

Investigation of Hydraulic-Thermal Performance, Energy, and Exergy Efficiency in Parabolic Solar Collector Equipped with Vortex Generator Containing Two-phase Hybrid Nanofluid

Mohammad Sepehrirad,¹ Alireza Aghaei,^{2,3*} Mohammad Mahdi Najafizadeh,⁴ Ali Hassani Joshaghani⁵

¹ Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
sepehrirad57@gmail.com

² Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
a.aghaei@kashanu.ac.ir

³ Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
a.aghaei@kashanu.ac.ir

⁴ Department of Mechanical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
m-najafizadeh@iau-arak.ac.ir

⁵ Department of Chemical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran
a-hasani@iau-arak.ac.ir

Keywords:

parabolic solar collector
vortex generator
two-phase flow
hybrid nanofluid
exergy efficiency
energy efficiency

Abstract: The sun is a renewable resource that helps reduce carbon dioxide emissions and reduces the impact of industries on nature pollution. In the present study, the effects of using the vortex generator in different geometrical states in the absorber tube of the parabolic solar collector were investigated using the numerical method and with the help of the finite volume method. Vortex generators were modeled with four geometric states, Case A, Case B, Case C, and Case D, and their effect on different parameters in the output of parabolic solar collector was investigated. According to the results, using the vortex generator increased the heat transfer coefficient and the thermal efficiency of the parabolic solar collector. The maximum increase in thermal performance increased by 65.03% compared to when the parabolic solar collector was a simple.

Original Research Article

Paper History:

Received: 04/12/2023

Revise: 01/04/2024

Accepted: 06/05/2024

How to cite this article: Sepehrirad, M., Aghaei, A., Najafizadeh, M. M., Hassani Joshaghani, A. "Investigation of hydraulic-thermal performance, energy and exergy efficiency in parabolic solar collector equipped with vortex generator containing two-phase hybrid nanofluid", Energy Engineering and Management, Vol. 14, No. 1, PP. 122-141, Spring 2024.
<https://doi.org/10.22052/eem.2024.253947.1039>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

Solar energy affects the continuation of human life, and its decrease and increase both lead to the destruction and extinction of creatures on the planet. Of course, today, the advancement of technology encourages people to use this free energy. Solar

energy generated by solar panels and collectors has a significant impact on reducing costs. The energy consumption for heating, water, or lighting will be minimized by installing solar panels and collectors. Even compared to nuclear energy, it is a simpler and less risky solution for generating energy. It should be

noted that the efficiency of solar panels and collectors is low, but not zero on cloudy and rainy days. The efficient performance of these panels depends on the amount of sunlight. Of course, it should be noted that these solar panels and collectors cannot store solar energy during the night. This study uses a new design for the geometric modeling of a parabolic solar collector equipped with a vortex generator. In addition, the effect of the twist ratio of vortex generator geometry on hydraulic-thermal performance, energy efficiency, and exergy efficiency has been investigated to make the output results more practical.

Material and Methods

In this study, a two-phase method models the flow behavior of water/Fe₃O₄-CNT hybrid nanofluid. In the two-phase method, unlike a single-phase method, the sliding speed between nanoparticles and base fluid is practical and not insignificant. According to the numerical tests performed and the review of previous studies, the Realizable k- ϵ Model is the most appropriate in terms of convergence and computational cost in the studied geometry with vortex generators. Therefore, this model is used in this study. The effect of solar radiation is considered as a constant heat flux of 1000 W/m². The current study investigated hybrid nanofluid flow in the Reynolds number range of 24000 to 96000, corresponding to the turbulent flow regime. Also, Fluent version 2021 software was used for numerical simulation.

Results

The results showed that using a vortex generator increased the heat transfer coefficient and, thus, increased the thermal efficiency in the parabolic solar collector. Increasing the twist ratio of the vortex generator increased the efficiency and energy efficiency of the parabolic solar collector. The most favorable amount of energy efficiency occurred at a Reynolds number of 96000 and at the time when the

vortex generator with Case D was used. The most favorable rate of exergy efficiency was at Reynolds number 48000 and at the time when the vortex generator with Case D geometry was used. The maximum increase in thermal performance increased by 65.03% compared to the time when the solar collector was a simple parabola.

Conclusion and Discussion

The obtained numerical simulation results show:

- The use of vortex generators in the solar collector's absorber tube causes the hybrid nanofluid flow to change shape and to be mixed while passing through it.
- The formation of the vortex and its fluctuating nature help increase the heat transfer coefficient and, thus, the thermal efficiency of the parabolic solar collector.
- The higher the generators' vortex twist ratio is, the greater the density of the flow lines become. This results in higher speed and flow rate.
- In Case D geometry, the thermal performance increases by 65.03% compared to the time when the solar collector is simple (without generator vortex).
- The presence of vortex generators and their geometrical change are suitable for hydraulic-thermal performance because vortex generators have a higher thermal efficiency than the pressure drop or friction coefficient in the parabolic solar collector.
- The most favorable amount of energy efficiency occurs at the Reynolds number of 96000 and the time when the vortex generator with the geometry of Case D is used.
- The most favorable exergy efficiency is at Reynolds number 48000 and at the time when the vortex generator with Case D geometry is used. In other words, these conditions realize the highest capability available in the studied parabolic solar collector.

بررسی عملکرد هیدرولیکی - حرارتی، بازده انرژی و آگزرژی در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه حاوی نانوسیال هیبریدی دوفازی

محمد سپهری‌راد،^۱ علیرضا آقایی،^{۲،۳*} محمدمهدی نجفی‌زاده،^۴ علی حسنی جوشقانی^۵

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، sepehrirad57@gmail.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، a.aghaei@kashanu.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، a.aghaei@kashanu.ac.ir

^۴ استاد، گروه مهندسی مکانیک، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، m-najafizadeh@iau-arak.ac.ir

^۵ استادیار، گروه مهندسی شیمی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران، a-hasani@iau-arak.ac.ir

واژه‌های کلیدی:

کلکتور خورشیدی سهموی
مولد گردابه
جریان دوفازی
نانوسیال هیبریدی
بازده آگزرژی
بازده انرژی

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۷

چکیده: خورشید یک منبع تجدیدپذیر است که به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک کرده و تأثیر صنایع را بر آلودگی طبیعت کم می‌کند. در مطالعه حاضر با روش عددی و با کمک روش حجم محدود به بررسی تأثیرات استفاده از مولد گردابه در حالت‌های مختلف هندسی در لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی پرداخته شد. همچنین نانوسیال هیبریدی آب/اکسید آهن-نانولوله کربنی با در نظر گرفتن مدل دوفازی در اعداد رینولدز ۲۴۰۰۰ تا ۹۶۰۰۰ به عنوان سیال انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفت. مولدهای گردابه با چهار حالت هندسی Case A، Case B، Case C و Case D مدل‌سازی شده و تأثیر آن‌ها بر پارامترهای مختلف در خروجی کلکتور خورشیدی سهموی بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد به کارگیری مولد گردابه‌ها باعث بالا رفتن ضریب انتقال حرارت و در نتیجه افزایش بازده حرارتی در کلکتور خورشیدی سهموی شد. افزایش نسبت پیچش مولد گردابه میزان اثربخشی و بازده انرژی را در کلکتور خورشیدی سهموی افزایش داد. مطلوب‌ترین میزان بازده انرژی در عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ و هنگام استفاده از مولد گردابه با شکل هندسی Case D رخ داد. مطلوب‌ترین میزان بازده آگزرژی در عدد رینولدز ۴۸۰۰۰ و هنگام استفاده از مولد گردابه با شکل هندسی Case D بود. بیشترین میزان افزایش عملکرد حرارتی به میزان ۶۵/۰۳ درصد نسبت به زمانی که کلکتور خورشیدی سهموی ساده بود، افزایش پیدا کرد.

۱. مقدمه

انرژی خورشیدی بر ادامه حیات بشر تأثیر می‌گذارد و کاهش و افزایش آن در هر دو صورت منجر به نابودی و انقراض موجودات روی کره زمین می‌شود. البته امروزه پیشرفت فناوری، انسان را به سمت به‌کارگیری این انرژی رایگان ترغیب می‌کند. انرژی خورشیدی که توسط پنل‌ها و کلکتورهای خورشیدی ایجاد می‌شود در کاهش هزینه‌ها تأثیر چشمگیری می‌گذارد؛ زیرا با نصب پنل و کلکتورهای خورشیدی، میزان مصرف انرژی به‌منظور گرم کردن آب یا روشنایی به حداقل خواهد رسید. خورشید یک منبع تجدیدناپذیر است که به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک می‌کند و تأثیر انسان را بر آلودگی طبیعت کم می‌کند. این انرژی برخلاف سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ و نفت به‌طور مستقیم منجر به انتشار آلاینده‌ها در هوا و آب نمی‌شود. حتی در مقایسه با انرژی هسته‌ای راه‌حلی ساده‌تر و با خطری کمتر به‌منظور تولید انرژی است. بنابراین انتشار گازهای گلخانه‌ای که به دلیل استفاده از سوخت‌های معمول ایجاد می‌شوند، به حداقل رسیده و از سرعت روند پدیده‌هایی مانند سوراخ شدن لایه اوزون و افزایش گرمای زمین که از نگرانی‌های محققان است، جلوگیری می‌کند. بازده پنل‌ها و کلکتورهای خورشیدی در روزهای ابری و بارانی، کم ولی صفر نمی‌شود. عملکرد پربازده این صفحات به میزان تابش نور خورشید بستگی دارد. بنابراین شاید روزهای ابری تأثیر تقریباً قابل توجهی بر این سیستم‌ها داشته باشد. البته باید توجه داشت که این پنل‌ها و کلکتورهای خورشیدی در طول شب قادر به ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی نیستند. جرالند و کوهن [۱] بازده یک کلکتور سهموی دارای یک لوله جاذب متخلخل نوآورانه را بررسی کردند. آن‌ها یک برنامه کامپیوتری به روش اختلاف محدود و یک‌بعدی تهیه کردند. مطالعات پارامتریک برای تعیین اثر پارامترهای مختلف مانند دبی جریان، زاویه پذیرش، ابعاد جاذب و خواص مواد روی بازده حرارتی انجام شد. نتایج عددی برای بازده حرارتی، بهبود قابل توجهی را نسبت به کلکتورهای متداول نشان داد.

راج و همکاران [۲] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی جریان سیال داخل لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی سهموی را بررسی کردند. سیال داخل لوله آب بود و با سه دبی ۳۳، ۶۳ و ۸۵ کیلوگرم در ساعت مورد آزمایش تجربی نیز قرار گرفت. تطابق نتایج عددی و تجربی بسیار خوب بود. افزودن مولد گردابه موجب افزایش ۰/۵ درجه سانتی‌گرادی در دمای آب خروجی از جاذب شد. با وجود مولد گردابه، تنش حرارتی در لوله جاذب کاهش یافت اما افت فشار از مقدار ۴۵ پاسکال به ۲۲۵ پاسکال افزایش یافت.

ماریف و همکاران [۳] برای تعیین بازده حرارتی و اپتیکی یک کلکتور خورشیدی سهموی تحت شرایط آب‌وهوایی صحرائی الجزایر یک برنامه کامپیوتری بر مبنای یک مدل یک‌بعدی ضمنی و روش اختلاف محدود با رویه بالانس انرژی را توسعه دادند. آن‌ها از دو سیال آب و روغن صنعتی ترمینول استفاده کردند و جهت مناسب برای دنبال کردن خورشید را یافته و راندمان حرارتی را عددی بین ۶۹/۷۳ تا ۷۲/۲۴ درصد اندازه‌گیری کردند. همچنین، آن‌ها دریافتند که بهترین گزینه از نظر اقتصادی در دماهای پایین است؛ اما در دماهای بالا حتماً باید از روغن صنعتی استفاده کرد.

رستمی و همکاران [۴] تغییرات شکل هندسی سطح مقطع را در یک کلکتور خورشیدی سهموی با در نظر گرفتن شرط عدم لغزش برای دیواره‌های بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها شرایط مدل‌سازی تابش خورشیدی برای فصل تابستان در نظر گرفته شده است. نتایج خروجی نشان می‌دهد استفاده از سطح مقطع دایره‌ای به‌مراتب میزان جذب بیشتری نسبت به حالت‌های دیگر دارد. همچنین حداکثر بازده کلکتور خورشیدی سهموی ۴۰/۳۵ درصد است.

پیگوزوفیلو و همکاران [۵] درباره افت حرارتی کلکتورهای خورشیدی سهموی تحقیقاتی را انجام دادند. از آنجاکه افت حرارتی نقش مهمی در بازده حرارتی یک کلکتور خورشیدی دارد، آن‌ها با استفاده از روش‌های تجربی و عددی افت‌های حرارتی کلکتور خورشیدی کوچک‌مقیاس به طول ۴ متر و عرض ۳ متر دارای لوله‌های خلأ و پوشش‌های انتخابگر را بررسی کردند. بازده کلکتور بین ۰/۳ تا ۰/۵۵ اندازه‌گیری شد.

قمرسی و همکاران [۶] بازده یک کلکتور خورشیدی سهموی را بررسی کردند. داده‌های خروجی نرم‌افزار به‌عنوان شرایط مرزی مورد استفاده قرار گرفته و اثر قطر لوله جاذب بر عملکرد کلکتور بررسی شده است. نوع جدیدی از لوله جاذب با یک پوشش فلزی در ضخامت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد کلکتور با استفاده از آن در مقایسه با یک لوله جاذب معمولی با همان ضخامت و همان جریان سیال مقایسه شده است. نتایج نشان داده که با افزایش ضخامت لایه فلزی روی لوله جاذب، عملکرد کلکتور بهبود می‌یابد.

شهسوار گلدانلو و همکاران [۷] مدل‌سازی تک‌فاز و دوفاز نانوذرات در سیال پایه را درون سیستم‌های خورشیدی بررسی کردند. مطابق بیان نویسندگان در روش دوفاز تغییرات فیزیکی جریان به‌مراتب به‌صورت دقیق‌تر مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد مقادیر به‌دست‌آمده از عدد ناسلت متوسط در حالت دوفاز به‌میزان ۱۲/۳۵ درصد بیشتر از حالت تک‌فاز است.

اکسید منیزیم-مس/آب بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد که عدد ناسلت متوسط و افت فشار به کسر حجمی و عدد رینولدز بستگی دارند و با افزایش این پارامترها به صورت خطی افزایش می‌یابند. همچنین، حداکثر افزایش راندمان‌های انرژی و انرژی به ترتیب برابر با ۲۳/۷۹ درصد و ۲۱/۱۵ درصد با افزایش عدد رینولدز از ۸۰۰۰ تا ۳۲۰۰۰ محاسبه شد.

خطیب و همکاران [۱۳] با استفاده از روش حجم محدود تأثیر ترکیبی توربولاتور و نانوسیال ترکیبی دوفازی نانولوله کربنی چندجداره-مس/آب را بر راندمان انرژی و انرژی یک کلکتور خورشیدی سهموی بررسی کردند. مدل چندفازی اوپلرین-اوپلرین و مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شدند. نتایج عددی نشان داد که حداکثر انتقال حرارت در کمترین افت فشار به عدد رینولدز ۱۸۰۰۰ و کسر حجمی نانوسیال ۳ درصد و نسبت پیچش ۴ مربوط می‌شود. به علاوه، در تمامی نسبت‌های پیچش با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوسیال، راندمان انرژی افزایش می‌یابد. حداکثر راندمان انرژی ۲۶/۳۲ درصد و متعلق به کسر حجمی ۳ درصد و نسبت پیچش ۳ و عدد رینولدز بین ۶۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ بود.

دزفولی‌زاده و همکاران [۱۴] به بررسی اثر تغییر سطح مقطع لوله جاذب در کلکتور خورشیدی سهموی پرداختند. مطالعه آن‌ها برای سه شکل هندسی مختلف از سطح مقطع لوله جاذب انجام شده است. همچنین آن‌ها در این مطالعه به منظور بهبود انتقال حرارت در سیستم خورشیدی از نانوسیال هیبریدی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تغییر سطح مقطع لوله جاذب خورشیدی و استفاده از نانوسیال باعث افزایش بازده کلکتور خورشیدی سهموی می‌شود.

نظیر و همکاران [۱۵] مرور کاملی درباره کلکتورهای خورشیدی سهموی دارای توربولاتور انجام دادند و بازده هیدروترمال یک طرح نوآورانه را نیز بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد استفاده از توربولاتور حداکثر به میزان ۳۹/۱۱ درصد باعث افزایش بازده هیدروترمال کلکتور خورشیدی می‌شود.

زابلی و همکاران [۱۶] به روش عددی- یک کلکتور خورشیدی سهموی دارای فین‌های داخلی مارپیچی به عنوان توربولاتور را بررسی کردند. تحلیل سه بعدی آن‌ها با استفاده از روش حجم محدود در نرم‌افزار انسیس فلونت انجام گرفت. نتایج نشان داد که بهبود عملکرد حرارتی تا ۲۳/۱ درصد با استفاده از هریک از چهار هندسه میسر است. به علاوه، کمترین و بیشترین بهبود در عملکرد حرارتی به ترتیب

رستمی و همکاران [۸] از دو روش معروف برای افزایش بازده کلکتورهای خورشیدی سهموی یعنی استفاده از آشفته‌سازها و نانوسیالات استفاده کردند تا تأثیر آن‌ها را بر عملکرد یک کلکتور خورشیدی سهموی بررسی کنند. آن‌ها با استفاده از یک توربولاتور از جنس فولاد ضدزنگ مطابق شکل‌های زیر داخل لوله جاذب استفاده کرد و داخل جریان آب عبوری از لوله جاذب نانوذرات مس استفاده نمودند. استفاده از توربولاتور تأثیر شایانی بر بازده حرارتی دارد و با افزایش غلظت نانوذرات نیز عدد ناسلت داخل لوله و بازده کلکتور در اعداد رینولدز مختلف افزایش می‌یابد.

خطیب و همکاران [۹] روی مدل‌سازی عددی بازده‌های حرارتی-هیدرولیکی و انرژی کلکتورهای خورشیدی سهموی پر شده از نانوسیال مغناطیسی ترکیبی کار کردند. آن‌ها در حل عددی از مدل مخلوط برای نانوسیال دوفاز استفاده کردند. نتایج نشان داد که با افزایش عدد رینولدز و غلظت نانوذرات عدد ناسلت و افت فشار افزایش چشمگیری می‌یابد. به علاوه، استفاده از توربولاتور مغناطیسی ترکیبی و نانوسیال ترکیبی بازده کلکتور را افزایش داد. آن‌ها دریافتند که عدد رینولدز ۲۰۰۰۰ و کسر حجمی ۳ درصد نانوذرات منجر به حالت بهینه برای بازده انرژی در استفاده از یک توربولاتور ترکیبی می‌شود.

شهرزاد نظیر و همکاران [۱۰] اثر قطر لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی را بر بازده انرژی بررسی کردند. در واقع مطالعه آن‌ها با استفاده از شرط عدم لغزش در دیواره‌های لوله جاذب و قطرهای مختلف آن انجام شده است. آن‌ها در این مطالعه به منظور کاربردی‌تر شدن پژوهش خود، از شرایط آب‌وهوایی مناطق گرمسیر با شدت تابش بالا استفاده کردند. براساس گزارش‌های نویسندگان افزایش قطر لوله جاذب باعث افزایش بازده انرژی می‌گردد.

وارون و چاندراوار آروناچالا [۱۱] به صورت تجربی یک روش نوین برای تعیین مقدار شار حرارتی غیریکنواخت لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی سهموی در شرایط داخلی را ابداع کردند. آن‌ها برای تخمین معیار ارزیابی عملکرد و بازده انرژی کلکتور سه مدل ماتریس سیمی استفاده کردند. بیشترین مقدار ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی برابر با ۱/۱۴ و یک نسبت بهبود انرژی ۴/۳ به ترتیب برای ماتریس سیمی با دانسیته کم و ماتریس سیمی با دانسیته متوسط مشاهده شد.

خطیب و همکاران [۱۲] به صورت عددی تأثیر توربولاتور پیچ‌خورده را در یک کلکتور خورشیدی سهموی بر بهبود عملکرد حرارتی-هیدرولیکی و راندمان انرژی و انرژی نانوسیال هیبریدی

جدول (۱): فهرست پژوهش‌های مختلف با محوریت استفاده از توربولاتور و مولد گردابه در کلکتورهای خورشیدی پارابولیک

نویسندگان	نوع مطالعه	نوع سیال کاری	جزئیات شکل هندسی مولد گردابه یا توربولاتور	نتایج بهبود انتقال حرارت (%)
جرامیلو و همکاران [۲۰]	تجربی	آب	استفاده از نوارهای پیچشی	۱۲/۰۱
ژو و همکاران [۲۱]	عددی	سیلترم ۸۰۰	استفاده از نوارهای موج‌دار در ورودی	۲۱۰/۲۴
چانگ و همکاران [۲۲]	عددی	آب	استفاده از نوارهای پیچشی	۱۹۰/۲۱
سahین و همکاران [۲۳]	عددی و تجربی	آب	استفاده از کوئل‌های سیمی	۲۴۰/۴۵
سونگ و همکاران [۲۴]	عددی	سیلترم ۸۰۰	استفاده از نوارهای هلیکال پیچی شکل	۶۳/۴۸
لیو و همکاران [۲۵]	عددی	آب	استفاده از دو نوار پیچشی	۳۷/۸۶
توو و بنتو [۲۶]	عددی	گاز هلیوم	استفاده از کوئل‌های سیمی و نوارهای پیچشی	۳۰۰/۴۵
بنابدررحمان و همکاران [۲۷]	عددی	نانوسیال (اکسید آلومینیوم/ روغن)	استفاده از فین‌های مستطیلی و مثلثی	۶۸/۱۱
ژیانگاتو و همکاران [۲۸]	عددی	روغن	استفاده از فین با آرایه پین‌شکل	۳۶/۱۵
پلوس و همکاران [۲۹]	عددی	هوا	استفاده از فین‌های طولی	۳۶/۴۸

به حالت گام ۲۵۰ میلی‌متر با ۱۴/۱ درصد بهبود و حالت ۱۰۰۰ میلی‌متر با ۲۳/۵۳ درصد بهبود مربوط می‌شد.

آقایی و همکاران [۱۷] تأثیر مورفولوژی نانوذرات را بر میدان جریان و انتقال حرارت یک کلکتور خورشیدی صفحه‌تخت در مناطق گرمسیر بررسی کردند. آن‌ها به‌منظور دستیابی به حداکثر بازده حرارتی از داده‌های موجود در شرایط جغرافیایی با شدت تابش خورشیدی بالا استفاده نمودند. براساس نتایج گزارش‌شده توسط آن‌ها موقعیت جغرافیایی در بازده کلکتور خورشیدی بسیار مؤثر است و می‌تواند تا حد بالایی آن را افزایش دهد. همچنین مورفولوژی نانوذرات نقشی مهم افزایش عملکرد حرارتی دارند.

فهم و همکاران [۱۸] با استفاده از شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی تأثیر موانع مختلف مطابق با شکل‌های زیر را بر سر جریان عبوری از لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی را بررسی کردند. آن‌ها اثر زاویه و پارامترهای هندسی موانع را بر افت فشار جریان، انتقال حرارت و بازده بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از موانع دیسکی شکل با زاویه ۹۰ درجه به بهترین حالت ممکن برای بازده حرارتی دست یافتند.

زابلی و همکاران در مطالعه دیگری [۱۹]، یک کلکتور خورشیدی سهموی دارای فین‌های داخلی مارپیچی را بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که استفاده از نانوسیالات ترکیبی در مقایسه با آب خالص منجر به بازده بیشتر کلکتور می‌شود.

تعدادی از پژوهش‌های مختلف با محوریت استفاده از توربولاتور و مولد گردابه در کلکتورهای خورشیدی سهموی به‌لحاظ بهبود انتقال حرارت در اثر استفاده از سیال‌کاری و جزئیات شکل هندسی توربولاتور در جدول (۱) مورد مقایسه قرار گرفته است. درنهایت نوآوری‌ها و اهداف خاص مطالعه حاضر را عبارت‌اند از:

۱. طراحی مدل هندسی جدیدی از کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه؛
۲. بررسی تأثیر نسبت پیچش هندسه مولد گردابه بر عملکرد هیدرولیکی - حرارتی؛

۳. مدل‌سازی نانوسیال هیبریدی آب-اکسید آهن-نانولوله کربنی با رویکرد دوفازی و به‌صورت جریان آشفته با مدل Realizable k-ε

۴. بررسی همزمان تحلیل هیدرودینامیکی، انرژی و انرژی در کلکتور خورشیدی سهموی با مولدهای گردابه نوآورانه.

۲. مدل هندسی و معادلات حاکم

۲.۱. مدل هندسی کلکتور خورشیدی سهموی مجهز

به ورتکس ژنراتور

انرژی خورشیدی بر ادامه حیات بشر تأثیر می‌گذارد و کاهش و افزایش آن منجر به تأثیرات قابل توجه بر کره زمین می‌شود. البته امروزه پیشرفت فناوری، انسان را به‌سمت به‌کارگیری این انرژی

همچنین یکی از فازها (فاز اولیه) پیوسته در نظر گرفته می شود و فرض می شود که دیگر فازها (فاز ثانویه) در فاز پیوسته پراکنده می شوند [۳۰]. این روش نسبت به روش تک فاز از هزینه های محاسباتی بیشتری برخوردار است؛ زیرا در روش تک فاز در نظر گرفتن فرض تعادل حرارتی فاز سیال و نانوذرات منجر به کاهش زمان محاسباتی می شود [۳۱]. مدل مخلوط برای دو یا تعداد بیشتری از فازها که می تواند سیال یا ذره باشد، طراحی شده است [۳۱]. مدل مخلوط معادله ممتوم مخلوط را حل می کند و سرعت های نسبی را تعیین کرده تا فازهای پراکنده را توصیف کند. مطابق بررسی های صورت گرفته شده توسط پژوهشگران استفاده از مدل مخلوط باعث کاهش هزینه های محاسباتی می شود [۳۲]؛ زیرا در مدل مخلوط تعداد معادلات کمتری نسبت به سایر مدل ها حل می شوند. معادلات حاکم بر مسئله حاضر به صورت زیر بازنویسی می شوند [۳۳ و ۳۴]:

$$\nabla \cdot \vec{V}_m = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \nabla_{pm} \cdot \vec{V}_m \vec{V}_m = & \nabla \cdot \mu_m \nabla \vec{V}_m \\ & + \nabla \cdot \left[\sum_{k=1}^n \phi_p \rho_k \vec{V}_{dr,k} \right] \\ & + (\rho \beta)_m (T - T_h) g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \left[\sum_{k=1}^n (\rho_k c_{pk}) \phi_k \vec{V}_m T \right] = \nabla \cdot k_m \nabla T - \nabla \cdot q_r \quad (3)$$

$$\vec{V}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \vec{V}_m}{\rho_m} \quad (4)$$

$$\vec{V}_{dr,k} = \vec{V}_k - \vec{V}_m \quad (5)$$

$$\vec{V}_{pf} = \vec{V}_p - \vec{V}_f \quad (6)$$

$$\vec{V}_{dr,p} = \vec{V}_{pf} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} \vec{V}_{fk} \quad (7)$$

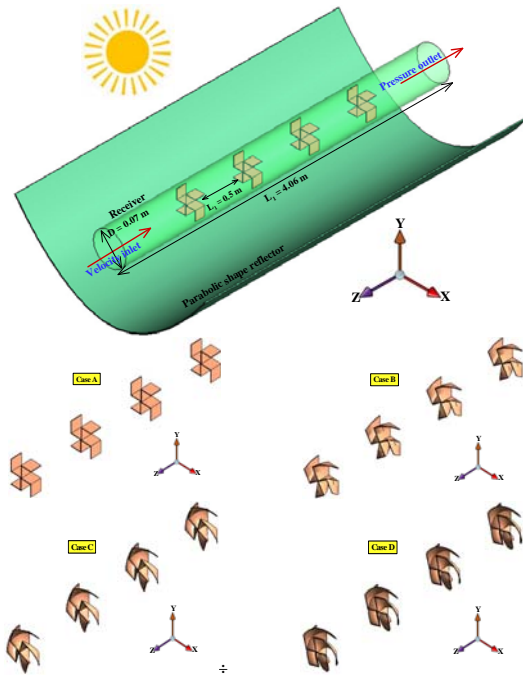
$$\vec{V}_{pf} = \frac{\rho_p d_p^2 (\rho_p - \rho_m)}{18 \mu_f f_{drag} \rho_p} (g - (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m) \quad (8)$$

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re_p^{0.687} & (Re_p \leq 1000) \\ 0.0183 Re_p & (Re_p > 1000) \end{cases} \quad (9)$$

۲.۳. مدل سازی جریان آشفته

جریان توربولانس ذاتاً یک پدیده تصادفی است؛ در نتیجه نمی توان اثرات مدل سازی توربولانس را به صورت کامل در شبیه سازی های عددی مشاهده کرد. به همین دلیل برای مشاهده اثرات توربولانس و آشفتگی در دینامیک سیالات محاسباتی، مدل های مختلفی ارائه شده است تا کاربر با استفاده از آن بتواند مناسب ترین مدل برای شبیه سازی خود را انتخاب کند. برای بررسی جریان آشفته مدل های توربولانسی

رایگان ترغیب می کند. انرژی خورشیدی که توسط پنل ها و کلکتورهای خورشیدی ایجاد می شود، در کاهش هزینه ها تأثیر چشمگیری می گذارد؛ زیرا با نصب پنل و کلکتورهای خورشیدی، میزان مصرف انرژی به منظور گرم کردن آب یا روشنایی به حداقل خواهد رسید. مطالعه حاضر با هدف افزایش بازده حرارتی در کلکتور خورشیدی سهموی انجام شده است. در واقع در این مطالعه از روش های انتقال حرارت در سیستم های حرارتی به منظور افزایش بازده حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی با در نظر گرفتن افت فشار و ضریب اصطکاک منطقی استفاده شده است. تصویر کلکتور خورشیدی سهموی که در مطالعه حاضر مورد شبیه سازی عددی قرار می گیرد، در شکل (۱) ارائه شده است. همان طور که دیده می شود، این کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی جدیدی است. این ورتکس ژنراتورها در شرایط مختلف هندسی از نسبت پیچش مورد شبیه سازی عددی قرار گرفته و تأثیر حضور آن بر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرد.

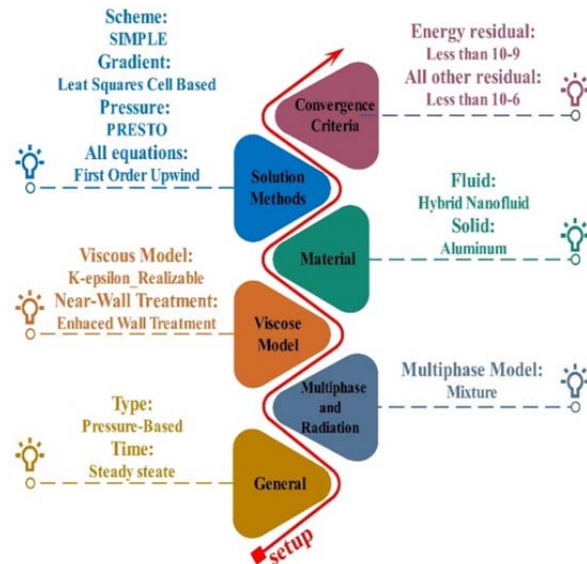


شکل (۱): طرحواره هندسه کلکتور خورشیدی سهموی مجهز شده به ورتکس ژنراتور

۲.۲. معادلات حاکم بر مسئله

در این مسئله، برای مدل سازی رفتار جریان نانوسیال هیبریدی آب/اکسید آهن-نانولوله کربنی از روش دوفازی استفاده می شود. در روش دوفازی برخلاف روش تک فاز سرعت لغزشی بین نانوذرات و سیال پایه تأثیرگذار بوده و ناچیز نیست [۳۰]. در جریان های دوفازی یک فاز اولیه (اصلی) و یک فاز ثانویه تعریف می شود.

خواص رسانایی الکتریکی و حرارتی نشان می‌دهند، به کار برده شود. به همین دلیل جذابیت زیادی برای کاربردهای متنوع پیدا می‌کنند. در این مطالعه برای محاسبه چگالی، هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی ویژه و لزجت برای نانوسیال هیبریدی دوفازی به ترتیب از روابط (۱۸) تا (۲۱) استفاده شده است [۳۶]. همچنین مشخصات ترموفیزیکی نانوذرات و سیال پایه آب به ترتیب در جداول (۲) و (۳) نشان داده شده است [۳۷ و ۳۸].



شکل (۲): تنظیمات عددی در مسئله حاضر [۱۴].

$$\rho_{eff} = \left(\frac{\phi}{100}\right)\rho_p + \left(1 - \frac{\phi}{100}\right)\rho_f \quad (18)$$

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = 1.2035 \left[\left(0.001 + \frac{\phi}{100}\right)^{0.0098} \left(0.001 + \frac{T_{nf}}{90}\right)^{0.1331} \left(0.001 + \frac{d_p}{170}\right)^{-0.0001} \left(0.01 + \frac{\alpha_p}{\alpha_f}\right)^{0.0154} \right] \quad (19)$$

$$C_{eff} = \frac{\left(\frac{\phi}{100}\right)(\rho C)_p + \left(1 - \frac{\phi}{100}\right)(\rho C)_f}{\rho_{eff}} \quad (20)$$

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_f} = 0.3659 \times \exp \left[\left(1 + \frac{\phi}{100}\right)^{10.83} \left(\frac{T_{nf}}{90}\right)^{-0.0239} \left(1 + \frac{d_p}{170}\right)^{-0.1609} \right] \quad (21)$$

جدول (۲): مشخصات نانوذرات [۳۷ و ۳۸]

Fe ₃ O ₄	CNT	خواص
۵۲۰۰	۶۶۰۰	$\rho (kg.m^{-3})$
۶۷۰	۴۲۵	$c_p (J.kg^{-1}.K^{-1})$
۶	۲۶۰۰	$k (W.m^{-1}.K^{-1})$

فراوانی وجود دارد. در هر هندسه و شرایط مرزی مدلی مناسب و کارا خواهد بود که اغلب از طریق تجربه و تست عددی می‌توان مدل مناسب را انتخاب کرد. با توجه به تست‌های عددی انجام‌شده و بررسی مطالعات پیشین، در هندسه مورد بررسی با حضور ورتکس ژنراتورها مدل Realizable k-ε مناسب‌ترین مدل از نظر همگرایی و هزینه محاسباتی است. لذا در مطالعه حاضر از این مدل استفاده می‌شود.

اثر تابش تشعشع خورشیدی به صورت شار حرارتی ثابت به مقدار ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر جریان نانوسیال هیبریدی در محدوده اعداد رینولدز ۲۴۰۰۰ تا ۹۶۰۰۰ که مربوط به رژیم جریان توربولنت است، بررسی می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، برای مدل‌سازی جریان توربولنت از مدل لزجت Realizable k-ε استفاده شده که از رابطه (۱۰) تا (۱۷) قابل محاسبه است [۳۵].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \epsilon \rho) + C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{K + \sqrt{\nu \epsilon}} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \right] + \epsilon S_{C_1} \rho \\ + G_b \frac{\epsilon}{K} C_{3e} C_{1e} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\lambda = S \frac{K}{\epsilon} \quad (11)$$

$$C_1 = \max \left(\frac{\lambda}{\lambda + 5}, 0.43 \right) \quad (12)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (K u_j) = G_k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial K}{\partial x_j} \left((\sigma_k)^{-1} \mu_t + \mu \right) \right] + G_b - \epsilon \rho \quad (13)$$

$$G_k = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (14)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (15)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (16)$$

$$S = (2S_{ij} S_{ij})^{0.5} \quad (17)$$

۲.۴. مدل‌سازی عددی و نانوسیال هیبریدی

به منظور شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار فلونت نت نسخه ۲۰۲۱ استفاده شده و نحوه تنظیمات شکل (۲) ارائه شده است. علاوه بر این، در مطالعه حاضر از نانوذرات اکسید آهن و نانولوله کربنی در سیال پایه آب استفاده شده است. اکسیدها به‌ویژه اکسید آهن از مهم‌ترین نانوذرات مغناطیسی هستند. زمانی که قطر آن‌ها به کمتر از یک قطر بحرانی برسد، خواص ابرپارامغناطیسی پیدا می‌کنند. همچنین تمایل طبیعی نانولوله‌ها به نشستن در کنار یکدیگر به کمک نیروهای بین‌مولکولی، می‌تواند در تولید مواد فوق‌مقاوم و کم‌وزنی که

جدول (۳): مشخصات آب

آب	خواص
۹۹۸/۲	$\rho (kg.m^{-3})$
۴۱۸۲	$c_p (J.kg^{-1}.K^{-1})$
۰/۶	$k (W.m^{-1}.K^{-1})$
۰/۰۰۱۰۰۳	$\mu (kg.m^{-1}.s^{-1})$

۲.۵. معادلات هیدرولیکی و حرارتی

بررسی معادلات هیدرولیکی حرارتی شامل تعیین مقادیر انتقال حرارت و افت فشار یا ضریب اصطکاک در کلکتور خورشیدی مورد مطالعه است. تحلیل هیدرولیکی حرارتی با استفاده از معادلات (۲۲) تا (۲۶) انجام می‌شود. همان‌طور که بیان شد، مطالعه با فرض پایا و در نظر گرفتن رژیم توربولنت انجام شده است. همچنین محدوده اعداد رینولدز در این مطالعه بین ۲۴۰۰۰ تا ۹۶۰۰۰ است. علاوه بر این به منظور کاربردی تر شدن مطالعه حاضر مقادیر بازده انرژی و آگرژی با استفاده از معادلات (۲۷) و (۳۰) مورد بررسی قرار می‌گیرند [۳۹] و [۴۰].

$$Re_{HNF} = \frac{\bar{U}_m d_p \rho_{HNF}}{\mu_{HNF}} \quad (22)$$

$$\Delta P = P_{av,inlet} - P_{av,outlet} \quad (23)$$

$$f = \frac{2}{\left(\frac{L_2}{D_h}\right)} \frac{\Delta P}{\rho_{hnf} u_m^2} \quad (24)$$

$$Nu = \frac{h_{nf} \cdot D_i}{k_{nf}} \quad (25)$$

$$PEC = \left(\frac{Nu_{av,nf}}{Nu_{av,f}}\right) \cdot \left(\frac{f_{nf}}{f_f}\right)^{-1/3} \quad (26)$$

$$\eta_{en} = \frac{E_c}{I \cdot A} = \frac{Q_{in} \cdot \rho_{in} \cdot c_{p,in} \cdot (T_{out} - T_{in})}{6 \cdot 10^4 \cdot I \cdot A} \quad (27)$$

$$E_u = Q_u - \dot{m} c_p T_0 \ln\left(\frac{T_{Outlet}}{T_{Inlet}}\right) \quad (28)$$

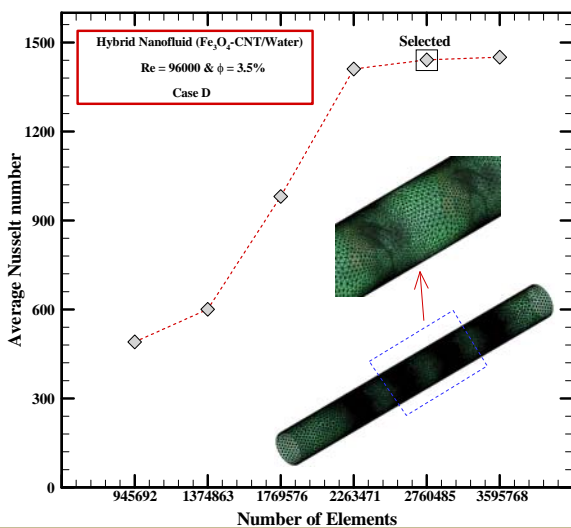
$$E_s = Q_s \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}}\right)\right] \quad (29)$$

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} \quad (30)$$

۳. استقلال از نتایج شبکه

با توجه به اینکه در مطالعه حاضر از روش حجم محدود برای حل معادلات حاکم بر مسئله استفاده شده است، باید یک شبکه بر روی دامنه حل ایجاد شود. رعایت نکردن مراحل انجام شبکه‌بندی مناسب در روش حجم محدود بر روی همگرایی مسئله تأثیرگذار

است. به عبارت بهتر، اگر هندسه مورد مطالعه در روش حجم محدود بدون داشتن شبکه‌بندی وارد نرم‌افزار فلوئنت گردد، باعث می‌شود که کامپیوتر قادر به شبیه‌سازی و انجام پردازش نباشد؛ زیرا معادلات حاکم بر مسئله نمی‌توانند بر روی مدل هندسی بدون داشتن شبکه‌بندی اعمال شوند. در مسئله حاضر هندسه کلکتور خورشیدی به‌همراه مولد گردابه با شکل هندسی Case D برای بررسی آزمون استقلال از شبکه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مقادیر به‌دست‌آمده از عدد ناسلت متوسط در آزمون استقلال از شبکه برای تعداد نقاط مختلف در شکل (۳) ارائه شده است. مطابق گزارش‌ها این آزمایش در شش مرحله مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق گزارش‌های ارائه‌شده در این مسئله شبکه با تعداد نقاط ۲۷۶۰۴۸۵ مناسب است. با توجه به مشاهده تصویر هندسه شبکه‌بندی‌شده از هندسه کلکتور خورشیدی سهموی می‌توان نتیجه گرفت که به‌منظور دقت بالا در گسسته‌سازی معادلات و همگرایی مناسب، شبکه تا حدی بالایی ریز شده است.

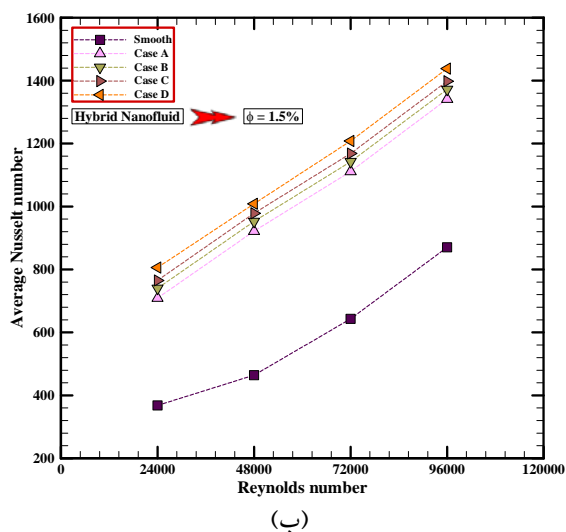
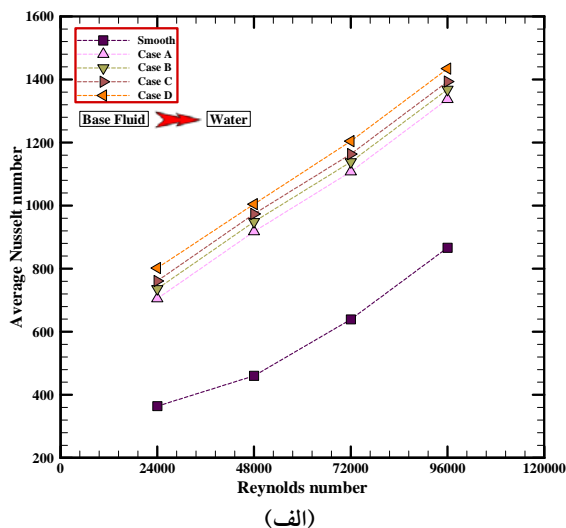


شکل (۳): استقلال از نتایج شبکه در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به ورتکس ژنراتور

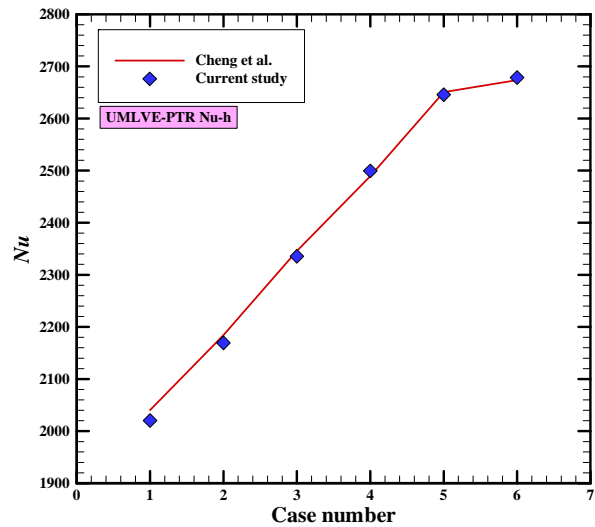
۴. اعتبارسنجی

در مطالعه حاضر برای انجام اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با مطالعه چنگ و همکاران [۴۱] مورد مقایسه قرار گرفته است. چنگ و همکاران [۴۱] با استفاده از روش عددی به بررسی اثر مولد گردابه بر میدان جریان و انتقال حرارت در لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی در مطالعه حاضر با نتایج مطالعه تجربی چنگ و همکاران [۴۱] برای مقادیر به‌دست‌آمده از عدد ناسلت و با یکدیگر مقایسه شده و در شکل (۴) ارائه شده است. با بررسی این نتایج می‌توان بیان کرد که

به صورت لایه ای است؛ اما هنگامی که لوله جاذب مجهز به مولد گردابه مجهز می شود، نانوسیال هیبریدی هنگام برخورد با آن ها دچار انحراف شده و این عامل باعث تغییر در فرم خطوط جریان و تغییرات رفتار جریان در زیر لایه لزج می شود. همچنین نتایج بیانگر آن است که پراکنده کردن نانوذرات اکسید آهن و نانولوله کربنی در سیال پایه آن به میزان قابل توجهی در ماهیت فیزیکی سیال پایه تأثیرگذار بوده و باعث تغییرات مثبت در کلکتور خورشیدی سهموی شده است. علاوه بر این افزایش کسرحجمی نانوذرات نیز همواره باعث افزایش عملکرد حرارتی در کلکتور خورشیدی سهموی شده است. همان طور که مشاهده می شود، با تغییر شکل هندسی ورتکس ژنراتورها مقادیر عدد ناسلت متوسط تغییراتی محسوسی از خود نشان داده است. در واقع می توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت پیشش مولد گردابه میزان نوسانات و اختلاط ناشی از برخورد نانوسیال هیبریدی با بدنه مولد گردابه بیشتر شده و در نهایت میزان ضریب انتقال حرارت جابه جایی بالاتر می رود.



روش عددی که در مطالعه حاضر استفاده شده از دقت بالایی برخوردار است.



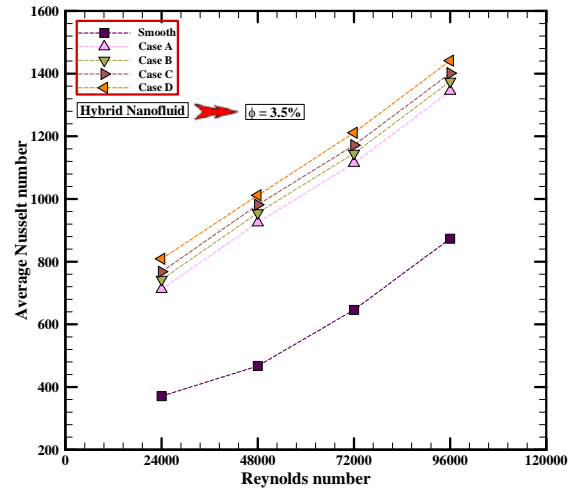
شکل (۴): اعتبارسنجی شبیه سازی عددی با مطالعه چنگ و همکاران [۴۱]

۵. نتایج و بحث

۵.۱. تأثیر تغییر شکل هندسی مولد گردابه بر عدد ناسلت متوسط

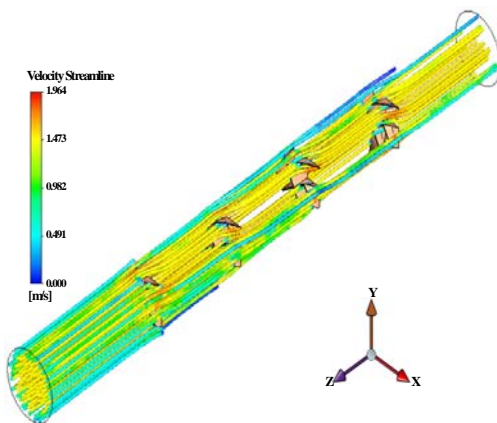
تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در (الف) سیال پایه آب، (ب) کسرحجمی ۱/۵ درصد و (ج) کسرحجمی ۳/۵ درصد در شکل (۵) نشان داده شده است. با تفسیر نتایج می توان بیان نمود که روند تغییرات سرعت و افزایش آن دستاورد مثبتی را در عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی ایجاد کرده است؛ زیرا همان طور که مشاهده می شود، با افزایش این پارامتر مقادیر عدد ناسلت متوسط با شیب بسیار قابل توجهی در حال افزایش است. همچنین تغییرات ارائه شده بیان می کند زمانی که کلکتور خورشیدی ساده (بدون ورتکس ژنراتور) باشد، عملکرد حرارتی کمترین میزان خود را دارد. می توان مشاهده کرد که با مجهز کردن لوله جاذب کلکتور خورشیدی به مولد گردابه مقادیر عدد ناسلت متوسط به وضوح و با اختلاف بالایی نسبت به زمانی که کلکتور خورشیدی ساده (بدون ورتکس ژنراتور) است، افزایش پیدا می کند. با توجه به فیزیک مسئله می توان فرض کرد که عامل اصلی این تغییرات تشکیل گردابه و چرخش آن هاست؛ زیرا نانوسیال هیبریدی آب/اکسید آهن - نانولوله کربنی در حالتی که سطح لوله صاف و بدون مولد گردابه است، مسیر مستقیمی را طی کرده و تقریباً می توان گفت فرم جریان

کانتورهای مربوط به خطوط جریان برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسرحجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D در شکل (۶) نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد وجود مولد گردابه در تغییر فرم خطوط جریان بسیار اثرگذار است. همچنین تغییر شکل هندسی (افزایش نسبت پیشش) باعث شده که جریان نانوسیال هیبریدی با سطح بیشتری از ورتکس ژنراتورها در تماس باشد و در نتیجه خطوط جریان تراکم بیشتری داشته باشند. در واقع هرچه قدر نسبت پیشش ورتکس ژنراتورها بیشتر باشد، باعث تراکم بیشتر خطوط جریان و در نتیجه بیشتر شدن سرعت و دبی می شود. در نهایت وجود اختلاط ناشی از حضور ورتکس ژنراتورها باعث افزایش عملکرد حرارتی در سیستم خورشیدی می گردد.

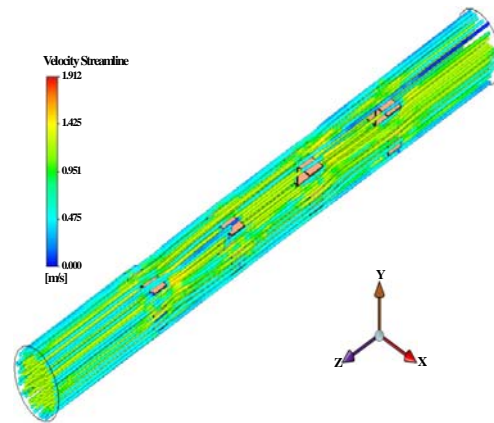


(ج)

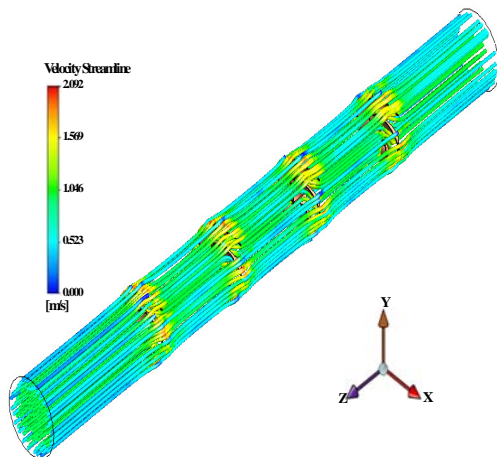
شکل (۵): تغییرات عدد ناسلت متوسط برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در (الف) سیال پایه آب، (ب) کسرحجمی ۱/۵ درصد و (ج) کسرحجمی ۳/۵ درصد



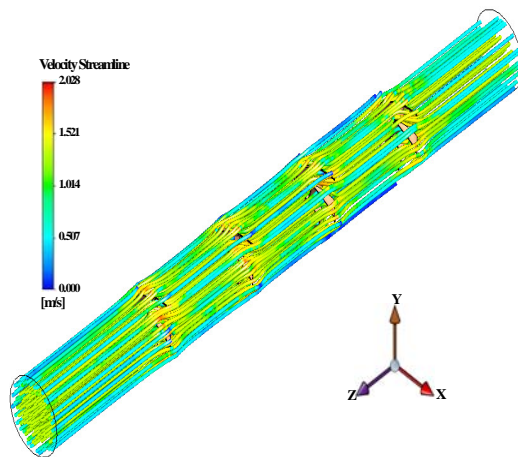
(ب)



(الف)



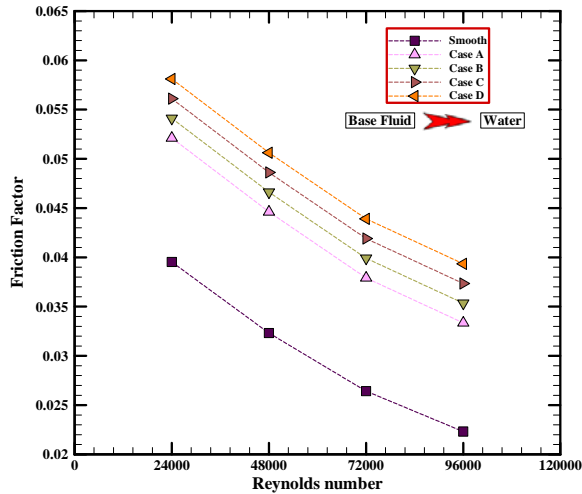
(د)



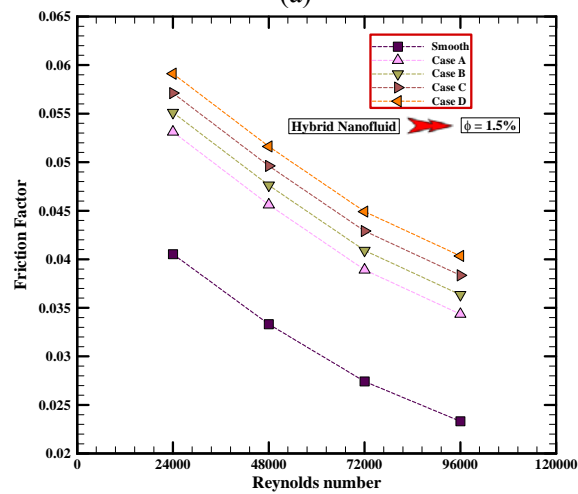
(ج)

شکل (۶): کانتورهای مربوط به خطوط جریان برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسرحجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D

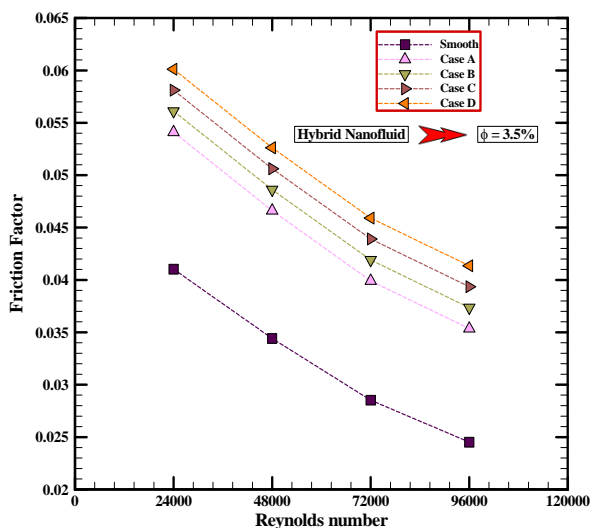
۵.۲. تأثیر تغییر شکل هندسی مولد گردابه بر ضریب اصطکاک



(a)



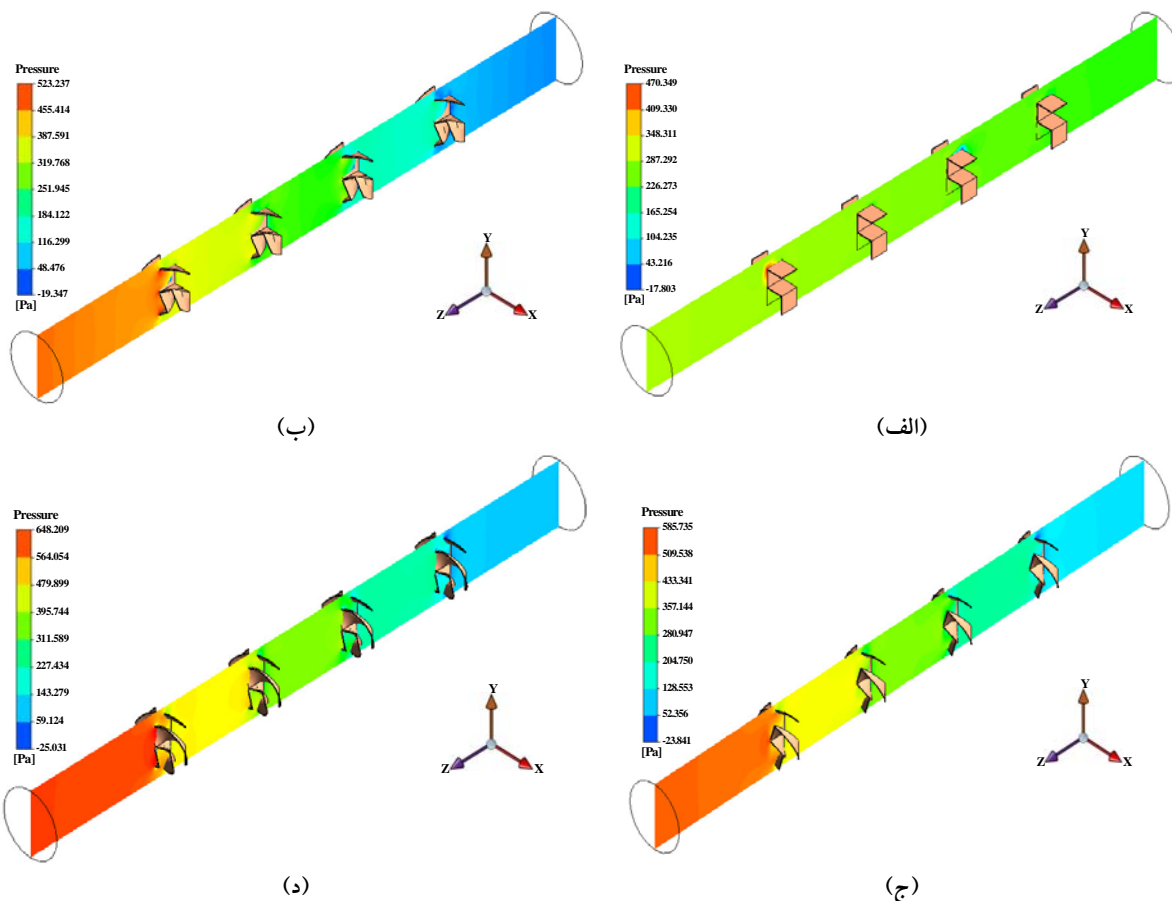
(b)



(c)

شکل (۷): تغییرات ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در (الف) سیال پایه آب، (ب) کسر حجمی ۱/۵ درصد و (ج) کسر حجمی ۳/۵ درصد

بررسی ضریب اصطکاک در سیستم‌های حرارتی از اهمیت بالایی برخوردار بوده و همواره در صنعت مهندسی مورد توجه قرار دارد. زمانی که در مطالعات از روش‌های افزایش انتقال حرارت استفاده می‌شود، بررسی این پارامتر از آن‌رو دارای اهمیت است که باعث می‌شود نیروهای ایجادشده ناشی از حضور ورتکس ژنراتورها در خلاف جهت جریان نانوسیال هیبریدی مشخص شود. در نتیجه می‌توان بیان نمود که اصطکاک نقش مهمی در بسیاری از فرایندهای صنعتی مربوط به نحوه شروع حرکت یک جسم، تغییر جهت یا توقف آن دارد. شکل (۷) تغییرات ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در (الف) سیال پایه آب، (ب) کسر حجمی ۱/۵ درصد و (ج) کسر حجمی ۳/۵ درصد را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که افزودن نانوذرات اکسید آهن و نانولوله کربنی در سیال پایه به میزان قابل توجهی در ماهیت فیزیکی سیال پایه تأثیرگذار بوده و باعث افزایش ضریب اصطکاک در کلکتور خورشیدی سهموی شده است؛ زیرا همان‌طور که در نتایج مشخص است، افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث بالا رفتن نیروی مقاوم به حرکت نانوسیال هیبریدی آب/اکسید آهن - نانولوله کربنی می‌شود. علاوه بر این مورد، روند تغییرات سرعت و افزایش آن مقادیر ضریب اصطکاک را در کلکتور خورشیدی به میزان محسوسی کاهش داده است. این درحالی است که افزایش نسبت پیچش ورتکس ژنراتورها (تغییر شکل هندسی) روند تغییرات معکوسی نسبت به سرعت داشته و با افزایش آن‌ها مقادیر ضریب اصطکاک افزایش یافته است. شکل (۸) کانتورهای مربوط به افت فشار برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسر حجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D را نشان می‌دهد. با تفسیر نتایج می‌توان به این نکته رسید که دلیل اصلی و قابل توجه در افزایش افت فشار، وجود ورتکس ژنراتورها در مسیر جریان نانوسیال هیبریدی در لوله جاذب کلکتور خورشیدی سهموی است؛ البته پراکنده کردن نانوذرات اکسید آهن و نانولوله کربنی در سیال پایه به دلیل بالا بردن لزجت هم در افزایش افت فشار تأثیرگذار است؛ اما وجود ورتکس ژنراتورها و افزایش نسبت پیچش آن‌ها تأثیرات قابل توجه‌تری بر افت فشار در کلکتور خورشیدی سهموی دارند.



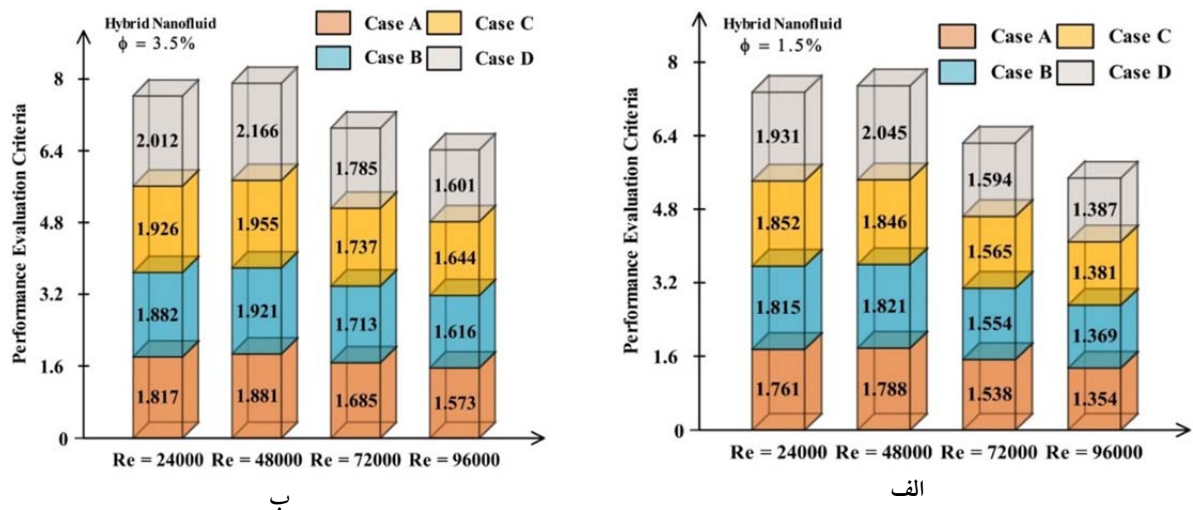
شکل (۸): کانتورهای مربوط به افت فشار برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسر حجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D

مختلف از نسبت پیچش در شکل (۹) ارائه شده است. با قطعیت می‌توان بیان نمود که استفاده از ورتکس ژنراتورها میزان عملکرد حرارتی بالاتری در مقایسه با افت فشار یا ضریب اصطکاک در کلکتور خورشیدی سهموی را حاصل کرده است.

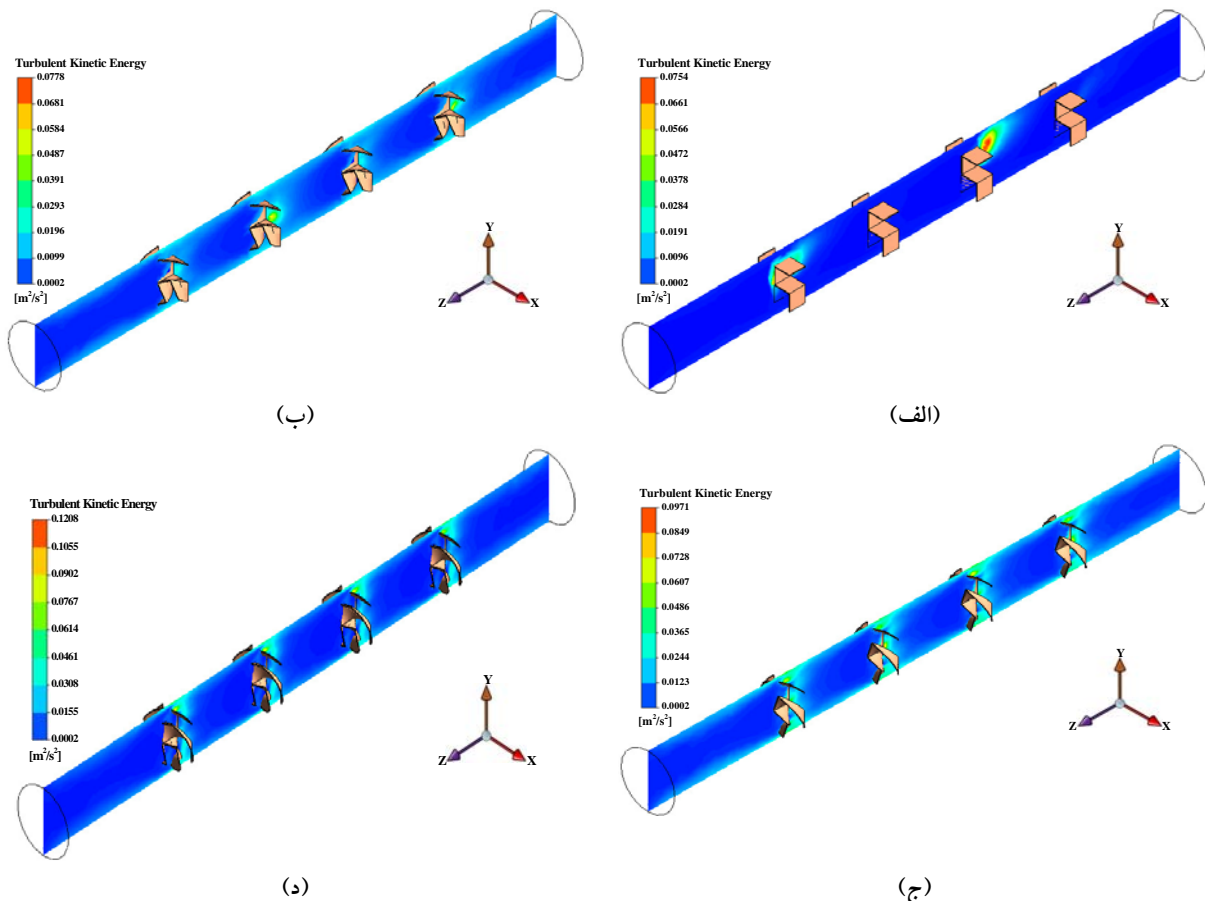
شکل (۱۰) کانتورهای مربوط به انرژی جنبشی آشفته برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسر حجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D نشان داده شده است. به‌وضوح دیده می‌شود که بیشتر شدن نسبت پیچش ورتکس ژنراتورها باعث بیشتر شدن نواحی زردرنگ در تصاویر شده است. در واقع هرچه قدر این نواحی زرد رنگ بیشتر باشد، انرژی جنبشی آشفته بالاتر است. می‌توان بیان نمود انرژی جنبشی آشفته‌گی به شدت تحت تأثیر حضور ورتکس ژنراتورها و افزایش نسبت پیچش آن‌هاست.

۵.۳. تأثیر تغییر شکل هندسی مولد گردابه بر ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی

در این مطالعه به منظور کاربردی‌تر شدن نتایج خروجی شاخص ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه بررسی شده است. بررسی این پارامتر باعث درک بهتر پدیده‌های فیزیکی ایجادشده ناشی از حضور مولد گردابه در کلکتور خورشیدی سهموی می‌شود؛ زیرا همان‌طور که قبلاً هم بیان شد، هدف این مطالعه افزایش بازده حرارتی کلکتور خورشیدی سهموی به‌واسطه استفاده از مولد گردابه بوده است. افزایش انتقال حرارت همواره یک عامل مثبت در سیستم‌های حرارتی محسوب می‌شود؛ این درحالی است که استفاده از این ورتکس ژنراتورها باعث بالا رفتن مقادیر ضریب اصطکاک و افت فشار نیز می‌شوند. بررسی این پارامتر کمک می‌کند که میزان تغییرات انتقال حرارت ناشی از حضور ورتکس ژنراتورها نسبت به افت فشار ناشی از حضور آن‌ها مشخص گردد. مقادیر شاخص ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی



شکل (۹): تغییرات ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در (الف) سیال پایه آب، (ب) کسرحجمی ۱/۵ درصد و (ج) کسرحجمی ۳/۵ درصد

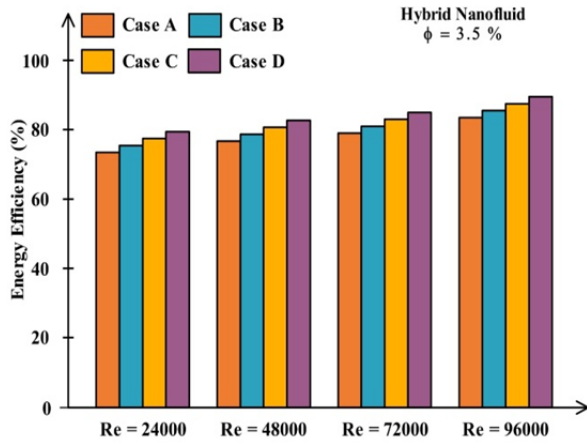


شکل (۱۰): کانتورهای مربوط به انرژی جنبشی آشفته برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسرحجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D

سیستم‌های حرارتی آگاهی از اثربخشی و بازده است. اگرچه تعریف بازده انرژی شامل مفهوم سودمندی است، این بازده به‌عنوان یک اصطلاح تکنیکی یا فیزیکی در مسائل مهندسی در نظر گرفته می‌شود.

۵.۴. تأثیر تغییر شکل هندسی مولد گردابه بر بازده انرژی
 بررسی بازده انرژی همواره به‌عنوان یک پارامتر اساسی در سیستم‌های مهندسی است. به عبارت بهتر، هدف از بررسی بازده انرژی در

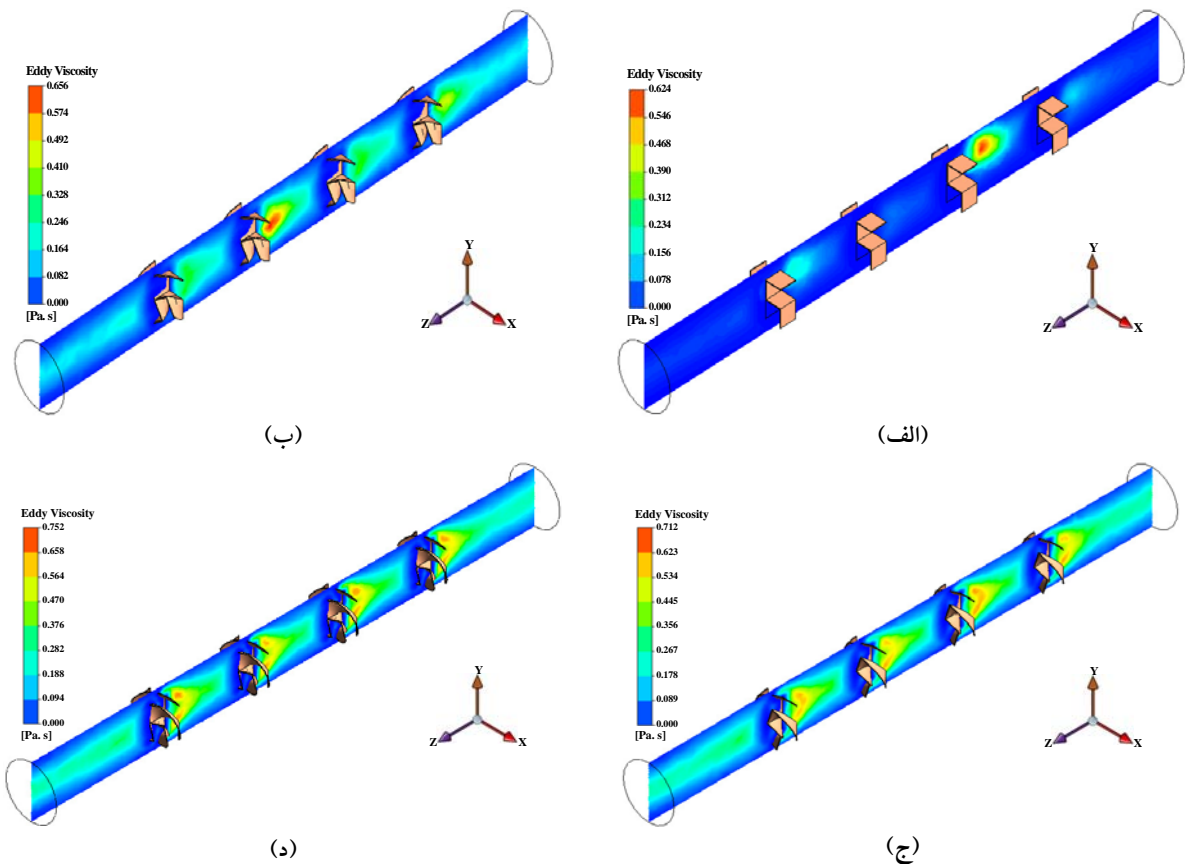
چرخش جریان نانوسیال هیبریدی در مابین تیغه‌های مولد گردابه بیشترین مقدار بوده و با فاصله گرفتن از آن به سمت مرکز کلکتور خورشیدی سهموی کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان بیان نمود که فشار نانوسیال هیبریدی در مرکز یک گردابه کمترین مقدار را دارد؛ این درحالی است که سرعت در مرکز آن ماکزیمم است.



شکل (۱۱): تغییرات بازده انرژی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در کسر حجمی ۳/۵ درصد

شکل (۱۱) تغییرات بازده انرژی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در کسر حجمی ۳/۵ درصد را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج خروجی و تفسیر آن‌ها می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ورتکس ژنراتورها و افزایش نسبت پیچش آن‌ها نقش مطلوبی در بالا بردن بازده انرژی در کلکتور خورشیدی سهموی داشته است. همان‌طور که دیده می‌شود، مقادیر بازده انرژی در یک حالت هندسی ثابت از ورتکس ژنراتورها با افزایش عدد رینولدز تغییرات محسوسی از خود نشان می‌دهد.

شکل (۱۲) کانتورهای مربوط به لزجت گردابی برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسر حجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D را نشان می‌دهد. با مشاهده تصاویر این نتیجه حاصل می‌شود که حضور ورتکس ژنراتورها در مسیر جریان نانوسیال هیبریدی منجر به ایجاد گردابه‌هایی در مابین تیغه‌های مولد گردابه شده است. در واقع این گردابه‌ها حول یک محور ثابت در حال چرخش است. هرچقدر نسبت پیچش ورتکس ژنراتورها افزایش پیدا کرده، شدت چرخش گردابه‌ها بیشتر و بزرگ‌تر شده است. سرعت



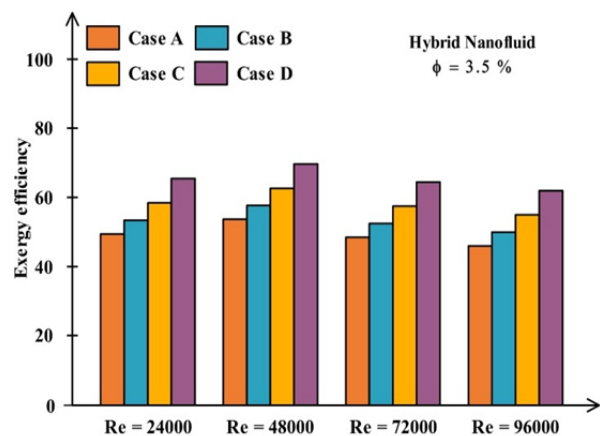
شکل (۱۲): کانتورهای مربوط به لزجت گردابی برای نانوسیال هیبریدی دوفازی در کسر حجمی ۳/۵ درصد و عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی در (الف) شکل هندسی Case A، (ب) شکل هندسی Case B، (ج) شکل هندسی Case C و (د) شکل هندسی Case D

کلکتور خورشیدی سهموی پرداخته می‌شود. همچنین نانوسیال هیبریدی آب/اکسید آهن-نانولوله کربنی با فرض رویکرد دوفازی در اعداد رینولدز ۲۴۰۰۰ تا ۹۶۰۰۰ درون کلکتور خورشیدی به‌عنوان سیال انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد. ورتکس ژنراتورها با چهار حالت هندسی Case A, Case B, Case C و Case D میلی‌متر مورد مدل‌سازی قرار گرفته و تأثیر آن‌ها بر پارامترهای مختلف در خروجی کلکتور خورشیدی سهموی مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج شاخص عبارت‌اند از:

- به‌کارگیری ورتکس ژنراتورها در لوله جاذب کلکتور خورشیدی باعث می‌شود جریان نانوسیال هیبریدی هنگام طی کردن مسیر لوله جاذب دچار تغییر شکل و اختلاط گردد. این امر به تشکیل گردابه و ماهیت نوسانی کمک کرده و باعث بالا رفتن ضریب انتقال حرارت و در نتیجه افزایش بازده حرارتی در کلکتور خورشیدی سهموی می‌گردد.
- هرچقدر نسبت پیچش ورتکس ژنراتورها بیشتر باشد، باعث تراکم بیشتر خطوط جریان و در نتیجه بیشتر شدن سرعت و دبی می‌گردد.
- بیشترین میزان افزایش عملکرد حرارتی مربوط به مولد گردابه با حالت هندسی Case D است. درحقیقت در این حالت عملکرد حرارتی به‌میزان ۶۵/۰۳ درصد نسبت به زمانی که کلکتور خورشیدی سهموی ساده (بدون ورتکس ژنراتور) است، افزایش پیدا می‌کند.
- با استناد به نتایج عددی ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی می‌توان بیان نمود که حضور ورتکس ژنراتورها و تغییر شکل هندسی آن‌ها به‌لحاظ عملکرد هیدرولیکی حرارتی مناسب است؛ زیرا استفاده از ورتکس ژنراتورها میزان عملکرد حرارتی بالاتری در مقایسه با افت فشار یا ضریب اصطکاک در کلکتور خورشیدی سهموی را حاصل کرده است.
- افزایش نسبت پیچش ورتکس ژنراتورها میزان اثربخشی و بازده انرژی را در کلکتور خورشیدی سهموی تحت‌تأثیر قرار می‌دهد و بالا می‌برد. مطلوب‌ترین میزان بازده انرژی در عدد رینولدز ۹۶۰۰۰ و هنگام استفاده از مولد گردابه با شکل هندسی Case D رخ می‌دهد.
- مطلوب‌ترین میزان بازده آگرژی در عدد رینولدز ۴۸۰۰۰ و هنگام استفاده از مولد گردابه با شکل هندسی Case D است. به عبارت بهتر، حداکثر کار قابل دسترس در کلکتور خورشیدی مورد مطالعه در این شرایط حاصل می‌شود.

۵.۵. تأثیر تغییر شکل هندسی مولد گردابه بر بازده آگرژی

بررسی بازده آگرژی به سیستم‌های مهندسی کمک می‌کند که به شناخت شرایط هندسی و مرزی که حداکثر کار در آن قابل استفاده است، دست پیدا کنند. به بیان بهتر می‌توان فرض نمود که آگرژی اندازه‌گیری کیفیت انرژی است. شکل (۱۳) تغییرات بازده آگرژی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در کسر حجمی ۳/۵ درصد را نشان می‌دهد. با بررسی نتایج عددی به‌دست‌آمده می‌توان بیان نمود که مقادیر بازده آگرژی تحت‌تأثیر دو پارامتر تغییر شکل هندسی مولد گردابه و سرعت ورودی قرار دارد. این درحالی است که در تمامی اعداد رینولدز با تغییر شکل هندسی مولد گردابه (افزایش نسبت پیچش) مقادیر بازده آگرژی افزایش یافته است. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات بازده آگرژی از رینولدز ۴۸۰۰۰ به بعد کاهش می‌توان نتیجه گرفت که حداکثر کار قابل استفاده و در دسترس کلکتور خورشیدی در رینولدز ۴۸۰۰۰ است.



شکل (۱۳): تغییرات بازده آگرژی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی مجهز به مولد گردابه با حالت هندسی مختلف در کسر حجمی ۳/۵ درصد

۶. نتیجه‌گیری

خورشید یک منبع تجدیدناپذیر است که به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک کرده و تأثیر صنایع را بر آلودگی طبیعت کم می‌کند. این انرژی برخلاف سوخت‌های فسیلی مانند زغال‌سنگ و نفت به‌طور مستقیم منجر به انتشار آلاینده‌ها در هوا و آب نمی‌شود. بنابراین استفاده از انرژی خورشیدی در صنایع مختلف همواره از اهمیت بالایی برخوردار است. در مطالعه حاضر به بررسی تأثیرات استفاده از مولد گردابه در حالت‌های مختلف هندسی در لوله جاذب

- [1] Grald, E. W., Kuehn, T.H., "Performance analysis of a parabolic trough solar collector with a porous absorber receiver", Solar Energy, Vol. 42, pp. 281-292, 1989. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(89\)90030-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(89)90030-3).
- [2] Thundil Karuppa Raj, T. Srinivas, M. Natarajan, K. Arun Kumar, A. Chengappa and A. Deoras, "Experimental and numerical analysis using CFD technique of the performance of the absorber tube of a solar parabolic trough collector with and without insertion", International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, Vol. 12, pp. 550-556, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICEETS.2013.6533444>.
- [3] Marif, Y., Benmoussa, H., Bouguettaia, H., Belhadj, M.M., Zerrouki, M., "Numerical simulation of solar parabolic trough collector performance in the Algeria Saharan region", Energy Conversion and Management, Vol. 85, pp. 521-529, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.002>.
- [4] Rostami, S., Sepehrirad, M., Dezfulizadeh, A., Kadhim Hussein, A., Shahsavar Goldanlou, A., Safdari Shadloo, M., "Exergy Optimization of a Solar Collector in Flat Plate Shape Equipped with Elliptical Pipes Filled with Turbulent Nanofluid Flow: A Study for Thermal Management", Water, Vol. 12, pp. 2294, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12082294>
- [5] Pigozzo Filho, V.C., de Sá, A.B., Passos, J.C., Colle, S., "Experimental and Numerical Analysis of Thermal Losses of a Parabolic Trough Solar Collector", Energy Procedia, Vol. 57, pp. 381-390, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.191>.
- [6] Ghomrassi, A., Mhiri, H., Bournot, P., "Numerical Study and Optimization of Parabolic Trough Solar Collector Receiver Tube", J. Sol. Energy Eng. Vol. 137, pp. 106-116, 2015. <https://doi.org/10.1115/1.4030849>.
- [7] Shahsavar Goldanlou, A., Sepehrirad, M., Dezfulizadeh, A., Golzar, A., Badri, M., Rostami, S., "Effects of using ferromagnetic hybrid nanofluid in an evacuated sweep-shape solar receiver", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry Vol. 143, pp. 1623-1636, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09903-5>.
- [8] Rostami, S., Shahsavar, A., Kefayati, G., Shahsavar Goldanlou, A., "Energy and Exergy Analysis of Using Turbulator in a Parabolic Trough Solar Collector Filled with Mesoporous Silica Modified with Copper Nanoparticles Hybrid Nanofluid", Energies, Vol. 13, pp. 29-46, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13112946>.
- [9] Khetib, Y., Alahmadi, A., Alzaed, A., Sharifpur, M., Cheraghian, G., Siakachoma, C., "Simulation of a parabolic trough solar collector containing hybrid nanofluid and equipped with compound turbulator to evaluate exergy efficacy and thermal-hydraulic performance", Energy Science & Engineering, Vol. 10, pp. 4304-4317, 2022. <https://doi.org/10.1002/ese3.975>.
- [10] Nazir, M.S., Ghasemi, A., Dezfulizadeh, A. et al. "Numerical simulation of the performance of a novel parabolic solar receiver filled with nanofluid", J Therm Anal Calorim, Vol. 144, pp. 2653-2664, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10613-9>.
- [11] Varun, K., Chandavar Arunachala, U., "Thermo-hydraulic and exergy analysis of parabolic trough collector with wire matrix turbulator: an experimental investigation", International Journal of Exergy, Vol. 36, pp 125-149, 2021. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2021.118709>.
- [12] Khetib, Y., Alzaed, A., Alahmadi, A., Cheraghian, G., Sharifpur, M., "Application of hybrid nanofluid and a twisted turbulator in a parabolic solar trough collector: Energy and exergy models", Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 49, pp. 125-149, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101708>.
- [13] Khetib, Y., Melaibari, A., Alsulami, R., "The Influence of Combined Turbulators on the Hydraulic-Thermal Performance and Exergy Efficiency of MWCNT-Cu/Water Nanofluid in a Parabolic Solar Collector: A Numerical Approach", Frontiers in Energy Research, Vol. 9, pp. 716549, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.716549>.

- [14] Dezfulizadeh, A., Aghaei, A., Sheikhzadeh, G.A., "Comprehensive 3E analyses of a parabolic trough collector equipped with an innovative combined twisted turbulator", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 150, pp. 507-527, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.02.032>.
- [15] Shahzad Nazir, M., Shahsavar, A., Afrand, M., Arıcı, M., Nižetić, S., Ma, Z., Öztop, H.F., "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*, Vol. 45, pp. 101-103, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101103>.
- [16] Zaboli, M., Mousavi Ajarostaghi, S.S., Saedodin, S., Saffari Pour, M., "Thermal Performance Enhancement Using Absorber Tube with Inner Helical Axial Fins in a Parabolic Trough Solar Collector", *Appl. Sci.* Vol. 11(16), pp. 23-74, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11167423>.
- [17] Aghaei A, Dezfulizadeh A, Fadaei dehar A, Sepehrirad M, Mazaheri H. "Determination of Energy Efficiency and Exergy of Solar Collector Bed, Operating Plate under Turbulent Nanoscale Flow with Molybdenum Disulfide Nanoparticles in Different Morphologies for Tropical Regions of Iran", *JEM*, Vol. 12, pp.130-143, 2022. <https://doi.org/10.22052/12.1.130>
- [18] Fahim, T., Laouedj, S., Abderrahmane, A., Alotaibi, S., Younis, O., Muhammad Ali, H., "Heat Transfer Enhancement in Parabolic through Solar Receiver: A Three-Dimensional Numerical", *Investigation, Nanomaterials*, Vol. 12, pp. 419-425, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12030419>.
- [19] Zaboli, M., Mousavi Ajarostaghi, S.S., Saedodin, S., Kiani, B., "Hybrid nanofluid flow and heat transfer in a parabolic trough solar collector with inner helical axial fins as turbulator", *Eur. Phys. J. Plus*, Vol. 136, pp. 841-860, 2021. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01807-z>.
- [20] Jaramillo, O.A., Borunda, M., Velazquez-Lucho, K.M., Robles, M., "Parabolic trough solar collector for low enthalpy processes: an analysis of the efficiency enhancement by using twisted tape inserts", *Renewable Energy*, Vol. 93, pp. 125-141, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.046>
- [21] Zhu, X., Zhu, L., Zhao, J., "Wavy-tape insert designed for managing highly concentrated solar energy on absorber tube of parabolic trough receiver", *Energy*, Vol. 141, pp. 1146-1155, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.010>.
- [22] Chang, C., Xu, C., Wu, Z.Y., Li, X., Zhang, Q.Q., Wang, Z.F., "Heat Transfer Enhancement and Performance of Solar Thermal Absorber Tubes with Circumferentially Non-uniform Heat Flux", *Energy Procedia*, Vol. 69, pp. 320-327, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.036>.
- [23] Şahin, H.M., Baysal, E., Rıza Dal, A., Şahin, N., "Investigation of heat transfer enhancement in a new type heat exchanger using solar parabolic trough systems", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 44, pp. 15254-15266, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.03.009>.
- [24] Song, X., Dong, G., Gao, F., Diao, X., Zheng, L., Zhou, F., "A numerical study of parabolic trough receiver with nonuniform heat flux and helical screw-tape inserts", *Energy*, Vol. 77, pp. 771-782, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.049>.
- [25] Liu, Y., Chen, Q., Hu, K., Hao, J.H., "Flow field optimization for the solar parabolic trough receivers in direct steam generation systems by the variational principle", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 102, pp. 1073-1081, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.083>.
- [26] Too, Y.C.S., Benito, R., "Enhancing heat transfer in air tubular absorbers for concentrated solar thermal applications", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 50, pp. 1076-1083, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.025>.
- [27] Benabderrahmane, A., Aminallah, M., Laouedj, S., Benazza, A., Solano, J.P., "Heat transfer

- enhancement in a parabolic trough solar receiver using longitudinal fins and nanofluids*", Journal of Thermal Science, Vol. 25, pp. 410-417, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11630-016-0878-3>.
- [28] Xiangtao, G., Fuqiang, W., Haiyan, W., Jianyu, T., Qingzhi, L., Huaizhi, H., "Heat transfer enhancement analysis of tube receiver for parabolic trough solar collector with pin fin arrays inserting", Solar Energy, Vol. 144, pp. 185-202, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.020>.
- [29] Bellos, E., Tzivanidis, C., Daniil, I., "Thermal and exergetic evaluation of parabolic trough collectors with finned absorbers operating with air", Journal of Power Energy, Vol. 231, No. 7, pp. 631-644, 2017, <https://doi.org/10.1177/0957650917712403>.
- [30] Che Sidik, N.A., Muhammad Yazid, M.N., "Samion, S., Nor Musa, M., Mamat, R., Latest development on computational approaches for nanofluid flow modeling: Navier–Stokes based multiphase models", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 74, pp. 114-124, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.03.007>.
- [31] Khan, I., Wang, M., Zhang, Y., Tian, W., Su, G.H., Qiu, S., "Two-phase bubbly flow simulation using CFD method: A review of models for interfacial forces, Progress in Nuclear Energy", Vol. 125, pp. 103360, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103360>.
- [32] Alsabery, A.I., Abosinnee, A.S., Al-Hadraawy, S.K., Ismael, M.A., Fteiti, M.A., Hashim, I., Sheremet, M., Ghalambaz, M., Chamkha, A.J., "Convection heat transfer in enclosures with inner bodies: A review on single and two-phase nanofluid models", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 183, pp. 113424, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113424>.
- [33] Amani, M., Amani, P., Kasaeian, A., Mahian, O., Yan, W.M., "Two-phase mixture model for nanofluid turbulent flow and heat transfer: Effect of heterogeneous distribution of nanoparticles", Chemical Engineering Science, Vol. 167, pp. 135-144, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.03.065>.
- [34] Fadodun, O.G., Kaood, A., Hassan, M.A., "Investigation of the entropy production rate of ferrosferric oxide/water nanofluid in outward corrugated pipes using a two-phase mixture model", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 178, pp. 587-598, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107598>.
- [35] Shaheed, R., Mohammadian, A. Kheirkhah Gildeh, H. "A comparison of standard $k-\epsilon$ and realizable $k-\epsilon$ turbulence models in curved and confluent channels", Environ Fluid Mech, Vol. 19, pp. 543–568, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10652-018-9637-1>.
- [36] Izadi, M., Bastani, B., Sheremet, M.A., "Numerical simulation of thermogravitational energy transport of a hybrid nanoliquid within a porous triangular chamber using the two-phase mixture approach", Advanced Powder Technology, Vol. 31, pp. 2493-2504, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.04.011>.
- [37] Selimefendigil, F., Okulu, D. Mamur, H. "Numerical analysis for performance enhancement of thermoelectric generator modules by using CNT–water and hybrid Ag/MgO–water nanofluids", J Therm Anal Calorim, Vol. 143, pp. 1611–1621, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09983-3>.
- [39] Sheikholeslami, M., Shehzad, S.A., "Numerical analysis of $Fe_3O_4-H_2O$ nanofluid flow in permeable media under the effect of external magnetic source", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 118, pp. 182-192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.113>.
- [39] Eok Kim, D., Hwan Kim, M., Eun Cha, J., Kim, S.O., "Numerical investigation on thermal–hydraulic performance of new printed circuit heat exchanger model", Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp.3269-3276, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2008.08.002>.
- [40] Wang, G., Dbouk, T., Wang, D., Pei, Y., Peng, X., Yuan, H., Xiang, S., "Experimental and numerical investigation on hydraulic and thermal performance in the tube-side of helically coiled-twisted trilobal tube heat exchanger", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 153, pp. 106328, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.10632>

8

- [41] Cheng, Z.D., He, L.Y., Cui, F.Q., "*Numerical study of heat transfer enhancement by unilateral longitudinal vortex generators inside parabolic trough solar receivers*", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 55, pp. 5631-5641, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.057>