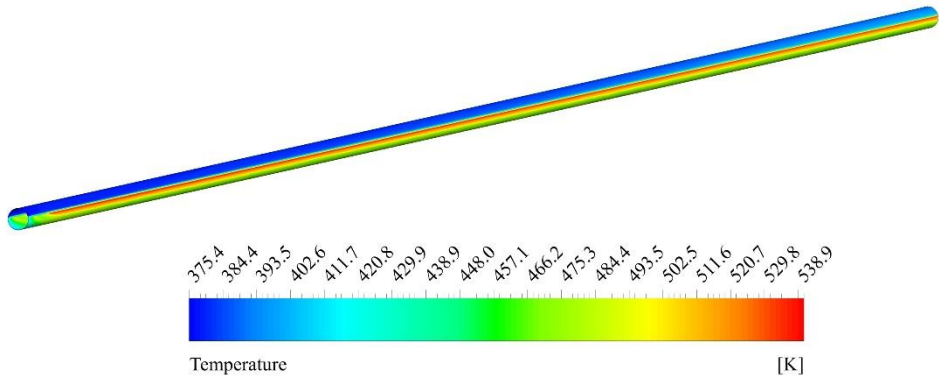


شکل ۷. بررسی استقلال از شبکه محاسباتی

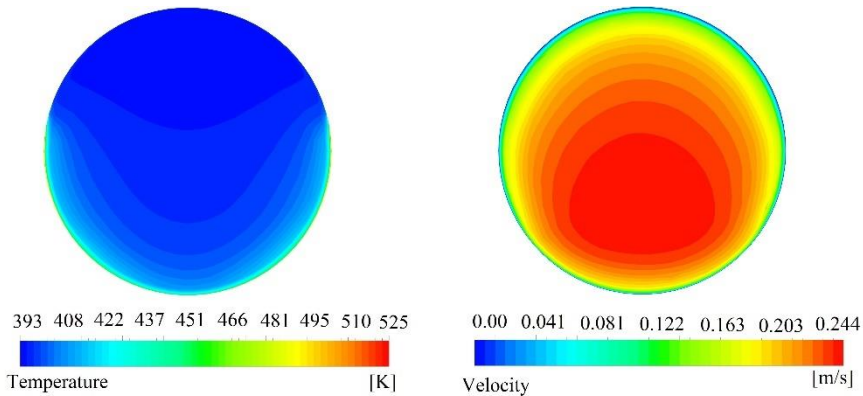
بررسی نتایج سیال پایه

در بخش حاضر نتایج شبیه‌سازی برای سیال پایه در شار تابشی ۹۳۳ وات بر مترمربع بررسی می‌شود. شکل ۸ و ۹ به ترتیب کانتور دما را در کل دامنه حل و خروجی لوله جاذب نشان می‌دهد. شکل ۸ نشان می‌دهد که سیال عامل در ورودی لوله جاذب تحت تأثیر شار تابشی شدید منعکس شده از رفلکتور یا آینه است و بنابراین افزایش دما در نیمه پایینی مشاهده می‌شود و در نیمه بالایی دما با دمای ورودی به لوله جاذب برابر و در حدود ۳۷۵ کلوین است. اما در خروجی یک افزایش دما در کل دامنه مشاهده می‌گردد. شکل ۹ کانتور دما و سرعت را در خروجی لوله جاذب نشان می‌دهد که در آن کمینه و بیشینه افزایش دما به ترتیب ۳۹۳ و ۵۲۵ درجه کلوین می‌باشد. مشاهده شد که برخلاف انتظار، مقدار بیشینه سرعت در مرکز لوله اتفاق نمی‌افتد، بلکه مقدار بیشینه در نیمه پایینی لوله است. دلیل آن نیز متغیر بودن خواص ترموفیزیکی به صورت تابعی از دما است. بنابراین یک بررسی بر روی خواص ترموفیزیکی محاسبه شده نیز انجام می‌شود.

همانگونه که بیان شد، خواص ترموفیزیکی سیال شامل دانسیته، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمای ویژه و لزجت تابعی از دما می‌باشند که به صورت کوپل با معادله انرژی حل می‌شوند که این کوپلینگ سبب افزایش واگرایی حل نیز می‌گردد. این کوپلینگ در هر گام زمانی بروز شده و در گام بعدی تصحیح می‌شود. شکل ۱۰ نتایج نهایی شبیه‌سازی برای خواص ترموفیزیکی مختلف در خروجی لوله جاذب را نشان می‌دهد. در مقایسه شکل ۱۰ با شکل ۹ مشاهده شد که خواص ترموفیزیکی دانسیته، ضریب هدایت حرارتی و لزجت تابع کاهش از دما می‌باشد به طوری که با افزایش دما از مقدار این خواص کاسته می‌شود اما ضریب گرمای ویژه تابع افزایشی از دما است و در بخش‌هایی با دمای بیشتر، مقدار آن، بیشینه است. تغییرات مقادیر دانسیته، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمای ویژه و لزجت به ترتیب ۱۸، ۲۶، ۱۲ و ۵۰ درصد می‌باشد.



شکل ۸. کانتور دما در طول لوله جاذب

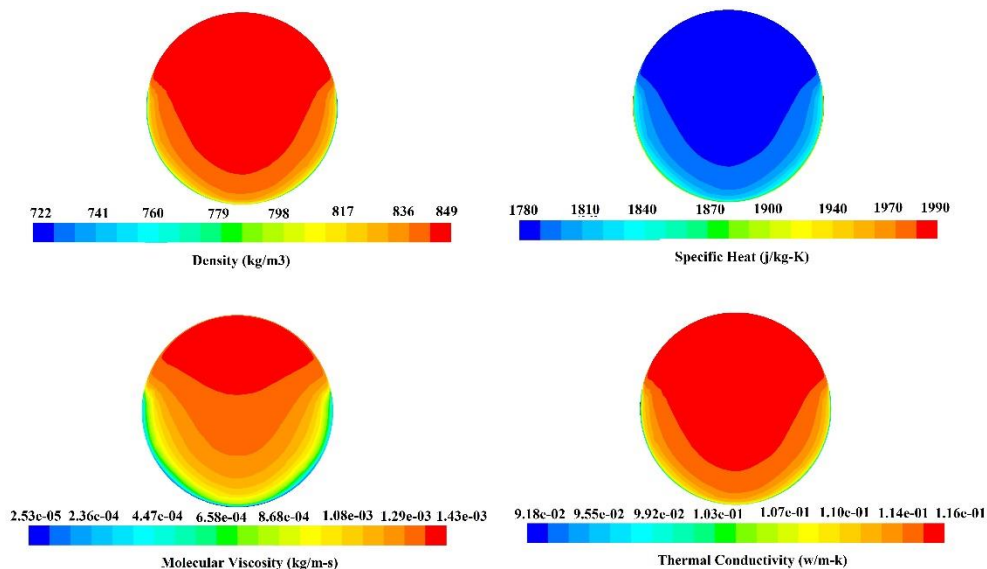


شکل ۹. کانتور دما و سرعت در خروجی لوله جاذب

بررسی تأثیر نانوسیال بر میدان سیال

در این بخش، تأثیر نانوسیال‌های Cu (پودر مس)، Al_2O_3 (اکسید آلومینیوم) و Ag (پودر نقره) بر سیال پایه در درصد‌های حجمی ۲، ۵ و ۱۰ درصد در اعداد رینولدز ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۳۰۰۰، ۵۰۰۰، ۷۵۰۰ و ۱۵۰۰۰ بررسی خواهند شد. به منظور بررسی تأثیر بخشی نانوسیال، پارامتر ضریب انتقال حرارت بررسی می‌شود. این پارامتر به وسیله رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

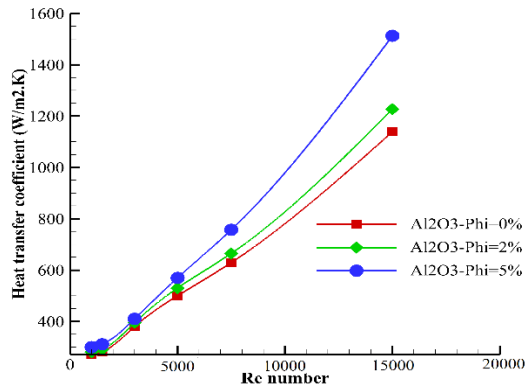
$$h = \frac{q}{T_s - T_m} \quad (24)$$



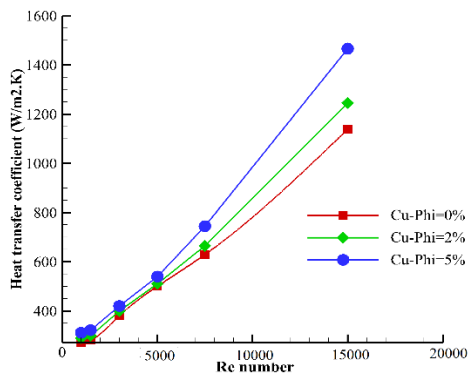
شکل ۱۰. خواص ترموفیزیکی محاسبه شده در خروجی لوله جاذب

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (25)$$

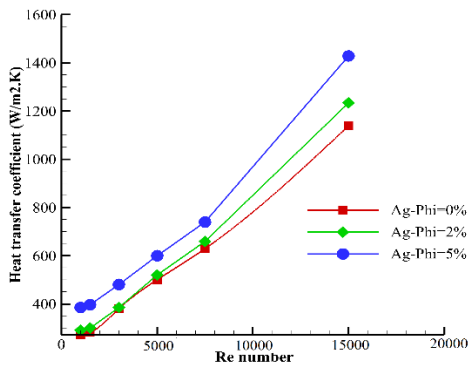
در روابط مذکور T_s دمای سطح لوله جاذب، T_{in} دمای ورودی به لوله کلکتور و T_{out} نیز دمای خروجی از لوله کلکتور می‌باشد. شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ میزان ضریب انتقال حرارت را به ترتیب برای نانوسیال آلومینا، مس و نقره نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر تأثیر عدد رینولدز و کسر حجمی نانوسیال بر مقدار ضریب انتقال حرارت می‌باشد. مشاهده می‌شود که در عدد رینولدز ۱۰۰۰ مقدار ضریب انتقال حرارت در دو کسر حجمی ۲ و ۵ درصد برای اکسید آلومینیوم به ترتیب ۲۸۰ و ۳۰۰، برای پودر نقره به ترتیب ۲۹۲ و ۳۸۵ و پودر مس ۲۸۹ و ۳۱۱ می‌باشد. در حالی که در عدد رینولدز ۵۰۰۰ مقدار ضریب انتقال حرارت در دو کسر حجمی ۲ و ۵ درصد برای اکسید آلومینیوم به ترتیب ۵۳۰ و ۵۷۱، برای پودر نقره به ترتیب ۵۲۱ و ۶۰۰ و پودر مس ۵۱۰ و ۵۴۱ می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که با ثابت ماندن عدد رینولدز، میزان ضریب انتقال حرارت با افزایش مقدار حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار عدد رینولدز نیز اثر درصد حجمی نانوسیال، افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ میزان افزایش ضریب انتقال حرارت را با توجه به نوع و حجم نانوذره نسبت به حالت پایه (بدون نانوسیال) نشان می‌دهد. مشاهده شده است که در عدد رینولدز ۱۰۰۰ و در دو کسر حجمی ۲ و ۵ درصد، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت برای اکسید آلومینیوم به ترتیب ۳ و ۱۱ درصد، برای پودر مس ۷ و ۱۵ درصد و پودر نقره ۷ و ۴۲ درصد است. در عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ به ترتیب اکسید آلومینیوم ۸ و ۳۳ درصد، پودر مس ۹ و ۲۹ درصد و پودر نقره ۸ و ۲۵ درصد افزایش را نشان می‌دهد.



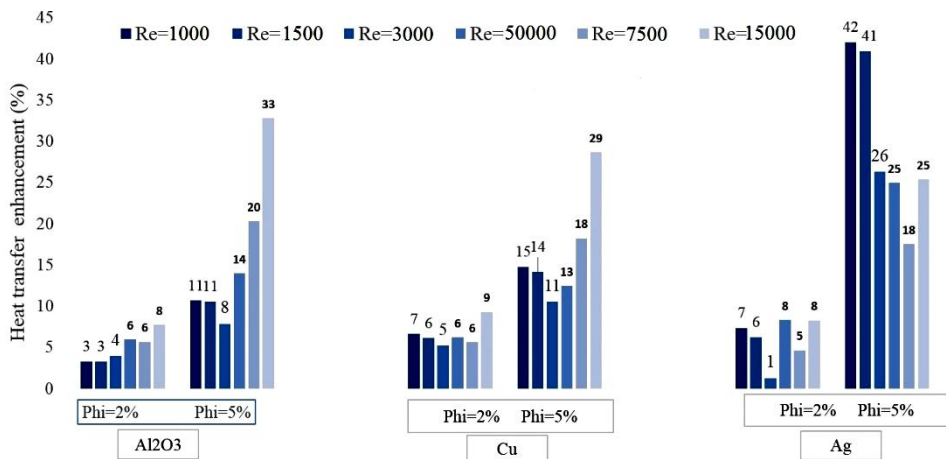
شکل ۱۱. مقدار ضریب انتقال حرارت برای اکسید آلومینیوم



شکل ۱۲. مقدار ضریب انتقال حرارت برای پودر مس



شکل ۱۳. مقدار ضریب انتقال حرارت برای پودر نقره



شکل ۱۴. مقدار افزایش ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه در نانوذرات مختلف

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، ترکیبی از روش مونت کارلو و شبیه‌سازی عددی به‌وسیله نرم‌افزارهای soltrace و انسیس فلوئنت به‌منظور مدل‌سازی جریان نانوسیال بر عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی خطی انجام شد. با توجه به بررسی‌های انجام شده نتایج زیر به‌دست آمده است:

- ۱- با توجه به اینکه در تحقیق حاضر به‌منظور حصول نتایج دقیق‌تر، خواص فیزیکی به‌صورت تابعی از دما در نظر گرفته شدند نتایج نشان داد که خواص ترموفیزیکی دانسیته، ضریب هدایت حرارتی و لزجت تابع کاهشی از دما می‌باشد؛ به طوری که با افزایش دما از مقدار این خواص کاسته می‌شود. اما ضریب گرمای ویژه تابع افزایشی از دما می‌باشد و در بخش‌هایی با دمای بیشتر، مقدار آن بیشینه است. تغییرات مقادیر دانسیته، ضریب هدایت حرارتی، ضریب گرمای ویژه و لزجت به ترتیب ۱۸، ۲۶، ۱۲ و ۵۰ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده تأثیرگذاری تابعیت دما می‌باشد.
- ۲- نتایج نشان داد که با ثابت ماندن عدد رینولدز، میزان ضریب انتقال حرارت با افزایش مقدار حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار عدد رینولدز اثر درصد حجمی نانوسیال نیز بیشتر می‌گردد.
- ۳- عملکرد نانوذره پودر نقره در اعداد رینولدز پایین، بهتر از دیگر نانوذرات می‌باشد و با افزایش عدد رینولدز از میزان عملکرد آن کم می‌شود. عملکرد اکسید آلومینیوم برخلاف پودر نقره در عدد رینولدز کم، مطلوب نمی‌باشد ولی با افزایش عدد رینولدز عملکرد آن بهبود می‌یابد. برای نتیجه نهایی می‌توان بیان کرد که از نظر مقدار ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز پایین، بهترین انتخاب، پودر نقره و در اعداد رینولدز بالا، اکسید آلومینیوم می‌باشد.

References

- [1] Masoumnezhad, M., Kazemi, M., Askari, N., Taheri, M. H., & Ghamati, M. (2021). Semi-Analytical Solution of Unsteady Newtonian Fluid Flow and Heat Transfer between two Oscillation Plate under the Influence of a Magnetic Field. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(1), 35-62. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.131.037>
- [2] Tagle-Salazar, P. D., Nigam, K. D. P., & Rivera-Solorio, C. I. (2020). Parabolic trough solar collectors: A general overview of technology, industrial applications, energy market, modeling, and standards. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), 595-649. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0059>
- [3] Roldán, M. I., Valenzuela, L., & Zarza, E. (2013). Thermal analysis of solar receiver pipes with superheated steam. *Applied Energy*, 103, 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.021>
- [4] Almanza, R., Lentz, A., & Jiménez, G. (1997). Receiver behavior in direct steam generation with parabolic troughs. *Solar Energy*, 61(4), 275-278. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)88854-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)88854-8)
- [5] Eck, M., Zarza, E., Eickhoff, M., Rheinländer, J., & Valenzuela, L. (2003). Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs. *Solar Energy*, 74(4), 341-351. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(03\)00111-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(03)00111-7)
- [6] Wang, Y., Liu, Q., Lei, J., & Jin, H. (2015). Performance analysis of a parabolic trough solar collector with non-uniform solar flux conditions. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 82, 236-249. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.055>
- [7] Ghasemi, S. E., Ranjbar, A., & Ramiar, A. (2013). Numerical investigation of effect of Al-water nanofluid on performance of solar parabolic collector. *Nanomaterials*, 5(14), 100-107. https://nm.shahrood.iau.ir/article_541141_262562a62a759b7092f60bcba0a8e1_54.pdf
- [8] Fuqiang, W., Jianyu, T., Lanxin, M., & Chengchao, W. (2015). Effects of glass cover on heat flux distribution for tube receiver with parabolic trough collector system. *Energy Conversion and Management*, 90, 47-52. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.11.004>
- [9] Reddy, K. S., Ravi Kumar, K., & Ajay, C. S. (2015). Experimental investigation of porous disc enhanced receiver for solar parabolic trough collector. *Renewable Energy*, 77, 308-319. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.016>
- [10] De Risi, A., Milanese, M., & Laforgia, D. (2013). Modelling and optimization of transparent parabolic trough collector based on gas-phase nanofluids. *Renewable Energy*, 58, 134-139. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.03.014>
- [11] Khosravi, A., Malekan, M., & Assad, M. E. H. (2019). Numerical analysis of magnetic field effects on the heat transfer enhancement in ferrofluids for a parabolic trough solar collector. *Renewable Energy*, 134, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.015>
- [12] Xu, R. J., Zhao, Y. Q., Chen, H., Wu, Q. P., Yang, L. W., & Wang, H. S. (2020). Numerical and experimental investigation of a compound parabolic concentrator-capillary tube solar collector. *Energy Conversion and Management*, 204(7), 112218. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112218>
- [13] Hosseinalipour, S., Rostami, A., & shahriari, G. (2020). Numerical study of circumferential temperature difference reduction at the absorber tube of parabolic trough direct steam generation collector by inserting a twisted tape in superheated region. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100720. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100720>

- [14] Siavashi, M., Vahabzadeh Bozorg, M., & Toosi, M. (2021). A numerical analysis of the effects of nanofluid and porous media utilization on the performance of parabolic trough solar collectors. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101179. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101179>
- [15] Shahzad Nazir, M., Shahsavari, A., Afrand, M., Arıcı, M., Nizetić, S., Ma, Z., & Öztop, H. F. (2021). A comprehensive review of parabolic trough solar collectors equipped with turbulators and numerical evaluation of hydrothermal performance of a novel model. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101103. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101103>
- [16] Wu, Z., Li, S., Yuan, G., Lei, D., & Wang, Z. (2014). Three-dimensional numerical study of heat transfer characteristics of parabolic trough receiver. *Applied Energy*, 113, 902-911. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.050>
- [17] Kasaeian, A., Daviran, S., Daneshzarian, R., & Rashidi, A. (2015). Performance evaluation and nanofluid using capability study of a solar parabolic trough collector. *Energy Conversion and Management*, 89, 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.056>
- [18] He, Y-L., Xiao, J., Cheng, Z-D., & Tao, Y-B. (2011). A MCRT and FVM coupled simulation method for energy conversion process in parabolic trough solar collector. *Renewable Energy*, 36(3), 976-985. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.017>
- [19] Askari, N., & Taheri, M. H. (2020). Numerical Investigation of a MHD Natural Convection Heat Transfer Flow in a Square Enclosure with Two Heaters on the Bottom Wall. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(1), 97-114. <https://doi.org/10.48301/kssa.2020.112759>
- [20] Jeter, S. M. (1987). Analytical determination of the optical performance of practical parabolic trough collectors from design data. *Solar Energy*, 39(1), 11-21. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(87\)80047-6](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(87)80047-6)