

Numerical Simulation of a Parabolic Trough Solar Collector Equipped with a Vortex Generator under Magnetic Field Using Cu-DWCNT/Therminol VP-1 Hybrid Nanofluid

Alireza Aghaei,^{1*} Alireza Mirzaei²

¹ Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, a.aghaei@kashanu.ac.ir

² Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran, aliirezamirzaei@gmail.com

Keywords:

parabolic trough solar collector, vortex generator, hybrid nanofluid, magnetic field, two-phase flow, exergy efficiency.

Abstract: This study numerically investigated the thermal performance of a parabolic trough solar collector (PTSC) equipped with a vortex generator (VG), which was under an external magnetic field, using a two-phase hybrid nanofluid (Cu-DWCNT/Therminol VP-1). Key parameters such as Reynolds number, nanoparticle concentration, and magnetic field intensity were analyzed. The paper presents a numerical simulation of heat transfer and fluid flow in a PTSC, using a hybrid nanofluid (Cu-DWCNT/Therminol VP-1) enhanced by vortex generators and exposed to a transverse magnetic field. Results showed that with 4% nanoparticle concentration, with Reynolds number of 33,000, and with optimized VG geometry (Case F), the exergetic efficiency increased by 65.83%. Moreover, the highest thermal enhancement under magnetic influence was observed at Hartmann number $Ha = 125$ and $Re = 21,000$.

Original Research Article

Paper History:

Received: 04/10/2025

Revise: 16/11/2025

Accepted: 31/01/2025

How to cite this article: Aghaei, A., Mirzaei, A. "Numerical Simulation of a Parabolic Trough Solar Collector Equipped with a Vortex Generator under Magnetic Field Using Cu-DWCNT/Therminol VP-1 Hybrid Nanofluid", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 2, PP. 2-21, 2025. <https://doi.org/10.22052/EEM.2026.257681.1146>

© 2023 University of Kashan Press.

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



Extended Abstract

Introduction

This paper presents a numerical simulation of heat transfer and fluid flow in a parabolic trough solar collector (PTSC) using a hybrid nanofluid (Cu-DWCNT/Therminol VP-1), enhanced by vortex generators and exposed to a transverse magnetic field. Parabolic trough solar collectors are promising for high-temperature solar thermal applications but suffer from insufficient heat transfer and

efficiency losses. Recent research investigates hybrid nanofluids to improve thermal conductivity, magnetic fields to control flow behavior, and vortex generators to disrupt thermal boundary layers. This study uniquely combines all three strategies to maximize thermal and exergetic performance.

Materials and Methods

The governing equations are based on

Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) with the $k-\omega$ SST turbulence model. A two-phase Mixture Model accounts for interactions between Therminol VP-1 base fluid and Cu-DWCNT nanoparticles. The magnetic field was incorporated via the Lorentz force term in the momentum equation. Thermo-physical properties of the hybrid nanofluid were computed using empirical correlations (e.g., Hamilton-Crosser for thermal conductivity).

Results

This study had the following results:

1. The effect of vortex generator (VG): VGs induced secondary flows, disrupted thermal boundary layers, and enhanced mixing. Case F (optimized VG geometry) yielded the highest Nusselt number and heat transfer rate.
2. The effect of Reynolds number variations and nanoparticle volume fraction: the outlet temperature decreased consistently with increasing Reynolds number (from $\sim 33^\circ\text{C}$ at $\text{Re} = 15,000$ to $\sim 29.6^\circ\text{C}$ at $\text{Re} = 33,000$), while higher nanoparticle volume fractions (0–4%) produced only a slight temperature rise due to improved thermal conductivity. These trends confirmed the physically consistent thermal behavior of the hybrid

nanofluid under the magnetic field and vortex-generator effects.

3. The effect of hybrid nanofluid: increasing nanoparticle concentration (up to 4%) improved thermal conductivity and heat transfer. At $\text{Re} = 33,000$ and $\phi = 4\%$, exergetic efficiency reaches 65.83%.
4. The effect of magnetic field higher Hartmann number ($\text{Ha} = 125$) suppressed velocity near walls but enhanced fluid mixing via Lorentz forces. Optimal performance occurred at $\text{Re} = 21,000$ and $\text{Ha} = 125$, balancing heat transfer gain and pumping power.
5. Exergy and PEC analysis: performance evaluation criterion (PEC) exceeded 1.6 for all cases, confirming net thermal benefit. PEC peaked at 1.8 for $\text{Ha} = 125$, $\phi = 4\%$, and Case F, indicating superior efficiency.

Discussion and Conclusions

The hybrid nanofluid (4% Cu-DWCNT) in Case F at $\text{Re} = 33,000$ boosted exergetic efficiency by 65.83%. Magnetic field at $\text{Ha} = 125$ and $\text{Re} = 21,000$ provided optimal hydrothermal performance. Vortex generators effectively promote turbulence and reduce thermal resistance. All configurations yielded $\text{PEC} > 1$, which confirms the practical viability of solar thermal systems.

شبیه‌سازی عددی کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه تحت تأثیر میدان مغناطیسی حاوی نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1

علیرضا آقایی^{۱*}، علیرضا میرزایی^۲

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، a.aghaei@kashanu.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان، کاشان، ایران، aliirezamirzaei@gmail.com

واژه‌های کلیدی:

کلکتور خورشیدی سهموی، مولد گردابه، جریان دوفازی، میدان مغناطیسی، نانوسیال هیبریدی، بازده اگزرژی.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

چکیده: در مطالعه حاضر، اثر شکل هندسی مختلف مولدهای گردابه در یک کلکتور خورشیدی سهموی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین اثر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۲۵ تا ۱۲۵ بر کلکتور بررسی شده است. نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 به‌عنوان سیال کاری در کسر حجمی صفر، ۱ و ۴ درصد مورد شبیه سازی قرار گرفته است. مطالعه برای رژیم جریان آشفته و در اعداد رینولدز ۱۵۰۰ تا ۳۳۰۰۰ انجام شد. نانوسیال هیبریدی دوفازی در دمای ۲۳ درجه وارد لوله شده است. همچنین به‌منظور حل جریان آشفته از مدل توربولانسی SST-k- ω و برای حل مشکل کوپلینگ فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل سی استفاده شده است. در کسر حجمی ۴ درصد از نانوسیال هیبریدی و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد (حالت هندسی Case F) درون کلکتور باعث می‌شود عدد ناسلت متوسط به میزان ۶۵/۸۳ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور بدون مولد گردابه است، افزایش یابد. در نهایت با افزایش عدد هارتمن از ۲۵ تا ۱۲۵ افزایش عدد رینولدز از ۱۵۰۰۰ به ۳۳۰۰۰ موجب افزایش معنی‌دار بازده اگزرژی می‌شود (برای مثال: Case D $\approx 26/6\%$ ، Case E $\approx 27/38\%$ ، Case F $\approx 28/92\%$). این افزایش تا حدود $Re \approx 21000$ ادامه داشته و سپس با افزایش بیشتر Re کاهش می‌یابد. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میدان مغناطیسی حداکثر بازده اگزرژی را در عدد رینولدز ۲۱۰۰۰ و عدد هارتمن ۱۲۰ درون کلکتور مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F دارد.

۱. مقدمه

برای پیشبرد صنعت خورشیدی، نقشه‌های بسیار روشنی در زمینه کاهش هزینه وجود دارد که ممکن است تا سال ۲۰۳۰ هزینه‌های خورشیدی را بسیار کاهش دهد. استفاده از کلکتورهای خورشیدی و افزایش میزان بازده حرارتی آن اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته که در ادامه بررسی شده است. شیخ‌السلامی و همکاران [۱] به‌صورت تجربی به بررسی اثر سرعت ورودی‌های مختلف در مبدل حرارتی پرداختند. هدف اصلی ایشان بررسی انتقال حرارت در اعداد رینولدز بالا و بررسی تأثیر سرعت ورودی متغیر بر نرخ انتقال حرارت خروجی در مبدل حرارتی بود. بر طبق نتایج ارائه‌شده توسط نویسندگان افزایش سرعت ورودی باعث می‌شود انتقال حرارت در خروجی مبدل حرارتی افزایش یابد؛ زیرا در اعداد رینولدز بالا به‌واسطه تشکیل گردابه‌ها و چرخش آن‌ها همواره انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

حسینی و همکاران [۲] به‌صورت تجربی تأثیر استفاده از همزمان از نوار مارپیچ و سیم هلیکال را درون مبدل حرارتی مورد بررسی قرار دادند. هدف اصلی آن‌ها بررسی تأثیر استفاده همزمان از نوار مارپیچ و سیم هلیکال بر دمای خروجی و نرم انتقال بود. مطالعه آن‌ها در رژیم جریان آشفته و محدوده رینولدز ۷۰۰ تا ۲۸۰۰۰ صورت گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه نشان می‌دهد انتقال حرارت به‌شدت تحت تأثیر استفاده همزمان از نوار مارپیچ و سیم هلیکال بوده و در عدد رینولدز ۲۸۰۰۰ به میزان ۴۹/۰۷ درصد افزایش پیدا کرده است.

کسیم و همکاران [۳] به‌صورت تجربی به ساخت توربولاتور پیچشی و نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم و بررسی تأثیر آن‌ها در یک لوله پرداختند. آن‌ها در این مطالعه از نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم به‌عنوان سیال کاری در کسرحجمی ۰/۰۸ تا ۰/۳ از نانوذرات استفاده نمودند. همچنین مطالعه آن‌ها در رژیم جریان متلاطم و در محدوده رینولدز ۷۰۰ تا ۱۵۰۰۰ صورت گرفته است. بر طبق گزارش‌های نویسندگان از مراحل آزمایش انجام‌شده، توربولاتور پیچشی در تمامی مراحل موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی گردیده است. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به‌مراتب در اعداد رینولدز بالا و کسرحجمی بالاتر به‌مراتب بیشتر است.

دیزجی و همکاران [۴] به‌صورت تجربی به ساخت نوار تابیده کنگره‌دار و بررسی اثر آن در مبدل حرارتی در رژیم جریان آشفته پرداختند. هدف اصلی آن‌ها افزایش انتقال حرارت در خروجی مبدل حرارتی دولوله‌ای به‌واسطه افزودن نوار تابیده کنگره‌دار بود. آن‌ها در

این مطالعه به بررسی رفتار جریان سیال در اعداد رینولدز ۳۵۰۰ تا ۱۸۰۰۰ که مربوط به رژیم جریان آشفته است، مورد بررسی قرار دادند. نتایج خروجی آن‌ها به‌صورت نمودارهای ناشی از افت فشار، ضریب اصطکاک و عدد ناسلت متوسط در حالت‌های مختلف هندسی از مبدل حرارتی دولوله‌ای گزارش شده است. بر طبق نتایج به‌دست‌آمده مبدل حرارتی مجهز به نوار تابیده کنگره‌دار نسبت به مبدل حرارتی ساده از انتقال حرارت مطلوب‌تری در خروجی برخوردار است. همچنین به‌دلیل چرخشی جریان سیال در اعداد رینولدز بالا نرخ انتقال حرارت به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد.

حذبهیان و همکاران [۵] به‌صورت تجربی، به ساخت مبدل حرارتی مجهز شده نوار چرخشی پر شده با نانوسیال پرداختند. هدف اصلی مطالعه آن‌ها بررسی تأثیر استفاده از نوار چرخشی و نانوسیال بر بازده حرارتی در خروجی مبدل حرارتی بود. آن‌ها در این مطالعه از نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم در کسرحجمی صفر تا ۲ درصد از نانوذرات استفاده شده است. با توجه به فرض جریان آشفته مطالعه آن‌ها در اعداد رینولدز ۸۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ در رژیم جریان متلاطم صورت گرفته است. براساس نتایج گزارش‌شده توسط نویسندگان فرم خطوط جریان نانوسیال بعد از برخورد با نوار چرخشی تغییر پیدا کرده و منجر به تشکیل گردابه و افزایش انتقال حرارت می‌گردد.

گوپتا و همکاران [۶] با استفاده از روش آزمایشگاهی به مطالعه رفتار جریان نانوسیال آب-نانولوله کربنی چندجداره در یک کانال تحت شار حرارتی ثابت پرداختند. آن‌ها در این مطالعه ابتدا به ساخت نانوسیال آب-نانولوله کربنی چندجداره پرداختند. سپس از نانوسیال مورد نظر در کسرحجمی ۵/۰۵ تا ۰/۵ درصد در مطالعه تجربی حاضر به‌عنوان سیال پایه استفاده نمودند. مطالعه آن‌ها برای اعداد رینولدز ۶۰۰۰ تا ۲۴۰۰۰ صورت گرفته است. نویسندگان در این مطالعه خروجی‌های خود در طول آزمایش را به‌صورت نمودارهای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، عدد ناسلت متوسط و ضریب اصطکاک ارائه کردند. بر طبق گزارش‌های آن‌ها از مراحل انجام آزمایش، نانوسیال آب-نانولوله کربنی نرخ انتقال حرارت بالاتری نسبت به سیال پایه آب در تمام مراحل آزمایش از خود نشان داده است.

مداح و همکاران [۷] به‌صورت تجربی و عددی به مطالعه تأثیرات نوار تابیده و نانوسیال بر کارایی اگزرژی درون یک مبدل حرارتی پرداختند. آن‌ها در بخش تجربی این مطالعه ابتدا سیستم را ساختند و بعد از انجام آزمایش‌های مورد نظر نتایج به‌دست‌آمده را با نتایج شبیه‌سازی عددی مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها در این مطالعه از نانوسیال آب-اکسید سیلیسیم در کسرحجمی ۱ تا ۴ درصد استفاده

نمودند. همچنین مطالعه آن‌ها در اعداد رینولدز ۷۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰ انجام شده است. بر طبق گزارش‌های نویسندگان نتایج داده‌های تجربی و عددی با دقت قابل قبولی با یکدیگر مشابه‌اند.

قاسمی و رنجبر [۸] به صورت عددی به شبیه‌سازی دیسک‌های متخلخل درون یک کلکتور خورشیدی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه برای طراحی هندسه کلکتور خورشیدی از نرم‌افزار سالیدورک و برای تحلیل سیالاتی آن از نرم‌افزار فلونت استفاده کردند. همچنین با توجه به آشفته بودن رژیم جریان از مدل توربولانسی کا اپسیلون استاندارد استفاده کردند. نویسندگان به منظور کوپل معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل سی استفاده نمودند. نتایج به دست آمده از مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که حداکثر میزان عدد ناسلت در کلکتور خورشیدی مجهز به دیسک‌های متخلخل به میزان ۵۶/۳۲ درصد نسبت به زمانی که کلکتور خورشیدی ساده است، افزایش می‌یابد.

چوکومفون و همکاران [۹] با صورت تجربی و عددی به بررسی اثر موانع درون یک لوله بیضوی پرداختند. آن‌ها در این مطالعه ابتدا سیستم را به صورت آزمایشگاهی ساخته و سپس نتایج آن را با بخش عدد مقایسه کردند. هدف اصلی مطالعه آن‌ها تأثیر زاویه‌های مختلف از موانع بر عملکرد هیدرولیکی حرارتی لوله بیضوی بود. آن‌ها در بخش عددی مطالعه برای تحلیل سیالاتی از نرم‌افزار فلونت استفاده کردند. همچنین برای کوپل معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده نمودند. بر طبق نتایج خروجی آن‌ها افزایش زاویه موانع در لوله بیضوی به شدت انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار داده و مقدار آن را افزایش می‌دهد.

هاشمیان و همکاران [۱۰] به صورت عددی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به شبیه‌سازی یک مبدل حرارتی با قطر لوله داخلی مختلف پرداختند. هدف اصلی مطالعه آن بررسی تغییرات اتاق حرارت به واسطه تغییر قطر لوله داخلی در مبدل حرارتی بود. آن‌ها به منظور شبیه‌سازی عدد از نرم‌افزار فلونت ورژن ۱۶ که نرم‌افزار بر پایه روش حجم محدود است، استفاده کردند. همچنین مطالعه آن‌ها در رژیم جریان آشفته و با استفاده از مدل توربولانسی کا اپسیلون انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد هرچقدر قطر لوله داخلی در مدل حرارتی بیشتر شود میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

شیخ‌السلامی و همکاران [۱۱] به صورت تجربی و عددی به مطالعه تغییرات سرعت و دمای ورودی بر عملکرد حرارتی در خروجی مبدل حرارتی پرداختند. آن‌ها در بخش تجربی، ابتدا سیستم مورد نظر را به صورت تجربی ساختند و نتایج به دست آمده از بخش تجربی را با شبیه‌سازی عدد مقایسه نمودند. در بخش عددی از رسم

هندسه و تحلیل سیالاتی آن به ترتیب از نرم‌افزار دیزاین مدلر و نرم‌افزار فلونت استفاده کردند. مطالعه آن‌ها در رژیم جریان آشفته با استفاده از مدل توربولانسی کا امپا انجام شده است. نتایج خروجی مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد افزایش سرعت و دمای ورودی مبدل حرارتی می‌تواند عملکرد حرارتی را به میزان چشمگیری افزایش دهد.

یانوی و همکاران [۱۲] به روش عددی با اضافه کردن نانوذرات به نمک مذاب برای تشکیل نانوسیال به بهبود خصوصیات حرارتی محیط کار پرداختند. آن‌ها یک مدل بولتزمن با توجه به سیال و نانوذرات به عنوان دو مرحله مختلف توسعه داده و اثر غلظت نانوذرات، نسبت ابعاد مخزن مستطیل و عدد رایلی بر انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوذرات اکسید سیلیسیم خورشیدی مبتنی بر نمک خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت حرارتی خاص در انتقال حرارت برای کلیه نسبت‌ها مؤثر است و حداکثر افزایش انتقال حرارت طبیعی با کسر جرمی ۱ درصد به دست می‌آید و افزایش عدد رایلی اثر ویسکوزیته را تقویت کرده و انتقال حرارت را تضعیف می‌کند. همچنین نانوذرات با اختلاف دما، نیروی محرکه و نیروی درگ به سمت بالای مخزن مستطیل رانده می‌شوند.

آقایاری و همکاران [۱۳] به روش‌های عددی و تجربی به بررسی عملکرد نانوذرات اکسید آهن- آب در مبدل حرارتی دولوله‌ای مجهز به نوار تابیده شده پرداختند. غلظت حجمی نانوذرات ۰/۸ و ۰/۱ درصد است و از نوارهای تابیده شده مختلف با نسبت پیچش ۲/۵ تا ۵/۲ استفاده شده است. تغییر عدد رینولدز در رژیم جریان آشفته ۵۰۰۰ تا ۲۸۵۰۰ است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن نانوذرات و همچنین نوار تابیده شده، انتقال حرارت و عدد ناسلت را به ترتیب ۱۸ درصد و ۲۵ درصد و ضریب اصطکاک را بدون استفاده از نوار تابیده شده ۴ درصد و با استفاده از نوار تابیده شده ۶/۳ درصد افزایش می‌دهد. همچنین ماکسیمم ضریب عملکرد حرارتی ۳/۲۵ با غلظت نانوسیال ۰/۱ درصد، نسبت پیچش نوار ۲/۵ و عدد رینولدز ۵۰۰۰ به دست می‌آید.

سامروایزین و همکاران [۱۴] به روش تجربی به بررسی تأثیر نوارهای تابیده شده نصب شده با بافل‌های تابیده شده عرضی بر انتقال حرارت لوله‌ها پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که نوارهای تابیده شده با بافل‌های تابیده شده عرضی، به دلیل جریان گرداب ناشی از نوار تابیده شده و اختلال در جریان اضافی ناشی از بافل‌های تابیده شده عرضی، سرعت انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی را نسبت به نوار تابیده شده معمولی، افزایش می‌دهد.

۵۵ درصد نسبت به آب در لوله بدون نوار تابیده‌شده به دست آمده است.

کریم‌پور و همکاران [۱۸] در یک مطالعه عددی تأثیر استفاده از میدان مغناطیسی ثابت را در یک مبدل با در نظر گرفتن شرایط عدم لغزش در دیواره‌های مدل‌سازی نمودند. آن‌ها در این مطالعه با استفاده از تکنیک دینامیک سیالات محاسباتی به بهبود انتقال حرارت در میکروکانال حاوی نانوسیال با نانوذرات مختلف آلومینیوم و نقره پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نانوذرات آلومینیوم عملکرد حرارتی مناسب‌تری نسبت به مابقی نانوذرات نقره دارند. همچنین اعمال میدان مغناطیسی در دیواره بر روی جریان نانوسیال تأثیر گذاشته و باعث چرخش آن می‌شود.

مسعودی و همکاران [۱۹] تأثیرات همزمان فین، میدان مغناطیسی و نانوسیال در یک میکروکانال مورد بررسی قرار دادند. این مطالعه با هدف افزایش انتقال حرارت میکروکانال به‌وسیله این سه پارامتر صورت گرفته است. نتایج بیان می‌کند افزودن نانوذرات نانولوله کربنی چندجداره به سیال پایه آب میزان عملکرد حرارتی سیال پایه را بالا می‌برد. همچنین استفاده از فین و میدان مغناطیسی به‌صورت همزمان در عدد رینولدز ۳۹۰۰۰ میزان انتقال حرارت را ۴۹/۴۱ درصد افزایش می‌دهد.

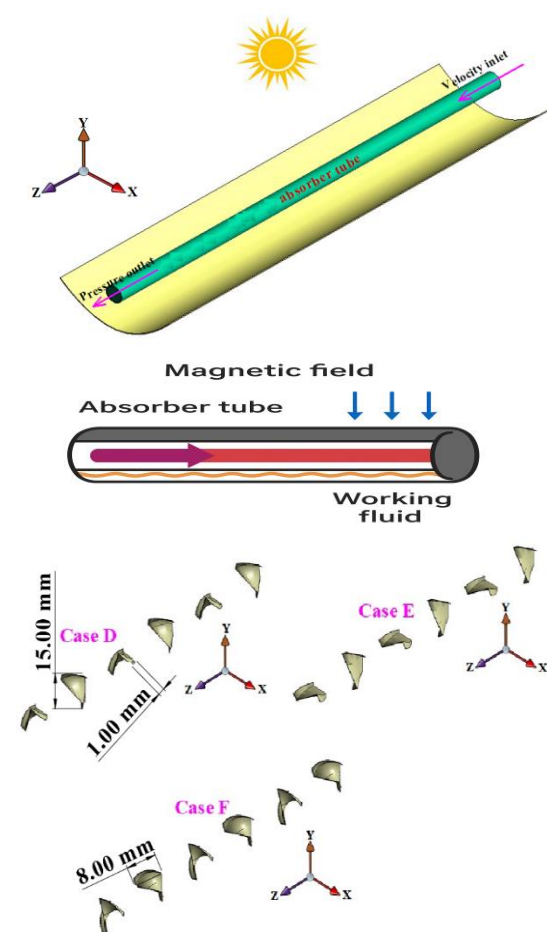
ملنیکوف و همکاران [۲۰] با روش آزمایشی تأثیر استفاده از میدان مغناطیسی دوار را بر میدان جریان و انتقال حرارت یک مبدل حرارتی مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها نتیجه گرفتند که اعمال میدان مغناطیسی می‌تواند تا حدودی میدان جریان را تحت تأثیر قرار داده و به این واسطه انتقال حرارت را بالا ببرد. علاوه‌بر این، ضریب اصطکاک نیز با افزایش میدان مغناطیسی بالا می‌رود. با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته از مطالعاتی که تاکنون انجام شده، تا به حال عملکرد هیدرودینامیکی و بازده آگرژی نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با این شکل هندسی مورد مطالعه قرار نگرفته است. لذا در مطالعه حاضر، اثر مولدهای گردابه در یک کلکتور خورشیدی سهموی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل هندسی مختلف از مولدهای گردابه بر رفتار جریان بررسی می‌شود. نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 به‌عنوان سیال کاری در کسر حجمی صفر، ۱ و ۴ درصد مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. مطالعه برای رژیم جریان آشفته و در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ انجام می‌شود. همچنین به‌منظور حل جریان آشفته و گسسته‌سازی معادلات

پورتناح و همکاران [۱۵] به روش عددی به بررسی بهینه‌سازی انتقال حرارت و جریان سیال در کانال سه‌بعدی با شار حرارتی ثابت با استفاده از یک الگوریتم ژنتیکی پرداختند. آن‌ها از نانولوله‌های کربنی چنددیواره و آب و نوارهای تابیده‌شده عمودی برای تقویت انتقال حرارت استفاده کردند. عدد رینولدز ۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰، کسر حجمی از نانوذرات ۰ تا ۰/۱۶ درصد، تعداد نوارهای تابیده‌شده عمودی ۵ تا ۱۰، زاویه حمله نوارهای تابیده‌شده ۵۰ تا ۱۳۰ درجه در نظر گرفته شده است. هدف اصلی به حداکثر رساندن سرعت انتقال حرارت و به حداقل رساندن افت فشار است. نتایج نشان می‌دهد حداکثر انتقال حرارت و حداقل افت فشار کانال با نه نوار پیچ‌خورده در زاویه پیچش ۵۴۰ درجه و زاویه حمله ۹۰ درجه رخ داده و نسبت به کانال صاف در همان شرایط، انتقال حرارت ۲۶۵ درصد و افت فشار ۳۱۹ درصد افزایش یافته است.

وی‌هی و همکاران [۱۶] به روش عددی به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوذرات آب و اکسید مس در غلظت‌های مختلف ۱ تا ۴ درصد در یک لوله با استفاده از مدل‌های تک‌فاز و دوفاز تحت رژیم جریان آشفته در اعداد رینولدز از ۳۰۰۰ تا ۳۶۰۰۰ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مدل مخلوط دو فاز منجر به دستیابی به نتایج نزدیک‌تر در واقعیت در مقایسه با مدل تک‌فاز می‌شود و همچنین حداکثر ضریب عملکرد در رینولدز ۳۶۰۰۰ و درصد حجمی ۴ درصد در لوله با یک نوار برای مدل دوفاز تابیده‌شده ۲/۱۸ است، درحالی‌که برای لوله با دو نوار تابیده‌شده تحت شرایط یکسان، ۲/۰۴ است. بنابراین، استفاده از یک نوار پیچ‌خورده از دید دینامیک سیالات محاسباتی مطلوب‌تر است.

سینگ و همکاران [۱۷] به بررسی تجربی ویژگی‌های هیدروترمال نانوذرات ترکیبی اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم در شرایط آشفته در مبدل حرارتی دولوله‌ای با انواع مختلفی از نوارهای تابیده‌شده برشی V شکل پرداختند. نانوسیال هیبریدی با غلظت ۰/۱ درصد حجمی با پراکندن نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم با نسبت حجمی برابر در آب مقطر تهیه می‌شود. تأثیر استفاده از نوار تابیده‌شده به همراه برش V شکل و بدون برش بر خصوصیات انتقال حرارت و افت فشار برای نسبت‌های مختلف تابیدگی، نسبت‌های عمق برش، نسبت‌های عرض برش و دمای ورودی نانوسیالی ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با کاهش نسبت تابیدگی، افزایش نسبت عمق برش، کاهش نسبت عرض و کاهش دمای ورودی نانوسیال، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش عدد ناسلت ۱۳۲ درصد و ضریب اصطکاک

و خارجی لوله به ترتیب ۲۴ و ۲۷ است. در این مطالعه به منظور کاربرد بهتر اثر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۲۵ تا ۱۲۵ مطابق شکل (۱) بر کلکتور خورشیدی سهموی اعمال می‌گردد. نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 به عنوان سیال کاری در کسرحجمی صفر، ۱ و ۴ درصد مورد شبیه سازی قرار می‌گیرد. مطالعه برای رژیم جریان آشفته و در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ انجام می‌شود. به منظور حل جریان آشفته و گسسته سازی معادلات به ترتیب از مدل توربولانسی K-Omega SST و الگوریتم سیمپل سی استفاده شده است.



شکل (۱): طرحواره هندسه کلکتور خورشیدی سهموی مورد مطالعه
مجهز به مولد گردابه تحت تأثیر میدان مغناطیسی

برای مدل سازی جریان نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 درون کلکتور خورشیدی سهموی از روش دوفازی مخلوط استفاده شده است. روابط (۱) تا (۹) معادلات حاکم بر مسئله را نشان می‌دهد. رابطه (۵) نشان دهنده معادله پیوستگی است [۲۶ و ۲۷]. در این رابطه $\bar{U}_m$ نشان دهنده سرعت مخلوط است و برای به دست آوردن آن از رابطه (۲) استفاده می‌شود.

به ترتیب از مدل توربولانسی K-Omega SST و الگوریتم سیمپل سی استفاده شده است.

تالوگری و همکاران [۲۱] در یک مطالعه تجربی نشان دادند که استفاده از نانوسیال هیبریدی مبتنی بر ترکیب CuO و MWCNT می‌تواند عملکرد حرارتی کلکتور سهموی را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش دهد؛ این نتیجه مؤید آن است که ترکیب همزمان نانوذرات فلزی و کربنی می‌تواند اثر هم افزایی در بهبود رسانش حرارتی و پایداری سیال پایه ایجاد کند.

مرور گسترده رحمان و همکاران [۲۲] نشان می‌دهد که رفتار رئولوژیکی، مدل های محاسبه خواص مؤثر و مسئله پایداری و آگلومراسیون نانوذرات، نقش کلیدی در عملکرد حرارتی نانوسیالات دارند و نانوسیالات هیبریدی معمولاً در کسر حجمی محدود و کنترل شده بهترین پایداری و کارایی را ارائه می‌دهند.

ژو و همکاران [۲۳] گزارش کردند که تغییر آرایش، جهت گیری و فاصله مولدهای گردابه می‌تواند شدت آشفتگی موضعی، اختلاط جریان و عدد ناسلت را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد؛ این نتایج اهمیت طراحی دقیق هندسه VG را در افزایش عملکرد لوله جاذب تأیید می‌کند.

مطالعه گونر و همکاران [۲۴] نشان داده است که ترکیب Therminol VP-1 با نانوذرات مختلف می‌تواند انتقال حرارت در کلکتورهای سهموی را تقویت کرده و رفتار دمایی سیال را در شرایط عملیاتی پایدارتر سازد؛ بنابراین انتخاب Therminol VP-1 به عنوان سیال پایه برای کاربردهای دمای بالا انتخابی مناسب و مستند است.

مطالعات اخیر مانند دونگا و همکاران [۲۵] نشان می‌دهند که تحلیل هم زمان انرژی و انرژی در کلکتورهای سهموی، دید دقیقی از نقش نانوسیال، شدت آشفتگی و شرایط هیدرودینامیکی (از جمله عدد رینولدز) در کارایی حرارتی و انرژی را می‌دهد و می‌تواند به بهینه سازی ترکیبی روش های افزایش انتقال حرارت کمک کند.

۲. مدل هندسی و معادلات حاکم

بررسی های اخیر نشان داده که استفاده از میدان مغناطیسی در کلکتور خورشیدی سهموی تا حدودی بر عملکرد حرارتی تأثیر گذار است. در مطالعه حاضر اثر مولدهای گردابه در یک کلکتور خورشیدی سهموی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هندسه سه بعدی کلکتور خورشیدی سهموی در شکل (۱) به نمایش گذاشته شده است. شکل هندسی مختلف از مولدهای گردابه بر رفتار جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. طول کلکتور خورشیدی سهموی ۹۰۰ میلی متر و فاصله مولدهای گردابه از ورودی و خروجی ۲۰۰ میلی متر است. قطر داخلی

به منظور مدل سازی جریان آشفته از معادلات RANS با مدل تلاطم K-Omega SST برای مدل سازی رژیم آشفتگی استفاده شده است [۲۹].

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \quad (11)$$

$$\mu_t = \frac{\rho, k}{\omega} \frac{1}{\max \left\{ \frac{1}{\alpha^*}, \frac{\Omega, F_2}{a_1, \omega} \right\}} \quad (12)$$

$$\Omega = \sqrt{2 \cdot \Omega_{ij}, \Omega_{ij}} \quad (13)$$

با توجه به اینکه برای مدل سازی جریان متلاطم از مدل K-Omega SST استفاده شده است، نرخ اتلاف ویژه (ω) و انرژی جنبشی آشفتگی (k) در مدل SST k- ω ممکن است از معادلات زیر محاسبه می شوند [۲۹].

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{1-F_1}{\sigma_{k,2}}} \quad (15)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{1-F_1}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (16)$$

$$F_1 = \tan h(\Phi_1^4) \quad (17)$$

$$F_2 = \tan h(\Phi_2^2) \quad (18)$$

$$\Phi_1 = \min \left\{ \max \left\{ \frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right\}, \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2} \right\} \quad (19)$$

$$\Phi_2 = \max \left\{ \frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right\} \quad (20)$$

$$D_\omega^+ = \max \left\{ \frac{2\rho}{\omega \rho_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20} \right\} \quad (21)$$

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_k}}{1 + \frac{Re_t}{R_k}} \right), \quad \alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3}, \quad Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega}, \quad \beta_i = F_1 \cdot \beta_{i,1} + (1-F_1) \beta_{i,2} \quad (22)$$

$$G_k = \tau_{t,ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \tau_{t,ij} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho, k, \delta_{ij} \quad (23)$$

در رابطه (۲) پارامتر ρ_m چگالی مخلوط در معادلات دوفازی بوده و محاسبه آن با استفاده از رابطه (۳) انجام می شود.

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

$$\vec{U}_m = \frac{\rho_s \cdot \phi_s \cdot \vec{U}_s + \rho_{bf} \cdot \phi_{bf} \cdot \vec{U}_{bf}}{\rho_m} \quad (2)$$

$$\rho_m = \rho_s \cdot \phi_s + \rho_{bf} \cdot \phi_{bf} \quad (3)$$

معادل «مونتوم جریان نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 تحت تأثیر میدان مغناطیسی به صورت رابطه (۴) است [۲۶ و ۲۷]. در معادله مونتوم $\vec{U}_{dr,bf}$

سرعت دریافت نانوذرات و $\vec{U}_{dr,s}$ سرعت دریافت سیال پایه آب هستند. برای به دست آوردن آن ها به ترتیب از معادلات (۵) و (۶) استفاده می شود.

قسمت $\mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H}$ در معادله مونتوم مربوط به نیروی کلوین است. لذا اگر میدان مغناطیسی در نظر گرفته نشود، این قسمت برابر صفر خواهد بود. همچنین $\vec{J} \times \vec{B}$ مربوط به نیروی لورنتس است. درحقیقت $\vec{J}$ جریان الکتریکی القاشده بر اثر حرکت سیال هادی الکتریسته در میدان مغناطیسی است [۲۳]. معادله انرژی

به صورت سه بعدی در هندسه کلکتور خورشیدی سهموی به همراه نانوسیال نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol

VP-1 تحت تأثیر میدان مغناطیسی به صورت رابطه (۷) بازنویسی می گردد. در این معادله، جمله $\frac{\vec{J} \cdot \vec{J}}{\sigma_m}$ تلفات ژول است که به دلیل میدان مغناطیسی اضافه شده است. در این رابطه، $\vec{J}$ با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می گردد. همچنین کسر حجمی نانوذرات هیبریدی دوفازی با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می گردد [۲۸].

$$\rho_m (\vec{U}_m \cdot \nabla \vec{U}_m) = -\nabla \vec{P} + \mu_m (\nabla \vec{U}_m + (\nabla \vec{U}_m)^T) + \nabla (\rho_{bf} \phi_{bf} \vec{U}_{dr,bf} \vec{U}_{dr,bf} + \rho_s \phi_s \vec{U}_{dr,s} \vec{U}_{dr,s}) + \rho_m \vec{g} + \mu_0 (\vec{M} \cdot \nabla) \vec{H} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (4)$$

$$\vec{U}_{dr,bf} = \vec{U}_{bf} - \vec{U}_m \quad (5)$$

$$\vec{U}_{dr,s} = \vec{U}_s - \vec{U}_m \quad (6)$$

$$\nabla (\rho_{bf} \phi_{bf} \vec{U}_{bf} h_{bf} + \rho_s \phi_s \vec{U}_s h_s) = \nabla ((\phi_{bf} k_{bf} + \phi_s k_s) \nabla \vec{T}) + \frac{\vec{J} \cdot \vec{J}}{\sigma_m} \quad (7)$$

$$\vec{J} = \sigma (-\vec{\nabla} \phi + (\vec{u} \times \vec{B})) \quad (8)$$

$$\nabla (\rho_s \phi_s \vec{U}_m) = -\nabla (\rho_s \phi_s \vec{U}_{dr,s}) \quad (9)$$

تابش سهموی به صورت شار سطحی یکنواخت) تا امکان بررسی پارامتریک اثر مولد های گردابه، نانوسیال هیبریدی و میدان مغناطیسی فراهم گردد. در این مطالعه به منظور کاربرد بهتر اثر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۲۵ تا ۱۲۵ مطابق شکل (۱) بر کلکتور خورشیدی سهموی اعمال می شود. نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 به عنوان سیال کاری در کسرحجمی ۱، ۰ و ۴ درصد مورد شبیه سازی قرار می گیرد. مطالعه برای رژیم جریان آشفته و در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ انجام می شود. نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 در دمای ۲۳ درجه سلسیوس وارد لوله می شود. همچنین به منظور حل جریان آشفته و گسسته سازی معادلات به ترتیب از مدل توربولانسی K-Omega SST و الگوریتم سیمپل سی استفاده شده است. به منظور گسسته سازی از مدل Least Squares Cell Based. همچنین به منظور گسسته سازی فشار از مدل Standard، و برای معادلات مومنتوم، کسرحجمی و انرژی جنبشی آشفته از مدل power law استفاده می شود. نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 به عنوان سیال کاری استفاده شده است.

جدول (۱): خواص فیزیکی نانوذرات [۳۶، ۳۵، ۳۴، ۳۲]

سیال پایه Therminol VP-1	نانولوله DWCNT	مس (Cu)	خاصیت
1060	2100	8954	چگالی (kg/m ³)
1620	710	383	گرمای ویژه (J/kg.K)
0/13	3000	400	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
$3/4 \times 10^{-3}$	—	—	ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)
10^{-8}	1×10^8	$5/8 \times 10^7$	رسانندگی الکتریکی (S/m)
$0/7 \times 10^{-3}$	—	$16/5 \times 10^{-6}$	ضریب انبساط حرارتی (1/K)

خواص ترموفیزیکی نانوذرات در جدول (۱) ارائه شده است. با توجه به اینکه از سیال پایه Therminol VP-1 استفاده می شود، برای محاسبه خواص ترموفیزیکی آن از مراجع [۳۶، ۳۵، ۳۴، ۳۲] استفاده شده است. به منظور محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال از روابط (۳۲) تا (۳۵) استفاده می شود [۳۳].

$$\rho_{HNF} = \rho_{NP1} \phi_{NP1} + \rho_{NP2} \phi_{NP2} + \rho_f (1 - \phi_{NP1} - \phi_{NP2}) \quad (32)$$

$$(c_p)_{HNF} = (c_p)_{NP1} \phi_{NP1} + (c_p)_{NP2} \phi_{NP2} + (c_p)_f (1 - \phi_{NP1} - \phi_{NP2}) \quad (33)$$

$$\mu_{HNF} = \mu_f (1 - \phi_{NP1} - \phi_{NP2})^{-2.5} \quad (34)$$

$$Y_k = \rho \cdot \beta^* \cdot k \cdot \omega, \quad G_\omega = \frac{\rho \cdot \alpha}{\mu_t} G_k, \quad Y_\infty = \rho \cdot \beta_i \cdot \omega^2 \quad (24)$$

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_\infty^*}}, \quad \alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_\infty^*}} \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} = \left(\frac{\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_k}}{1 + \frac{Re_t}{R_k}} \right), \quad \alpha_\infty = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (26)$$

با توجه به اینکه در این مطالعه جریان آشفته می باشد و محدوده رینولدز مابین ۱۵۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ است، برای محاسبه سرعت ورودی در کلکتور خورشیدی سهموی، عدد رینولدز با استفاده از رابطه (۲۷) محاسبه می شود. در این رابطه $\vec{U}_m$ سرعت ورودی، d_p قطر لوله مبدل حرارتی، ρ_m چگالی نانوسیال هیبریدی و μ_m لزجت است. علاوه بر این، افت فشار با استفاده از رابطه (۲۸) قابل محاسبه است. در این رابطه، فشار ورودی $P_{av,inlet}$ و فشار خروجی کلکتور خورشیدی سهموی است. عدد ناست متوسط و ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی به ترتیب با استفاده از روابط (۲۹) و (۳۰) قابل محاسبه هستند. همچنین به منظور آگزِرژِی از رابطه (۳۱) استفاده شده است [۳۰ و ۳۱].

$$Re_s = \frac{\vec{U}_m \cdot d_p \cdot \rho_m}{\mu_m} \quad (27)$$

$$\Delta P = P_{av,inlet} - P_{av,outlet} \quad (28)$$

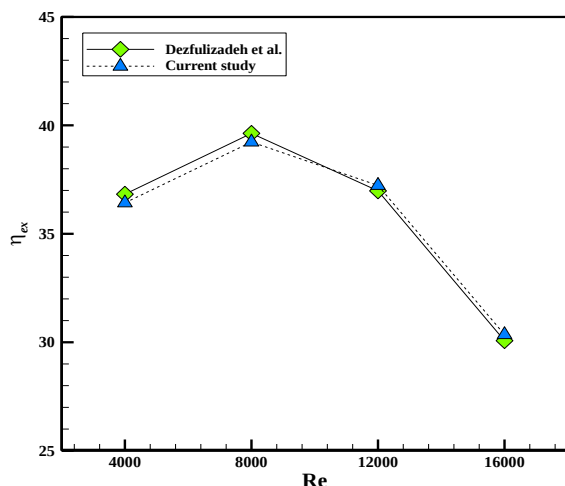
$$Nu = \frac{h_f \cdot D_i}{k_f} \quad (29)$$

$$PEC = \left(\frac{Nu_{av,nf}}{Nu_{av,f}} \right) \cdot \left(\frac{f_{nf}}{f_f} \right)^{-1/3} \quad (30)$$

$$\eta_{ex} = \frac{m_c \cdot C_{p,c} \cdot \ln \frac{T_c^{out}}{T_c^{in}}}{m_h \cdot C_{p,h} \cdot \ln \frac{T_h^{out}}{T_h^{in}} + m_c \cdot \frac{\Delta P_c}{\rho_c} \cdot \frac{\ln \frac{T_c^{out}}{T_c^{in}}}{T_c^{out} - T_c^{in}} + m_h \cdot \frac{\Delta P_h}{\rho_h} \cdot \frac{\ln \frac{T_h^{out}}{T_h^{in}}}{T_h^{out} - T_h^{in}}} \quad (31)$$

۳. نانوسیال هیبریدی و مدل سازی عددی

طول کلکتور خورشیدی سهموی ۹۰۰ میلی متر و فاصله مولدهای گردابه از ورودی و خروجی ۲۰۰ میلی متر است. قطر داخلی و خارجی لوله به ترتیب ۲۴ و ۲۷ است. سطح خارجی لوله جاذب تحت بار تابشی معادل (q'') ثابت قرار گرفته است (مدل سازی



شکل (۳): اعتبارسنجی شبیه‌سازی عددی با مرجع [۳۶]

۶. نتایج و بحث

۶.۱. تأثیر شکل هندسی مولد های گردابه بر عدد

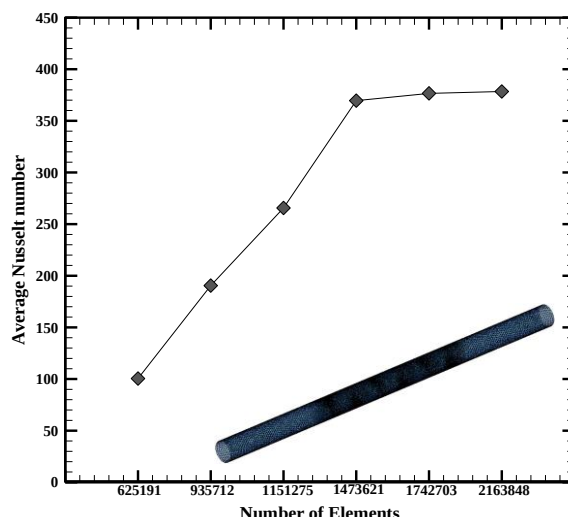
ناسلت متوسط

در شکل (۴) تغییرات عدد ناسلت متوسط برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف (a) سیال پایه، (b) کسرحجمی ۱ درصد، (c) کسرحجمی ۴ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت تحت تأثیر قرار گرفته و زیاد می‌شود. در واقع با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 زیاد شده و در نتیجه عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. در سیال پایه Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود عدد ناسلت متوسط به میزان ۶۴/۱۲ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد. در کسرحجمی ۱ درصد از نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود عدد ناسلت متوسط به میزان ۶۴/۸۹ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد. در کسرحجمی ۴ درصد از نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود عدد ناسلت متوسط به میزان ۶۵/۸۳ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد.

$$k_{HNF} = k_f \left(\frac{(k_{NP1} + k_{NP2}) + 2k_f - 2\varphi_{NP1}(k_f - k_{NP1}) - 2\varphi_{NP2}(k_f - k_{NP2})}{(k_{NP1} + k_{NP2}) + 2k_f + \varphi_{NP1}(k_f - k_{NP1}) + \varphi_{NP2}(k_f - k_{NP2})} \right) \quad (35)$$

۴. استقلال از نتایج شبکه

هندسه کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه در حالت هندسی Case F، عدد رینولدز ۳۳۰۰۰ و کسرحجمی ۴ درصد به منظور بررسی آزمون استقلال از نتایج شبکه انتخاب می‌گردد. نتایج به دست آمده از عدد ناسلت متوسط در شکل (۲) گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی حالت‌های مختلف از تعداد نقاط شبکه، عدد ناسلت متوسط گزارش شده است. با مشاهده دقیق‌تر می‌توان نتیجه گرفت ۱۷۴۲۷۰۳ به عنوان شبکه بهینه انتخاب می‌گردد.



شکل (۲): استقلال از نتایج شبکه مجهز به مولد گردابه (در حالت هندسی Case F، عدد رینولدز ۳۳۰۰۰ و کسرحجمی ۴ درصد)

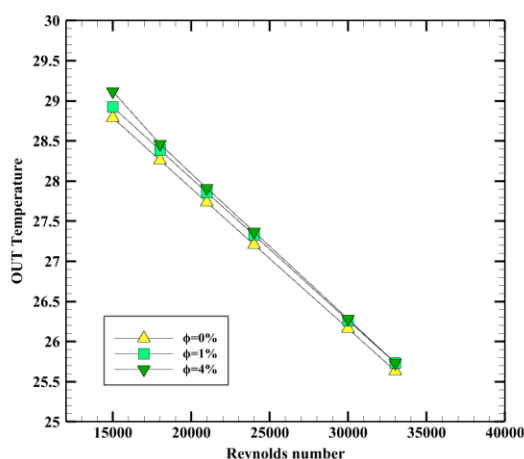
۵. اعتبارسنجی

برای اطمینان از روند حل محاسبات اعتبارسنجی عددی با مطالعه [۳۶] صورت گرفته است. در این مطالعه عددی [۳۶] نویسندگان اثر میدان مغناطیسی را در مبدل دولوله در حضور وجود توربولاتور با شکل هندسی مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده از بازده انرژی در اعداد رینولدز ۴۰۰۰ تا ۱۶۰۰۰ با مطالعه [۳۶] مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج در شکل (۳) گزارش شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج، هم‌پوشانی قابل قبولی دارند.

۶. ۲. تأثیر تغییرات رینولدز و درصد کسر حجمی

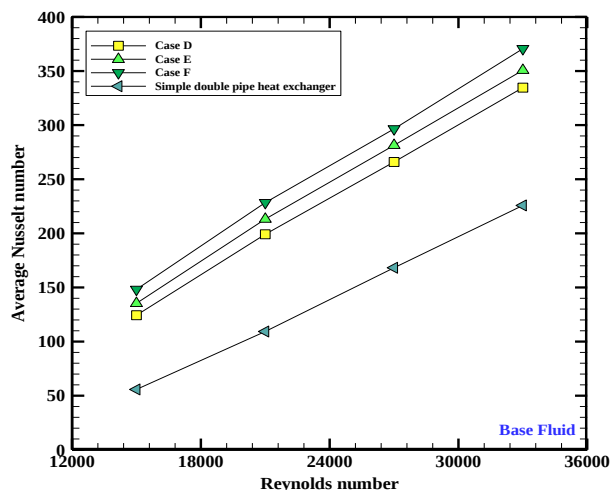
نانوذرات بر عدد دمای خروجی کلکتور

نمودار شکل (۵) تغییرات دمای خروجی کلکتور را برای سه کسر حجمی مختلف و در گستره عدد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز، دمای خروجی در تمامی کسرهای حجمی روندی کاملاً کاهشی دارد. دلیل اصلی این رفتار، افزایش دبی جرمی و در نتیجه کاهش زمان اقامت سیال درون لوله است که موجب می‌شود گرمایش سیال در طول مسیر کاهش یابد و اختلاف دمای ورودی-خروجی کوچک‌تر گردد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش کسر حجمی نانوذرات (از ۰ تا ۴٪) باعث افزایش مختصر دمای خروجی در تمامی رینولدزها شده است؛ این افزایش ناشی از بهبود هدایت حرارتی مؤثر، تقویت انتقال حرارت جابه‌جایی و ارتقای تبادل انرژی بین دیواره و سیال است. باین حال، اختلاف بین کسرهای حجمی نسبتاً محدود بوده و نشان می‌دهد که در حضور میدان مغناطیسی قوی ($Ha=125$) نقش غالب همچنان متعلق به اثرات هیدرودینامیکی (افزایش دبی) است. در مجموع، نمودار نشان می‌دهد که بیشترین دمای خروجی در کمترین رینولدز ($Re=15000$) و بالاترین کسر حجمی ($\phi=4\%$) حاصل شده و با افزایش رینولدز تا ۳۳۰۰۰، دمای خروجی با شیبی یکنواخت کاهش یافته و اختلاف بین کسرهای حجمی نیز کمتر می‌شود. این رفتار کاملاً با تحلیل‌های حرارتی-جریانی کلکتور و نتایج قبلی پژوهش سازگار است.

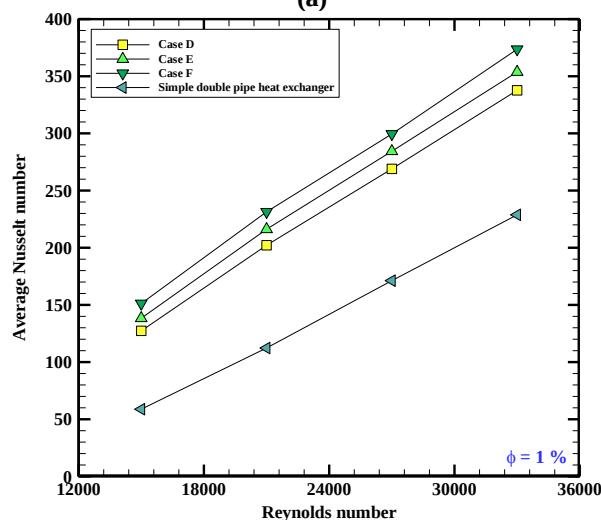


شکل (۵): تغییرات دمای خروجی کلکتور بر حسب رینولدزهای مختلف در شکل هندسی (CaseD) و در هارتمن ۱۲۵ و کسر حجمی‌های مختلف

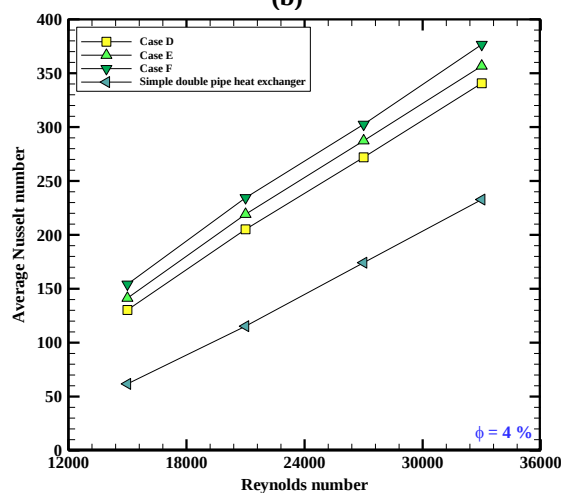
کانتورهای سرعت در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 درون کلکتور خورشیدی



(a)



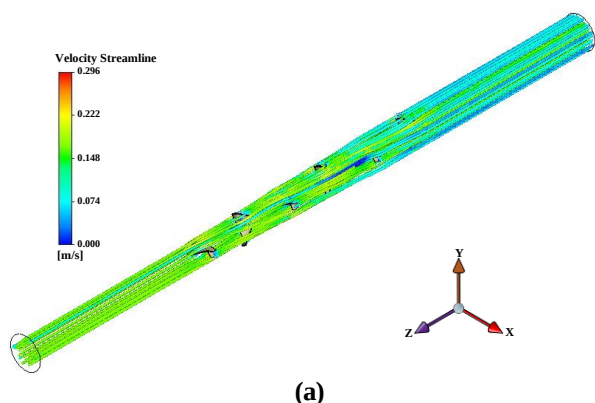
(b)



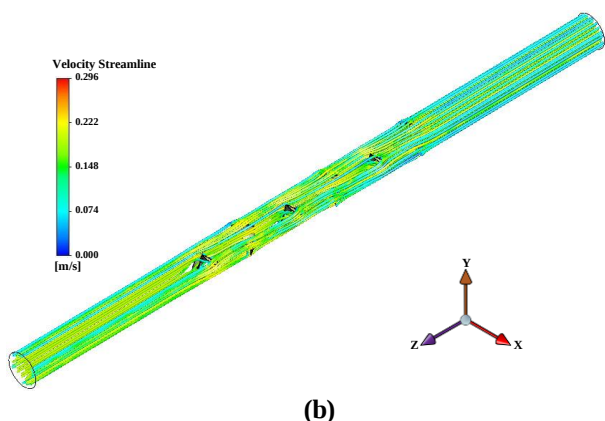
(c)

شکل (۴): تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف (a) سیال پایه، (b) کسر حجمی ۱ درصد، (c) کسر حجمی ۴ درصد

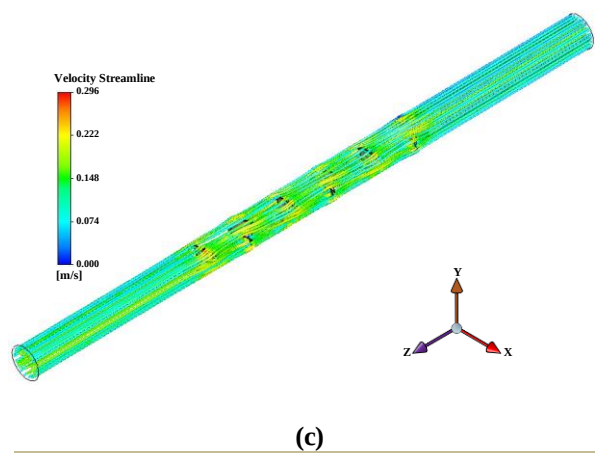
سهموی در نزدیک دیواره تقریباً برابر با صفر است. همچنین استفاده از مولد گردابه موجب ایجاد اختلاط و آشفتگی در کلکتور خورشیدی سهموی گردیده است.



(a)

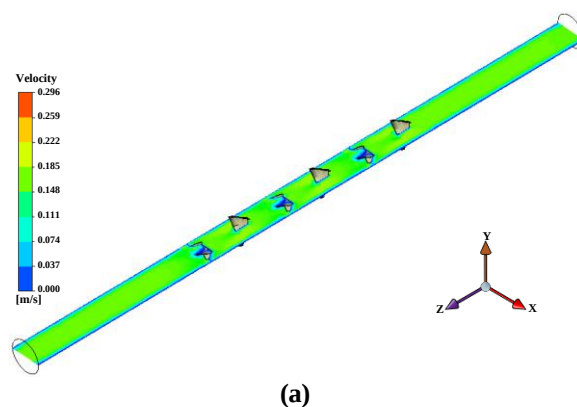


(b)

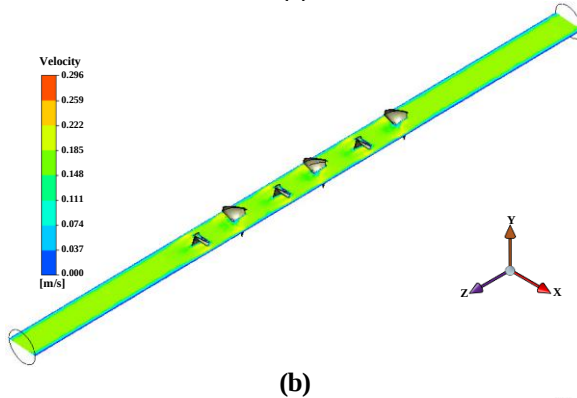


(c)

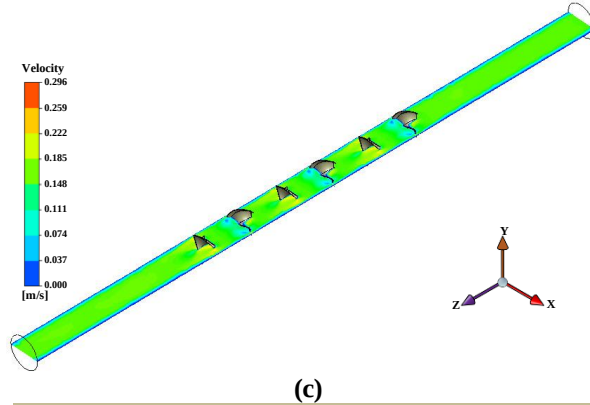
شکل (۷): کانتورهای خطوط جریان در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف



(a)



(b)



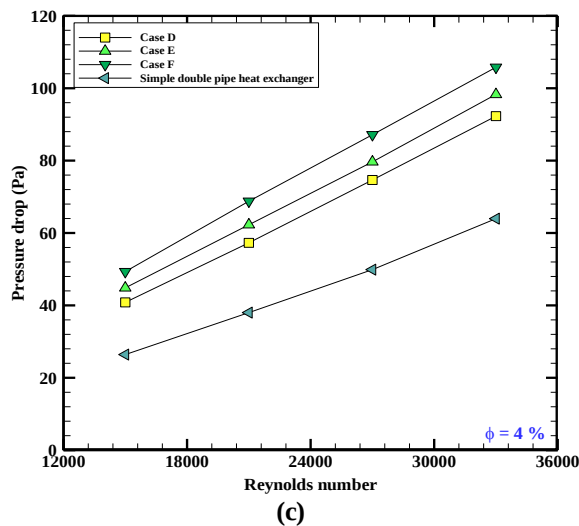
(c)

شکل (۸): کانتورهای سرعت در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف

۳.۶. تأثیر شکل هندسی مولدهای گردابه بر عدد ناسلت متوسط

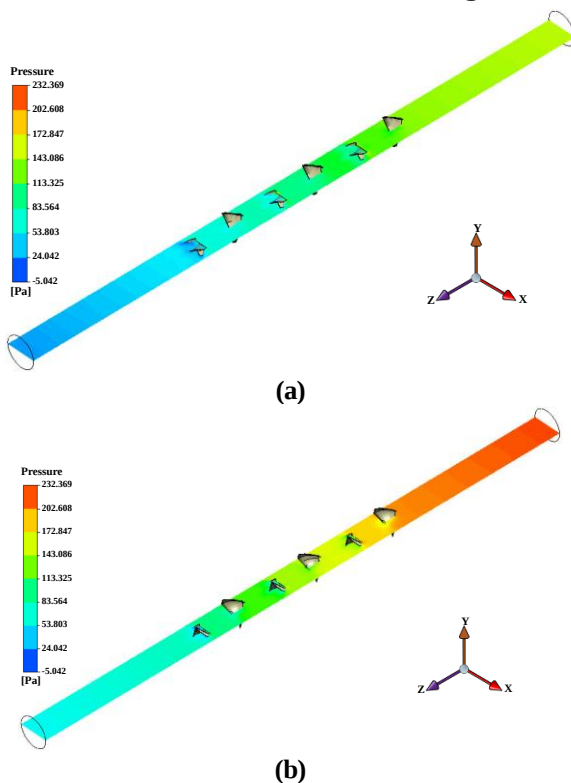
در شکل (۸) تغییرات افت فشار برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف (a) سیال پایه، (b) کسر حجمی ۱ درصد، (c) کسر حجمی ۴ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز و تغییر شکل هندسی مولد گردابه در کلکتور خورشیدی

کانتورهای خطوط جریان در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف در شکل (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشهود است، تغییر شکل هندسی مولدهای گردابه بر میزان تراکم خطوط جریان بسیار تأثیرگذار است و باعث افزایش آن می‌شود. بیشترین تراکم خطوط جریان ایجاد شده در کلکتور خورشیدی سهموی ناشی از حضور مولد گردابه با شکل هندسی Case F است.

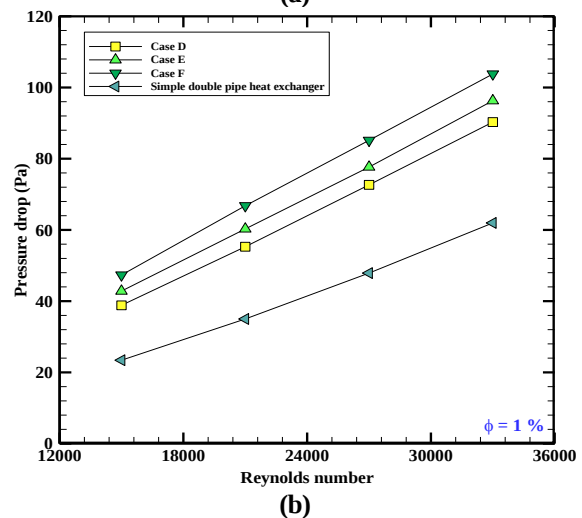
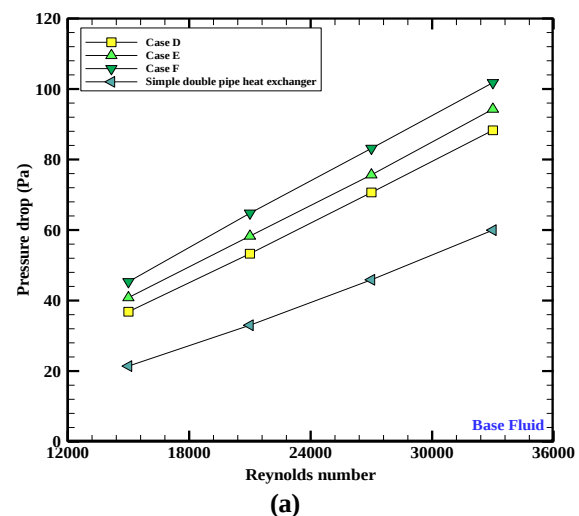


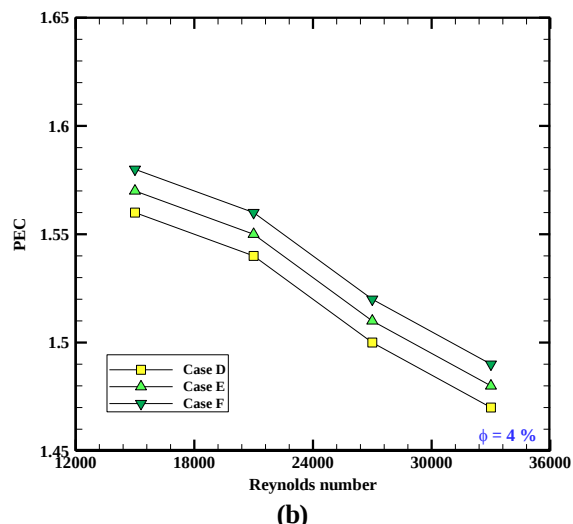
شکل (۸): تغییرات افت فشار برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف (a) سیال پایه، (b) کسر حجمی ۱ درصد، (c) کسر حجمی ۴ درصد

کانتورهای افت فشار در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تراکم خطوط جریان با تغییر شکل هندسی مولد گردابه در کلکتور خورشیدی سهموی افزایش می‌یابد. لذا این امر باعث افزایش افت فشار در ورودی کلکتور خورشیدی سهموی می‌گردد. به‌وضوح مشاهده می‌شود با تغییر شکل هندسی مولدهای گردابه میزان مقادیر افت فشار به‌دلیل تماس بیشتر جریان با سطح مولدهای گردابه افزایش می‌یابد.



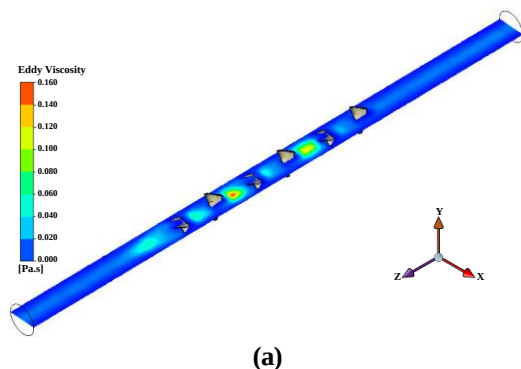
سهموی، افت فشار همواره در تمامی حالات روندی افزایشی دارد. در واقع با مجهز کردن لوله کلکتور خورشیدی سهموی به مولدهای گردابه همواره باعث افزایش افت می‌گردد. در سیال پایه Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود افت فشار به میزان ۷۳/۱۱ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد. در کسر حجمی ۱ درصد از نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود افت فشار به میزان ۷۴/۰۲ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد. در کسر حجمی ۴ درصد از نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود افت فشار به میزان ۷۴/۳۶ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد.



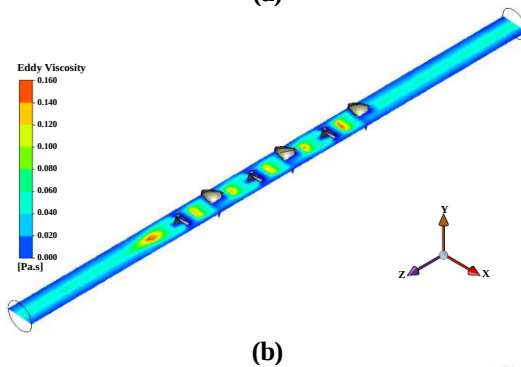


(b)

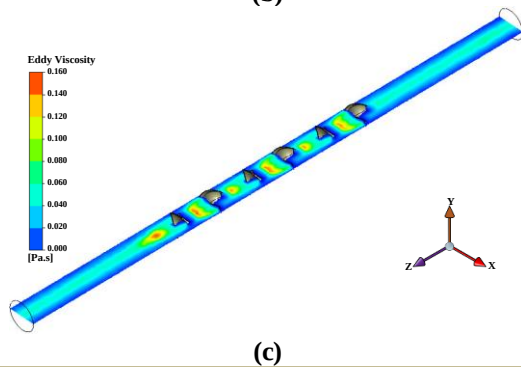
شکل (۱۰): تغییرات ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف (a) کسر حجمی ۱ درصد و (b) کسر حجمی ۴ درصد



(a)

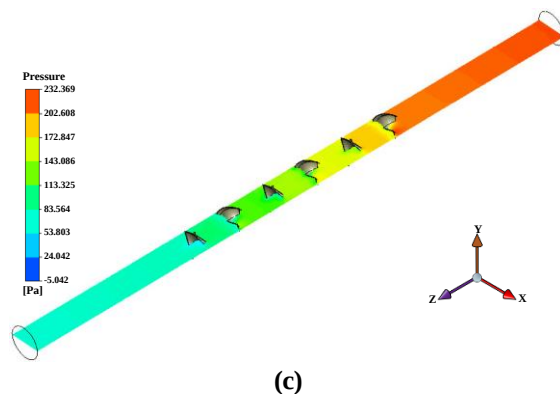


(b)



(c)

شکل (۱۱): کانتورهای ادی ویسکوزیته در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف



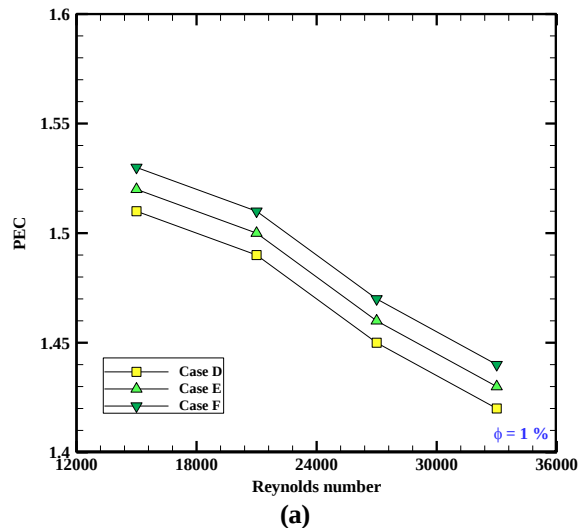
(c)

شکل (۹): کانتورهای افت فشار در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف

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

تغییرات ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف (a) کسر حجمی ۱ درصد و (b) کسر حجمی ۴ درصد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمامی حالات مقادیر ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی بیشتر از ۱ است. این بدان معناست که استفاده از هر سه مدل هندسی مولد گردابه در مطالعه حاضر به لحاظ شاخص PEC مناسب است.

کانتورهای ادی ویسکوزیته در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی مختلف در شکل (۱۱) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با تغییر شکل هندسی مولدهای گردابه تراکم خطوط جریان افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش گردابه‌های ناشی از لزجت می‌گردد. در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F تغییرات ادی ویسکوزیته به مراتب نسبت به شکل‌های هندسی دیگر بیشتر است.

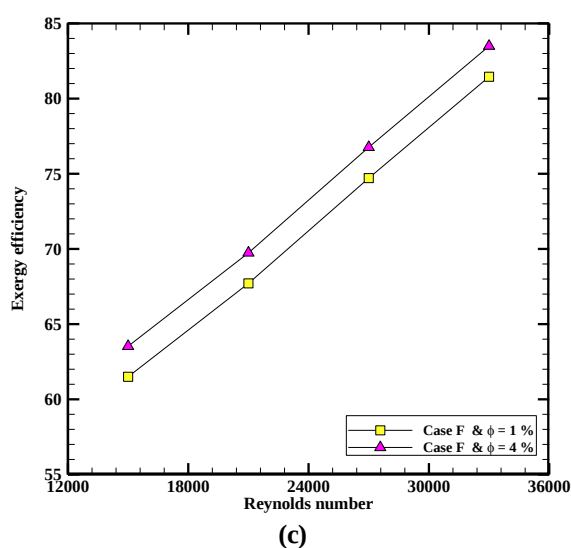
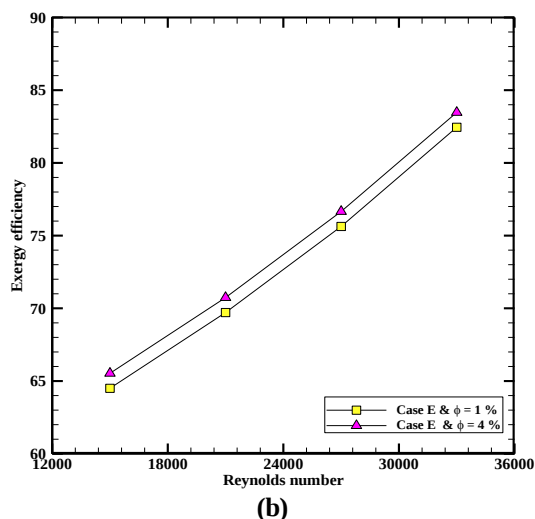


(a)

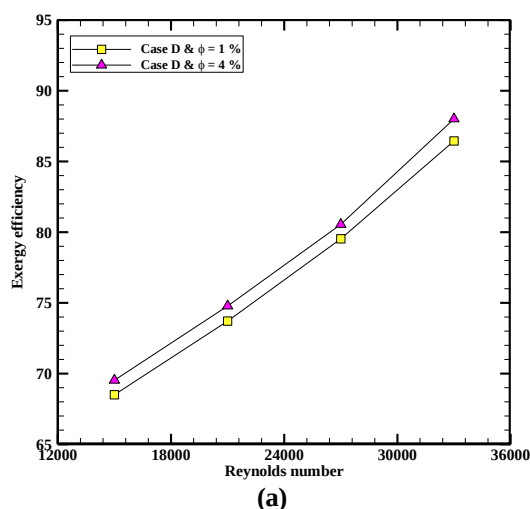
۵.۶. تأثیر شکل هندسی مولدهای گردابه بر بازده

اگزرژی

تغییرات بازده اگزرژی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با (a) شکل هندسی Case D، (b) شکل هندسی Case E، (c) شکل هندسی Case F در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بازده اگزرژی با افزایش عدد رینولدز و کسرحجمی نانوذرات روندی صعودی دارد. این در حالی است که تغییر شکل هندسی مولدهای گردابه باعث کاهش بازده اگزرژی گردیده است. در کلکتور خورشیدی سهموی به‌همراه مولد گردابه با حالت هندسی Case D و کسرحجمی ۴ درصد با افزایش عدد رینولدز از ۱۵۰۰۰ به ۳۳۰۰۰ مقدار بازده اگزرژی به میزان ۲۶/۵۸ درصد افزایش می‌یابد. در کلکتور خورشیدی سهموی به‌همراه مولد گردابه با حالت هندسی Case E و کسرحجمی ۴ درصد با افزایش عدد رینولدز از ۱۵۰۰۰ به ۳۳۰۰۰ مقدار بازده اگزرژی به میزان ۲۷/۳۸ درصد افزایش می‌یابد. در کلکتور خورشیدی سهموی به‌همراه مولد گردابه با حالت هندسی Case F و کسرحجمی ۴ درصد با افزایش عدد رینولدز از ۱۵۰۰۰ به ۳۳۰۰۰ مقدار بازده اگزرژی به میزان ۲۸/۹۲ درصد افزایش می‌یابد.



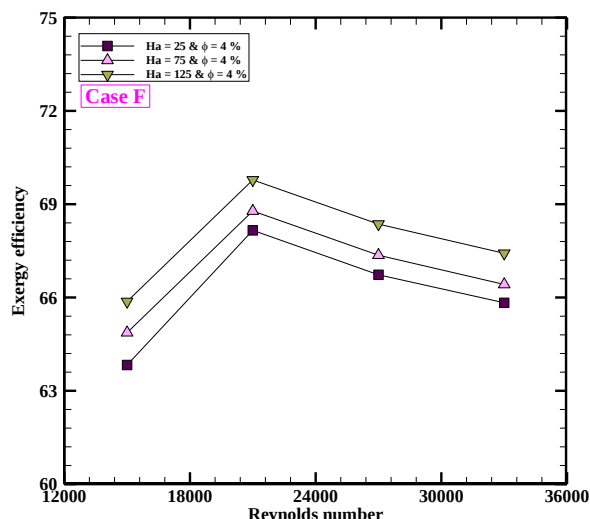
شکل (۱۲): تغییرات بازده اگزرژی برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با (a) شکل هندسی Case D، (b) شکل هندسی Case E، (c) شکل هندسی Case F



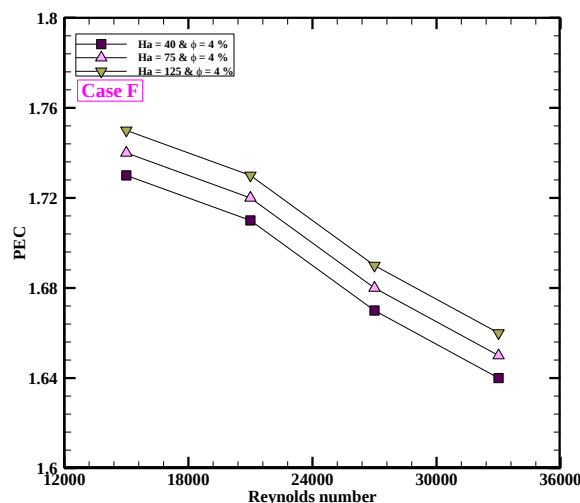
۶.۶. تأثیر میدان مغناطیسی بر عملکرد هیدرولیکی-حرارتی

حرارتی

تغییرات شاخص PEC برحسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F تحت تأثیر میدان مغناطیسی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز شاخص PEC کاهش و با افزایش عدد هارتمن افزایش می‌یابد. این در حالی است که در تمامی حالت‌ها شاخص PEC بیشتر از ۱ می‌باشد؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میدان مغناطیسی در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F به‌لحاظ شاخص PEC مطلوب است.



شکل (۱۴): تغییرات بازده انرژی در حین تغییر عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F تحت تأثیر میدان مغناطیسی



شکل (۱۳): تغییرات شاخص PEC بر حسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F تحت تأثیر میدان مغناطیسی

۶. ۷. تأثیر میدان مغناطیسی بر بازده انرژی

تغییرات بازده انرژی بر حسب عدد رینولدز در کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F تحت تأثیر میدان مغناطیسی در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش عدد هارتمن از ۲۵ تا ۱۲۵، بازده انرژی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش عدد رینولدز تا ۲۱۰۰۰ بازده انرژی افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میدان مغناطیسی حداکثر بازده انرژی را در عدد رینولدز ۲۱۰۰۰ و عدد هارتمن ۱۲۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F دارد. با افزایش Re تا حدود ۲۱۰۰۰، همرفت به‌طور مؤثر تقویت می‌شود (افزایش Nu) و دمای دیواره کاهش می‌یابد؛ این کاهش اختلاف دمای دیواره-سیال تخریب حرارتی را کم کرده و در نتیجه انرژی مفید (نسبت به ورودی) افزایش می‌یابد. بنابراین بازده انرژی رشد می‌کند.

پس از Re حدود ۲۱۰۰۰ رشد بیشتر Re باعث دو اثر نامطلوب می‌شود: افزایش معنی‌دار افت فشار و توان پمپاژ (افزایش تلفات مکانیکی/ویسکوزی)، در حضور میدان مغناطیسی و مولد گردابه، افزایش رینولدز همراه با اثرات MHD و تضعیف یا بازتوزیع آشفتگی می‌تواند منجر به افزایش تولید آنتروپی از اصطکاک و میرایی لورنتس شود؛ هر دوی این‌ها افزایش تخریب انرژی را در پی دارند. در نتیجه سهم افزایش «حرارت مفید» نسبت به افزایش تلفات کمتر شده و بازده انرژی شروع به کاهش می‌کند.

۷. نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، اثر مولدهای گردابه در یک کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به تیغه‌های خارجی مورد بررسی قرار گرفت. شکل هندسی مختلف از مولدهای گردابه بر رفتار جریان بررسی گردید. در این مطالعه به‌منظور کاربرد بهتر اثر میدان مغناطیسی در اعداد هارتمن ۲۵ تا ۱۲۵ مطابق شکل (۱) بر کلکتور خورشیدی سهموی اعمال شد. نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 به‌عنوان سیال کاری در کسر حجمی صفر، ۱ و ۴ درصد مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. مطالعه برای رژیم جریان آشفتگی و در اعداد رینولدز ۱۵۰۰۰ تا ۳۳۰۰۰ انجام می‌شود. همچنین به‌منظور حل جریان آشفتگی و گسسته‌سازی معادلات به‌ترتیب از مدل توربولانسی K-Omega SST و الگوریتم سیمپل سی استفاده شده. نتایج به‌دست‌آمده از این مطالعه عبارت‌اند از:

- با افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت تحت تأثیر قرار گرفته و زیاد می‌شود. در واقع با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 زیاد شده و در نتیجه عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.
- در کسر حجمی ۴ درصد از نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود عدد ناسلت متوسط به میزان ۶۵/۸۳ درصد نسبت به زمانی که

(Cp)	گرمای ویژه در فشار ثابت
(D)	قطر داخلی لوله
(Do)	قطر خارجی لوله
(f)	ضریب اصطکاک
(Ha)	عدد هارتمن
(h)	ضریب انتقال حرارت جابجایی
(k)	ضریب هدایت حرارتی
(L)	طول لوله
(Nu)	عدد ناسلت
(p)	فشار
(Pr)	عدد پرانتل
(q")	شار حرارتی سطحی
(Re)	عدد رینولدز
(T)	دما
(T _w)	دمای دیواره
(T _b)	دمای بالک سیال
(u)	سرعت جریان
(V)	سرعت حجمی سیال
(VG)	مولد گردابه (Vortex Generator)
ρ_{nf}	چگالی نانوسیال هیبریدی
μ_{nf}	ویسکوزیته مؤثر نانوسیال
k_{nf}	ضریب هدایت حرارتی مؤثر
$(\rho c_p)_{nf}$	ظرفیت حرارتی حجمی مؤثر
ϕ	کسر حجمی کل نانوذرات
ϕ_{Cu}	کسر حجمی نانوذرات مس
ϕ_{CNT}	کسر حجمی نانولوله‌های کربنی
α	ضریب انتقال حرارت مؤثر / زاویه نصب VG
β	ضریب انبساط حرارتی
η	بازده حرارتی
η_{ex}	بازده اگزرژی
σ	رسانندگی الکتریکی
τ	تنش برشی
ω	K- ω فرکانس یا کمیت مدل
$\vec{L}F$	نیروی لورنتس
$\vec{j}$	چگالی جریان الکتریکی
σ_{nf}	رسانندگی الکتریکی نانوسیال هیبریدی
ΔP	افت فشار
PEC	شاخص ترکیبی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی
$\dot{Q}$	نرخ انتقال حرارت
S_{gen}	نرخ تولید آنتروپی

درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد.

- با افزایش عدد رینولدز و تغییر شکل هندسی مولد گردابه در کلکتور خورشیدی سهموی، افت فشار همواره در تمامی حالات روندی افزایشی دارد. در واقع با مجهز کردن لوله کلکتور خورشیدی سهموی به مولدهای گردابه همواره باعث افزایش افت می‌گردد.

- در کسر حجمی ۴ درصد از نانوسیال هیبریدی دوفازی Cu-DWCNT/Therminol VP-1 و عدد رینولدز ۳۳۰۰۰، افزودن مولد گردابه (حالت هندسی Case F) درون کلکتور خورشیدی سهموی باعث می‌شود افت فشار به میزان ۷۴/۳۶ درصد نسبت به زمانی که درون کلکتور خورشیدی سهموی بدون مولد گردابه است، افزایش یابد.

- در تمامی حالات مقادیر ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی بیشتر از ۱ است. این بدان معناست که استفاده از از هر سه مدل هندسی مولد گردابه در مطالعه حاضر به لحاظ شاخص PEC مناسب است.

- بازده اگزرژی با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات روندی صعودی دارد. این درحالی است که تغییر شکل هندسی مولدهای گردابه باعث کاهش بازده اگزرژی شده است.

- در کلکتور خورشیدی سهموی به همراه مولد گردابه با حالت هندسی Case F و کسر حجمی ۴ درصد با افزایش عدد رینولدز از ۱۵۰۰۰ به ۳۳۰۰۰ مقدار بازده اگزرژی به میزان ۲۸/۹۲ درصد افزایش می‌یابد.

- با افزایش عدد هارتمن از ۲۵ تا ۱۲۵، بازده اگزرژی افزایش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش عدد رینولدز تا ۲۱۰۰۰ بازده اگزرژی افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. در واقع می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از میدان مغناطیسی حداکثر بازده اگزرژی را در عدد رینولدز ۲۱۰۰۰ و عدد هارتمن ۱۲۰ درون کلکتور خورشیدی سهموی مجهز به مولد گردابه با شکل هندسی Case F دارد.

ضمایم

فهرست علائم

نماد	توضیح
(A)	مساحت سطح لوله
(B)	شدت میدان مغناطیسی

مراجع

- [1] Sheikholeslami, M., Jafaryar, M., Farkhadnia, F. "Investigation of turbulent flow and heat transfer in an air to water double-pipe heat exchanger", *Neural Comput & Applic*, Vol. 26, pp. 941–947, 2015, <https://doi.org/10.1007/s00521-014-1769-8>
- [2] Hosseini, S., Farhadi, M., Sedighi, K., "Experimental investigation of a solar desalination system using twisted tape and wire coil inside of spiral heat exchanger", *Desalination*, Vol. 420 pp.34-44, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.06.004>.
- [3] Kassim, S., Salah Fouad, A., Samarmad, O., "Experimental and Numerical Study of Enhancement Heat Transfer Coefficient of TiO₂/Water Nanofluid in Spiral Fluted Tube Equipped with Twisted Tape", *Nanoscience & Nanotechnology-Asia*, Vol. 7, Number 2, <https://doi.org/10.2174/2210681206666161021105504>.
- [4] Sadighi Dizaji, H., Jafarmadar, S., Mobadersani, F., "Experimental studies on heat transfer and pressure drop characteristics for new arrangements of corrugated tubes in a double pipe heat exchanger", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 96,, pp. 211-220, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.05.009>.
- [5] Hazbehian, M., Maddah, H., Mohammadiun, H., "Experimental investigation of heat transfer augmentation inside double pipe heat exchanger equipped with reduced width twisted tapes inserts using polymeric nanofluid". *Heat Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2515–2529, 2016 <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1764-y>
- [6] Gupta, M., Kumar, R., Arora, N. "Forced Convective Heat Transfer of MWCNT/Water Nanofluid Under Constant Heat Flux: An Experimental Investigation". *Arab J Sci Eng*, Vol. 41, pp. 599–609, 2016, <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1699-5>
- [7] Maddah, H., Ghasemi, N., Keyvani, B., "Experimental and numerical study of nanofluid in heat exchanger fitted by modified twisted tape: exergy analysis and ANN prediction model". *Heat Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 1413–1423, 2017, <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1906-2>.
- [8] Ghasemi, S.E., Ranjbar, A.A., "Numerical thermal study on effect of porous rings on performance of solar parabolic trough collector", *Applied Thermal Engineering*, Vol.118,, pp. 807-816, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.021>.
- [9] Chokphoemphun, S., Pimsarn, M., Thianpong, CH., Promvonge, P., "Heat transfer augmentation in a circular tube with winglet vortex generators", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 23, pp. 605-614, Issue 4, 2015,, <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2014.04.002>.
- [10] Hashemian, M., Jafarmadar, S., Sadighi Dizaji, H., "A comprehensive numerical study on multi-criteria design analyses in a novel form (conical) of double pipe heat exchanger", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 102, pp. 1228-1237, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.057>.
- [11] Sheikholeslami, M., Hatami, M., Jafaryar, M., Farkhadnia, F., DomiriGanji, D., Gorji-Bandpy, M., "Thermal management of double-pipe air to water heat exchanger, *Energy and Buildings*", Vol. 88, pp. 361-366, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.076>.
- [12] Hu, Y., Zhang, B., Tan, K., He, Y., Zhu, J., "Regulation of natural convection heat transfer for SiO₂– solar salt nanofluids by optimizing rectangular vessels design", *Asia-Pac J Chem Eng*, Vol. 15, 2020, <https://doi.org/10.1002/apj.2409>.
- [13] Aghayari, R., Maddah, H., Pourkiaei, S.M., Ahmadi, M.H., Che, L., Ghazvini, M., "Theoretical and experimental studies of heat transfer in a double-pipe heat exchanger equipped with twisted tape and nanofluid", *Eur. Phys. J. Plus*, Vol.135, No.252, 2020, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00252-8>.
- [14] Samruaisin, P., Kunrak, K., Chuwattanakul, V., Eiamsa-ard, S., "Effect of sparsely placed twisted tapes installed with multiple-transverse twisted baffles on heat transfer enhancement", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 140, pp. 1159-1175, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09202-8>.
- [15] Pourfattah, F., Sabzpooshani, M., Bayer, Ö., Toghraie, D., Asadi, A., "On the optimization of a vertical twisted tape arrangement in a channel subjected to MWCNT–water nanofluid by coupling numerical simulation and genetic algorithm", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 144, pp. 189-201, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09490-5>.
- [16] He, W., Toghraie, D., Lotfipour, A., Pourfattah, F., Karimipour, A., Afrand, M., "Effect of twisted-tape inserts and nanofluid on flow field and heat transfer characteristics in a tube", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 110, No. 104440, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104440>
- [17] Singh, S.Kr., Sarkar, J., "Improving hydrothermal performance of double-tube heat exchanger with

- modified twisted tape inserts using hybrid nanofluid*", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 143, pp. 4287-4298, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09380-w>
- [18] Karimipour, A., D'Orazio, A., Safdari Shadloo, M., "The effects of different nano particles of Al₂O₃ and Ag on the MHD nano fluid flow and heat transfer in a microchannel including slip velocity and temperature jump, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures", Vol. 86, pp.146-153, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.10.015>
- [19] Massoudi, M.D., Bechir Ben Hamida, M., A. Almeshaal, M., Hajlaoui, K., "The influence of multiple fins arrangement cases on heat sink efficiency of MHD MWCNT-water nanofluid within tilted T-shaped cavity packed with trapezoidal fins considering thermal emission impact, International Communications in Heat and Mass Transfer", Vol. 126, No. 105468, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105468>.
- [20] Melnikov, I.A., Sviridov, E.V., Sviridov, V.G., Razuvanov, N.G., "Experimental investigation of MHD heat transfer in a vertical round tube affected by transverse magnetic field", Vol. 112, pp. 505-512, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.06.003>.
- [21] Talugeri, V., Pattana, N.B., Nasi, V.B., "Experimental investigation on a solar parabolic collector using water-based multi-walled carbon-nanotube with low volume concentrations" Sci Rep. Vol.13, No. 7398, 2023, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34529-6>.
- [22] Rahman, Atiqur, Md., Hasnain, SM., Pandey, SH., Tapalova, A., Akyzbekov, N., Zairov, R., "Review on nanofluids: preparation, properties, stability, and thermal performance augmentation in heat transfer applications." ACS omega, Vol. 9, No. 30, pp. 32328-32349, 2024, <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c03279>
- [23] Zhu, Shiquan, Hu, Z., Cheng, CH., Hu, W., Cao, SH., Peng, Y., Li, L., Peng, Y., "Effect of the arrangement of longitudinal vortex generators on the performance of a parabolic trough solar collector." Journal of Mechanical Science and Technology, Vol:38, No. 3, pp. 1473-1486, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12206-024-0239-1>
- [24] Güner, Levent, Taylan, O., Günay, AA., "Performance Improvement of Parabolic Trough Collector With Thermal Oil-Based Metal-Oxide Nanofluids." In SolarPACES Conference Proceedings, Vol. 3, 2024, <https://doi.org/10.52825/solarpaces.v3i.2397>
- [25] Donga, Ramesh. K., Kumar, S., Velidi, G., "Heat transfer enhancement in a parabolic trough collector using finned tubular absorber." Scientific Reports, Vol. 15, No. 24142, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-07825-6>
- [26] Hejazian, M., Moraveji, M.K., Beheshti, A., "Comparative study of Euler and mixture models for turbulent flow of Al₂O₃ nanofluid inside a horizontal tube", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 152-158, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.022>
- [27] Zheng, Y., Yaghoubi, S., Dezfulizadeh, A., "Free convection/radiation and entropy generation analyses for nanofluid of inclined square enclosure with uniform magnetic field". J Therm Anal Calorim, Vol. 141, pp. 635-648, 2020, <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09497-y>.
- [28] Aminfar, H., Mohammadpourfard, M., Mohseni, F., "Two-phase mixture model simulation of the hydro-thermal behavior of an electrically conductive ferrofluid in the presence of magnetic fields", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 324, pp.830-842, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2011.09.028>.
- [29] Saffarian, M.R., Moravej, M., Doranehgard, M.H., "Heat transfer enhancement in a flat plate solar collector with different flow path shapes using nanofluid", Renewable Energy, Vol. 146, pp. 2316-2329, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.081>.
- [30] Roohbakhsh MeyaryDovom, A., Aghaei, A., HassaniJ oshaghani, A., Dezfulizadeh, A., azadi kakavandi, A., "Numerical analysis of heating aerosol carbon nanofluid flow in a power plant recuperator with considering ash fouling: a deep learning approach", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol 141, pp 75-90, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2022.05.001>
- [31] Nasirzadehroshenin, F., Maddah, H., Sakhaeina, H., "Investigation of Exergy of Double-Pipe Heat Exchanger Using Synthesized Hybrid Nanofluid Developed by Modeling". Int J Thermophys, Vol. 40, No. 87, 2019, <https://doi.org/10.1007/s10765-019-2551-z>.
- [32] Mwesigye, A., Yilmaz, İ. H., Meyer, J. P., "Numerical analysis of the thermal and thermodynamic performance of a parabolic trough solar collector using SWCNTs-Therminol®VP-1 nanofluid", Renewable Energy, Vol. 119, pp. 844-862, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.047>.
- [33] Alqaed, S., Mustafa, J., Sharifpur, M. "Numerical simulation and artificial neural network modeling of exergy and energy of parabolic trough solar collectors equipped with innovative turbulators containing hybrid nanofluids". J Therm Anal

- Calorim, Vol. 148, pp. 8611–8626, 2023, <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11538-7>.
- [34] Rahimi, A., Kasaeipoor, A., Hasani Malekshah, E., Kolsi, L., "Experimental and numerical study on heat transfer performance of three-dimensional natural convection in an enclosure filled with DWCNTs-water nanofluid", Powder Technology, Vol 322, pp. 340-352, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.008>.
- [35] Soomro, F.A., Usman, M., El-Sapa, S. "Numerical study of heat transfer performance of MHD Al₂O₃-Cu/water hybrid nanofluid flow over inclined surface". Arch Appl Mech, Vol. 92, pp. 2757–2765. 2022, <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02214-1>.
- [36] Dezfulizadeh, A., Aghaei, A., Hassani Joshaghani, A. "Exergy efficiency of a novel heat exchanger under MHD effects filled with water-based Cu–SiO₂-MWCNT ternary hybrid nanofluid based on empirical data". J Therm Anal Calorim, Vol. 147, pp. 4781-4804, 2022 <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10867-3>.