



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Investigating of Fluid Flow and Heat Transfer of MWCNT-Fe₃O₄ Hybrid Nanofluid Inside the Integrated Solar Collector Storage

Rasul Mohebbi ^{a,*}

^a School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran; P.O. Box: 3671641167

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-08-06

Revised: 2025-04-05

Accepted: 2025-05-12

Keywords:

Nanofluid;
Integrated solar collector
storage;
Fluid flow;
Nusselt number.

ABSTRACT

The need for clean energy in today's world is increasing day by day due to the limited nature of fossil resources. Solar energy can be utilized in various domestic, agricultural, and industrial applications. Integrated solar storage collectors are extensively used for generating heat by absorbing solar energy and converting it into thermal energy. Therefore, there is a significant need to design and produce these collectors to achieve the highest performance and efficiency. In this research, considering a type of integrated solar storage collector and using the hybrid nanofluid MWCNT-Fe₃O₄, its effect at different Rayleigh numbers (10^3 - 10^6) and various nanofluid percentages (0-0.003) has been investigated. Velocity and temperature contours and streamlines in different positions of the hot absorber inside the collector have been examined. The local and average Nusselt numbers have also been studied. The results indicate an increase in heat transfer at the Rayleigh number and a high percentage of nanofluid. Additionally, the optimal position for placing the hot absorber is at the far right end of the collector. The results of this research are published for the first time and can be used for designing solar collectors.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34968.2716>

© 2026 Published by Semnan University Press.

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

* Corresponding author.

E-mail address: rasul_mohebbi@du.ac.ir

How to cite this article:

R. Mohebbi, "Investigating of Fluid Flow and Heat Transfer of MWCNT-Fe₃O₄ Hybrid Nanofluid Inside the Integrated Solar Collector Storage," Journal of Modeling in Engineering, 24 84 (2026): 15-26, doi: 10.22075/jme.2025.34968.2716

بررسی جریان سیال و انتقال حرارت نانو سیال هیبریدی MWCNT-Fe₃O₄ داخل جمع کننده ذخیره ساز یکپارچه خورشیدی

رسول محبی^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۶	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۶	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲	
واژگان کلیدی:	
نانو سیال،	نیاز به انرژی پاک در دنیای امروزی با توجه محدود بودن منابع فسیلی روز به روز در حال افزایش است. انرژی خورشیدی می تواند در مصارف مختلف خانگی، کشاورزی و صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. جمع کننده های ذخیره ساز یکپارچه خورشیدی جهت تولید حرارت از طریق دریافت انرژی خورشیدی و تبدیل آن به انرژی حرارتی مورد استفاده فراوان دارد. در نتیجه ضرورت طراحی و تولید این جمع کننده ها به گونه ای که دارای بالاترین عملکرد و بازدهی را داشته باشد، بسیار احساس می شود. لذا در این تحقیق با در نظر گرفتن یک نوع جمع کننده ذخیره ساز یکپارچه خورشیدی و با استفاده از نانو سیال هیبریدی MWCNT-Fe ₃ O ₄ ، تاثیر آن در اعداد رایلی مختلف (۱۰ ^۳ -۱۰ ^۶) و درصد های نانوسیال متنوع (۰ تا ۰.۰۳) بررسی شده است. کانتورهای سرعت و دما و خطوط جریان در حالت های مختلف قرارگیری جاذب داغ در داخل کلکتور بررسی گردیده است. اعداد ناسلت موضعی و متوسط نیز بررسی شده است. نتایج حاکی از افزایش میزان انتقال حرارت در عدد رایلی و درصد بالای نانوسیال است. همچنین موقعیت قرار گیری مانع داغ در منتهی الیه سمت راست جمع کننده، بهینه ترین حالت می باشد. نتایج این تحقیق برای اولین بار منتشر گردیده و می تواند برای طراحی کلکتورهای خورشیدی مورد استفاده قرار گیرد.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34968.2716>

© 2026 Published by Semnan University Press.

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

۱- مقدمه

پیشرفت جوامع امروزی که با رشد سریع تکنولوژی در زمینه های مختلف علوم پزشکی و مهندسی همراه است، نیاز فزاینده ای برای دستیابی به انرژی ارزان، تجدید پذیر و پاک را ایجاد نموده است. تغییرات در سبک زندگی و افزایش انتظارات برای بهبود کیفیت زندگی، دانشمندان را در یافتن روش های مختلف تولید انرژی و افزایش بازده تجهیزات ترغیب نموده است. سوخت های فسیلی که در حال حاضر منبع اصلی انرژی محسوب می شوند، با دو چالش جدی گرمایش زمین و آلودگی محیط زیست و

همچنین محدودیت دسترسی به عنوان منابع غیر قابل

تجدید مواجه هستند [۱].

در حال حاضر، انرژی های تجدیدپذیر اصلی شامل انرژی خورشیدی، باد، آب، جزر و مد و زمین گرمایی هستند. از میان این منابع، انرژی خورشیدی به دلیل ویژگی های پاک بودن و ایمنی، مزایای برجسته ای دارد.

بر خلاف نیروگاه های بادی که اغلب در مناطق دورافتاده و با دسترسی محدود به مصرف کنندگان نهایی قرار می گیرند، سیستم های انرژی خورشیدی می توانند در نزدیکی مراکز مصرف نصب شوند. این ویژگی باعث کاهش نیاز به خطوط

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: rasul_mohebbi@du.ac.ir

۱. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

استناد به این مقاله:

رسول محبی، "بررسی جریان سیال و انتقال حرارت نانو سیال هیبریدی MWCNT-Fe₃O₄ داخل جمع کننده ذخیره ساز یکپارچه خورشیدی،" مدل سازی در مهندسی،

doi: 10.22075/jme.2025.34968.2716، ۲۶-۱۵: (۱۴۰۵) ۸۴ ۲۴

از روش‌های مرسوم از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی خصوصیات رئولوژیکی نانوسیالات غیریونی به صورت تجربی توسط تاجیک و همکاران انجام شد [۸]. Al_2O_3 ، TiO_2 و CuO سیال‌های مورد استفاده در تحقیق آنها بود. واگهل و همکاران [۹] به صورت تجربی تأثیرات استفاده از نانوسیال نقره/آب و نوارهای پیچ‌خورده در لوله جاذب یک کلکتور خورشیدی شلجی را بررسی کردند. بر اساس نتایج، عدد ناسلت در لوله جاذب با نوار پیچ‌خورده ۱.۲۵ تا ۲.۱ برابر بیشتر از لوله ساده بود. چانگ و همکاران [۱۰] از یک میله نازک مستقیم درون لوله جاذب و نمک مذاب به عنوان سیال عامل استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش قطر میله نازک مستقیم، عدد ناسلت از ۱.۱ تا ۷.۴۲ برابر بیشتر از حالت ساده جاذب افزایش می‌یابد.

کورس و بلوس [۱۱] به صورت عددی تأثیر افزودن نانوسیال $Syltherm\ 800/CuO$ را بر عملکرد کلکتور در جریان آرام بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزودن نانوذرات، کارایی کلکتور ۲.۷۶٪ افزایش می‌یابد. مطالعه‌ای عددی بر روی عملکرد یک کلکتور با شیار مارپیچ توسط ژو و همکاران [۱۲] انجام شد. نتایج آنها نشان داد که حداکثر بهبود در عملکرد حرارتی کلی جاذب شیاردار در مقایسه با جاذب ساده با تنظیم فاصله گام، ارتفاع شیار و شعاع گوشه به ترتیب ۱۲.۵٪، ۹.۸٪ و ۱۰.۸٪ خواهد بود. همچنین، بهبود کلی عملکرد برای زاویه مارپیچ بهینه (۳۰ درجه) ۳۰.۱٪ است.

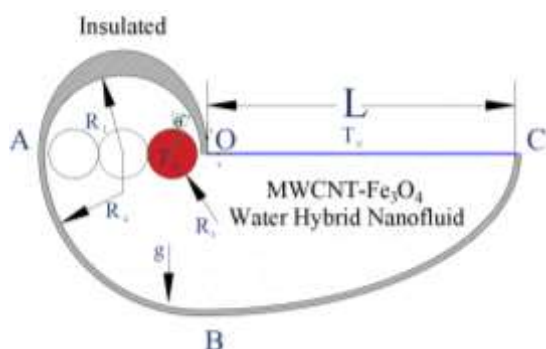
بزرگ و همکاران [۱۳] از ساختار متخلخل دایره‌ای و نانوسیال Al_2O_3 در یک لوله جاذب استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که در دماهای ۵۰۰ کلوین و ۶۰۰ کلوین، ضریب انتقال حرارت به ترتیب ۷٪ و ۲۰٪ افزایش می‌یابد. با توجه به مطالعات گذشته، استفاده از کلکتورهای خورشیدی متمرکز به عنوان یک حوزه تحقیقاتی جالب در سال‌های اخیر مورد توجه واقع شده است. تلفات انتقال حرارت از یک آبگرمکن خورشیدی یکپارچه با کلکتور و مخزن ذخیره (ICSSWH) می‌تواند با استفاده از یک بازتابنده نامتقارن همراه با یک مخزن استوانه‌ای کاهش یابد. بدین ترتیب منطقه‌ای از هوای گرم به دام افتاده، ایجاد می‌شود که توسط تماس با سطح مخزن استوانه‌ای گرم می‌گردد. تربیانانگوستوپولوس و همکاران [۱۴] برای اولین بار دو نوع ICSSWH نامتقارن (ICS-1 و ICS-2) را با تکنیک‌های مختلف کاهش تلفات حرارتی ساختند.

انتقال انرژی طولانی و کاهش فشار بر روی زیرساخت‌های انتقال می‌شود [۲].

گرمایش فضای داخل ساختمان‌ها همواره از موضوعات مهم کشورهای دارای اقلیم سرد است. گرمایش فضا با انرژی خورشیدی نه تنها سازگار با محیط زیست است بلکه نیاز به نگهداری و هزینه‌های عملیاتی کمتری در مقایسه با روش‌های متداول دارد. یکی از راه‌های استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، گرمایش آب در دماهای پایین است که معمولاً با استفاده از کلکتورهای خورشیدی ترموسیفون و واحدهای کلکتور ذخیره‌سازی یکپارچه (ICS) صورت می‌گیرد. طراحی و ساخت این آبگرمکن‌های خورشیدی به نیازهای عملیاتی هر کاربرد و شرایط آب و هوایی محل استفاده بستگی دارد. به طور کلی، این واحدها برای کاربردهای مقیاس کوچک مانند آبگرمکن‌های خانگی با ظرفیت ۱۰۰-۲۰۰ لیتر در روز مناسب هستند. مهم است که این سیستم‌ها قابل اعتماد، کارآمد و با نگهداری ساده باشند تا بتوانند به طور موثری در تامین انرژی پایدار مشارکت کنند [۳].

مهمترین نکته در استفاده از این ذخیره‌کننده‌ها، طراحی کلکتورهای ذخیره‌سازی یکپارچه (ICS) ساده‌تر، ارزاتر، بادوام‌تر و با بیشترین بازده و بهترین کارایی می‌باشد. تا کنون دانشمندان زیادی در این خصوص مطالعه نموده‌اند. ردی و همکاران [۴] مدل توزیع جریان حرارتی را برای یک سیستم متمرکزکننده خورشیدی با دیسک کانونی فازی به مساحت ۲۰ متر مربع توسعه دادند. آن‌ها کارایی متوسط انتقال حرارت کلکتور دیسک پارابولیک با محفظه اصلاح‌شده را برابر با ۷۴٪ در دبی با جریان ۲۵۰ لیتر در ساعت به دست آوردند. سلطانی و همکاران [۵] رابطه‌ای میان پارامترهای هندسی و عملیاتی یک گیرنده حفره‌ای استوانه‌ای با در نظر گرفتن همرفت طبیعی در سطح مسطحی که از پایین گرم می‌شود، برقرار کردند. سی-کوان و همکاران [۶] به بررسی عملکرد نوری و ترمودینامیکی یک گیرنده حفره‌ای کروی پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که کارایی نوری گیرنده حفره‌ای کروی ۸۸.۹٪ است که کمی بیشتر از کارایی گیرنده‌های حفره‌ای استوانه‌ای، مخروطی و مخروطی مسطح می‌باشد.

مطالعات زیادی برای افزایش میزان انتقال حرارت در هندسه‌های مختلف و کلکتورهای خورشیدی انجام شده است [۷]. استفاده از نانوسیال‌های متنوع در کنار استفاده



شکل ۱- هندسه مورد بررسی

در این مطالعه مانع داغ در سه مکان (a) یا منتهی الیه چپ، (b) یا موقعیت وسط و (c) یا منتهی الیه سمت راست قرار گرفت.

۲-۲- خواص نانوسیال

چگالی، گرمای ویژه، ضریب پخش حرارتی، ضریب انبساط حجمی و عدد پراتل نانوسیال به ترتیب به شرح زیر هستند: [۱۶] و [۱۷]

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۱)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (۲)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (۳)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (۴)$$

$$Pr_{nf} = \frac{(\mu c_p)_{nf}}{k_{nf}} \quad (۵)$$

که در آن ϕ نشان دهنده کسر حجمی نانوذرات است و زیرنویس های f، nf و p به ترتیب نشان دهنده سیال پایه، نانوسیال و نانوذرات هستند. خواص نانوسیال هیبریدی MWCNT-Fe₃O₄ / آب در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی نانوسیال هیبریدی MWCNT-Fe₃O₄ / آب [۱۸]

ϕ	c_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	ویسکوزیته (mPa.s)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	P (kg/m ³)
0 (Pure fluid)	4182	0.79	0.602	998.5
0.001	4182.66	0.91	0.6734	1002.34
0.003	4183.99	1.01	0.6856	1010.04

محبی و یوان [۱۵] به بررسی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال درون حفره‌ای سهموی با مانع گرم به اشکال دایره‌ای و بیضوی پرداختند. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود و عملکرد حرارتی منبع گرم با حرکت آن به سمت بالای حفره افزایش می‌یابد.

با توجه به عدم وجود اطلاعاتی در خصوص عملکرد کلکتورهای ذخیره سازی یکپارچه و به منظور تاثیر استفاده از نانوسیال ها بر عملکرد این کلکتورها، برای اولین بار یک کلکتور متمرکز حاوی نانوسیال هیبریدی کربنی چند دیواره با اکسید آهن بررسی گردیده است. تغییر مکان جاذب به عنوان تشخیص مکان مناسب جهت طراحی کلکتور در اعداد رایلی و درصد نانوسیال مختلف، از اهداف این تحقیق می باشد. نتایج این تحقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. هندسه مورد بررسی، براساس مطالعات پیشین و کاربردهای رایج در کلکتورهای یکپارچه ذخیره ساز خورشیدی انتخاب شده است تا مطالعه حاضر دارای کاربرد عملی و تطبیق پذیری بیشتری باشد.

۲- روابط مورد نیاز

۲-۱- هندسه مورد بررسی

در این مطالعه، جریان سیال و انتقال گرمای دوطبقه در یک کلکتور ذخیره سازی یکپارچه مطابق شکل ۱ بررسی شده است. در شکل نشان داده شده L برابر یک متر بوده و نسبت های شعاع های داده شده به قرار ذیل است:

$$R_1=0.27 \text{ m}$$

$$R_2=0.54 \text{ m}$$

$$R_3=0.85 \text{ m}$$

بخش OBC نیز از یک بیضی تشکیل شده است. سیال عامل مورد استفاده نانو سیال هیبریدی MWCNT-Fe₃O₄ می باشد. دیواره OC سرد با دمای T_c صفر درجه کلوین بوده و دمای مانع داغ برابر یک درجه کلوین در نظر گرفته شده است. مابقی دیواره‌ها، عایق در نظر گرفته شدند.

چگالی طبق تعریف بوزینسکی تغییر کرده و ساختار جریان نیز آرام فرض شده است. گرانش برای ایجاد اختلاف چگالی ضروری است. فرض بر این است که بین مخلوط آب و نانوذرات هیچ لغزشی وجود ندارد و آنها در تعادل حرارتی هستند. آهنگ انتقال گرما داخل حفره در اعداد رایلی متعدد با محاسبه عدد ناسلت روی دیواره‌های گرم بیان شده است.

$$Nu = \int_0^1 Nu_{local} dY \quad (۱۴)$$

۳- بررسی نتایج

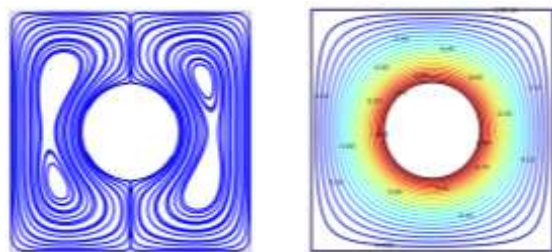
۳-۱- اعتبار سنجی

به منظور اثبات قابلیت اعتماد روش عددی، نتایج تحقیقات گذشته با نتایج موجود از حل حاضر بررسی شده‌اند. در جدول ۲ نتایج حاصل از عدد ناسلت متوسط برای جابجایی طبیعی داخل یک حفره مربعی دارای منبع حرارتی دایره‌ای را نشان می‌دهد. مطابق این جدول، نتایج اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر دارد.

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط و نتایج موجود

رایلی	نتایج حاضر	شو و زو [20]	رن و همکاران [21]
10^3	3.156	-	-
10^4	3.214	3.24	3.161
10^5	4.889	4.86	4.836
10^6	8.868	8.90	8.546

به منظور بررسی صحت کد عددی با نتایج گذشته، خطوط جریان و دما برای جریان داخل حفره مربعی حاوی مانع داغ در اعداد رایلی 10^3 در شبیه سازی چن و همکاران [۱۹] با نتایج موجود بررسی گردید که در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج بیانگر دقت بالای کد مورد استفاده می باشد.



خطوط جریان

خطوط دما

شکل ۲- نتایج مقایسه ای برای حالت عدد رایلی 10^3 کد مورد استفاده با نتایج چن و همکاران [۱۹]

جهت حل مسئله، دامنه محاسباتی شبکه بندی شده است. یک شبکه مناسب و تا حد امکان یکنواخت در دقت جوابها و همچنین پایداری حل عددی اهمیت زیادی دارد. مش مورد استفاده در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳-۲- معادلات اصلی

در این شبیه سازی که از نرم افزار کمسول استفاده شد، معادلات ابتدا در فرم بی بعد به صورت زیر تعریف گردیدند:

$$\begin{aligned} X &= x/L, Y = y/H, U = (uL)/\alpha, V = (vL)/\alpha \\ P &= (pL^2)/(\rho\alpha^2), \theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c} \end{aligned} \quad (۶)$$

که U و V مؤلفه‌های سرعت در جهات x و y ، T دما، p فشار و θ دمای بی بعد می‌باشد. همچنین α و ρ به ترتیب ضریب پخش گرمایی و چگالی سیال است. با تعریف پارامترهای بی بعد تعریف شده، معادلات جریان دائمی پیوستگی، مومنتم و انرژی برای همرفت طبیعی لایه‌ای داخل حفره در حالت بی بعد به شرح ذیل بیان می‌شود:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۷)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (۸)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \text{Ra Pr } \theta \quad (۹)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (۱۰)$$

که اعداد پرانتل و رایلی طبق رابطه (۶) تعریف می‌شوند:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, \text{Ra} = \frac{g\beta L^3 (T_h - T_c)}{\nu\alpha} \quad (۱۱)$$

که g شتاب جاذبه، β و ν ضریب انبساط حجمی و لزجت سینماتیک و L طول محفظه است. شرایط مرزی بی بعد نیز به صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شوند:

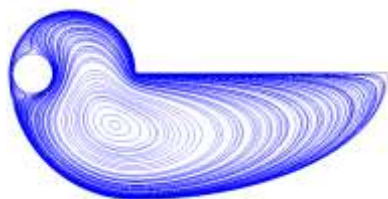
$$\begin{aligned} U &= V = 0 && \text{شرط عدم لغزش در کل دیواره ها} \\ \theta &= 1 && \text{برای دیواره های گرم} \\ \theta &= 0 && \text{برای دیواره های سرد} \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} &= 0 && \text{برای دیواره های عایق} \end{aligned} \quad (۱۲)$$

عدد ناسلت محلی و متوسط نیز در دیواره داخلی با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) در جهت عمود بر سطح (n) ، به دست می‌آید:

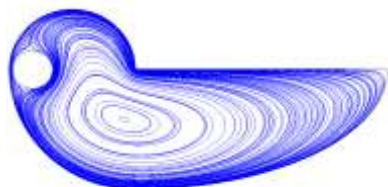
$$Nu_{local} = -\frac{\partial \theta}{\partial n} \quad (۱۳)$$

ماکزیمم، در حفره یک گردابه بزرگ بیضوی افقی متمایل به سمت چپ آن ایجاد می شود.

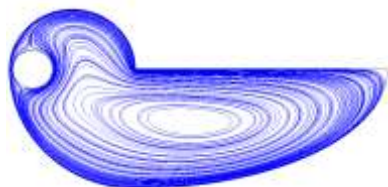
$Ra=10^3$



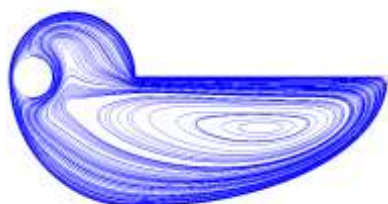
$Ra=10^4$



$Ra=10^5$

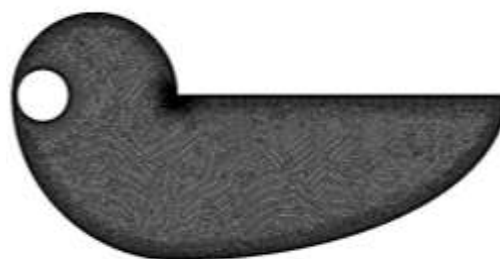


$Ra=10^6$



شکل ۴- خطوط جریان برای موقعیت قرارگیری (a) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.00$

شکل های (۵) و (۶) کانتورهای سرعت و دما را برای حالتی که منبع حرارتی در موقعیت (a) قرار دارد، برای اعداد رینولدز مختلف و در $\phi = 0$ نشان می دهد. لازم به ذکر است که نوار رنگی مورد استفاده در کانتورهای سرعت و دما ثابت بوده و به ترتیب بر حسب متر بر ثانیه و درجه سانتیگراد می باشد. مطابق شکل (۵)، در اعداد رایلی پایین، اندازه سرعت در بخش وسط حفره ماکزیمم بوده که تحت تأثیر شکل حفره و مانع است. همان گونه که مشاهده می گردد، مقدار سرعت در مابقی قسمت ها بسیار پایین است. با افزایش عدد رایلی و بزرگ شدن جریان همرفتی، این مقدار سرعت افزایش می یابد و همچنین در امتداد حفره و به طرف راست کشیده می شود.



شکل ۳- مش مورد استفاده

به منظور استقلال کد عددی از شبکه مورداستفاده نیز جدول ۳ برای حالت های مختلف شبکه بندی تهیه گردید. مطابق این جدول تعداد ۳۴۷۲۷ المان در کل محاسبه عددی مورد استفاده قرار گرفت.

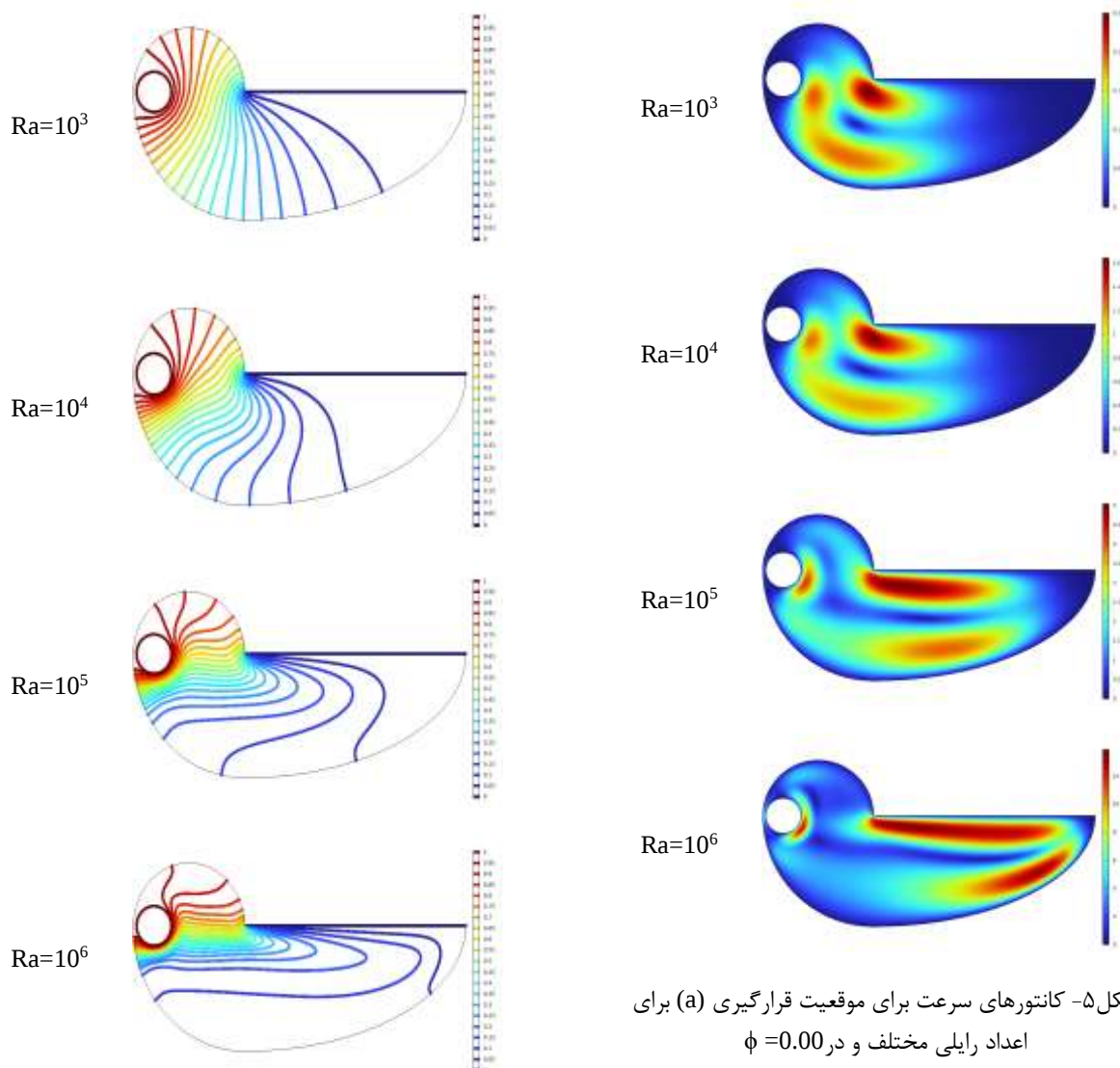
جدول ۳- عدد ناسلت متوسط در شبکه بندی های مختلف برای

قرارگیری مانع در سمت چپ و برای سیال پایه

رایلی	شبکه	عدد ناسلت متوسط	درصد خطا $100 \times \left \frac{Nu_{new} - Nu_{old}}{Nu_{new}} \right $
10^3	۶۱۶	۰/۹۲۶۹۵	۱/۱۷۳۳
	۱۱۲۵	۰/۹۱۶۲	۰/۷۵۴۴
	۲۶۲۱	۰/۹۰۹۳۴	۰/۴۵۹۵
	۳۴۷۲۷	۰/۹۰۵۱۸	
10^6	۶۱۶	۴/۵۵۲۵	۳/۹۶۲۰
	۱۱۲۵	۴/۳۷۹۰	۲/۲۶۰۵
	۲۶۲۱	۴/۲۸۲۲	۰/۶۴۸۷
	۳۴۷۲۷	۴/۲۵۴۶	

۳-۲- کانتورهای سرعت، دما و خطوط جریان

شکل (۴) خطوط جریان برای آب خالص ($\phi = 0$) را در حالتی که منبع حرارتی در موقعیت (a) یعنی منتهی الیه سمت چپ قرار گرفته است را برای اعداد رایلی مختلف نشان می دهد. در ابتدا، به دلیل حالت پایدار جریان، ساختار جریان داخل حفره از یک گردابه کلی تشکیل می گردد. در رایلی 10^3 ، شکل گردابه تقریباً بیضوی است وقتی که Ra به 10^6 افزایش می یابد، شکل خطوط جریان در لایه های مختلف تغییر می کند و خطوط جریان به شکل کلی حفره نزدیک تر می شود. این موضوع به دلیل افزایش شدت همرفت ناشی از افزایش عدد رایلی می باشد. در حالت رایلی

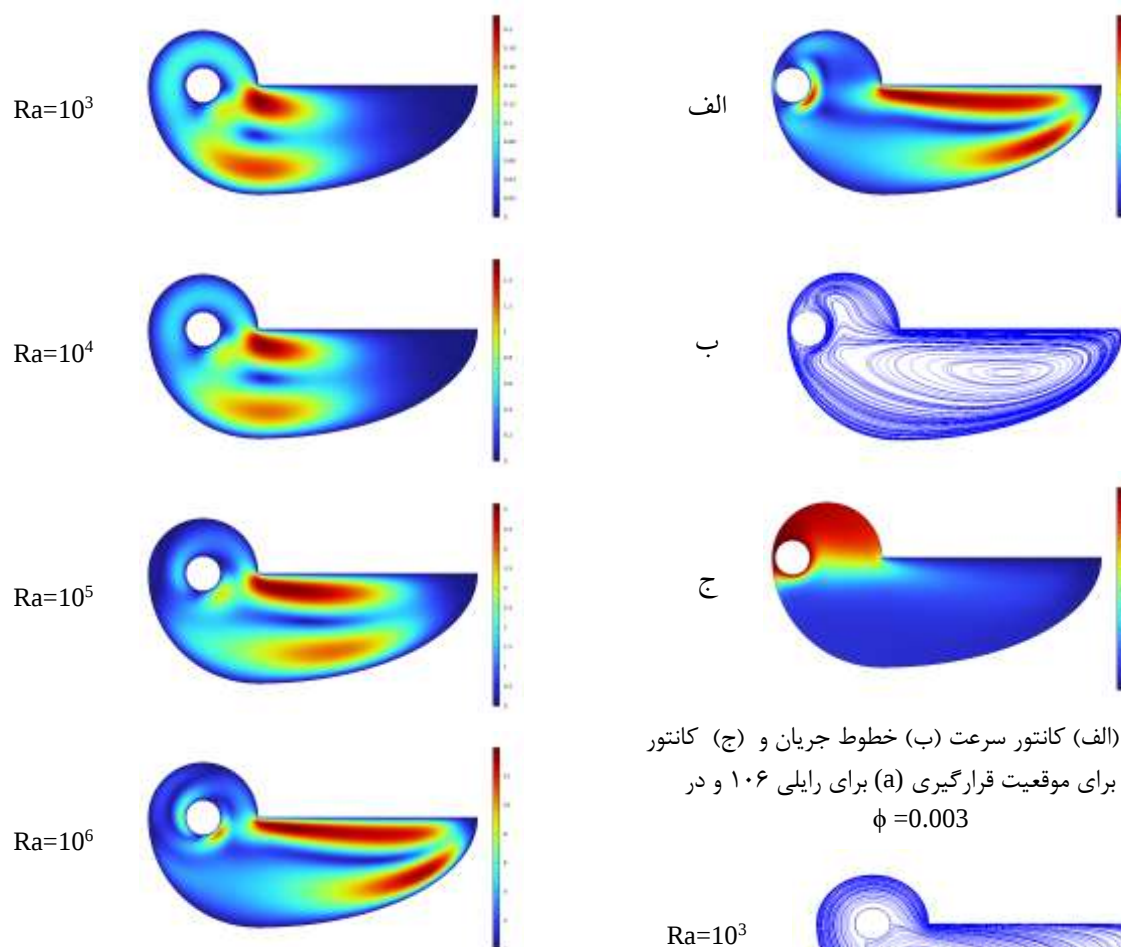


شکل ۵- کانتورهای سرعت برای موقعیت قرارگیری (a) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.00$

شکل ۶- کانتورهای دما برای موقعیت قرارگیری (a) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.00$

در شکل (۷)، کانتورهای سرعت و دما و خطوط جریان برای عدد رایلی 10^6 و برای $\phi = 0.003$ نمایش داده شده است. با مقایسه این شکل با شکل های (۳) تا (۵)، تاثیر اضافه شدن نانو سیال به سیال پایه مشخص می گردد. با اضافه شدن نانوذرات به سیستم، تشخیص تغییرات در میدان جریان و دما با چشم غیرمسلح دشوار است. بنابراین، تحلیل های بعدی شامل ارزیابی کمی تأثیر نانوسیال خواهد بود.

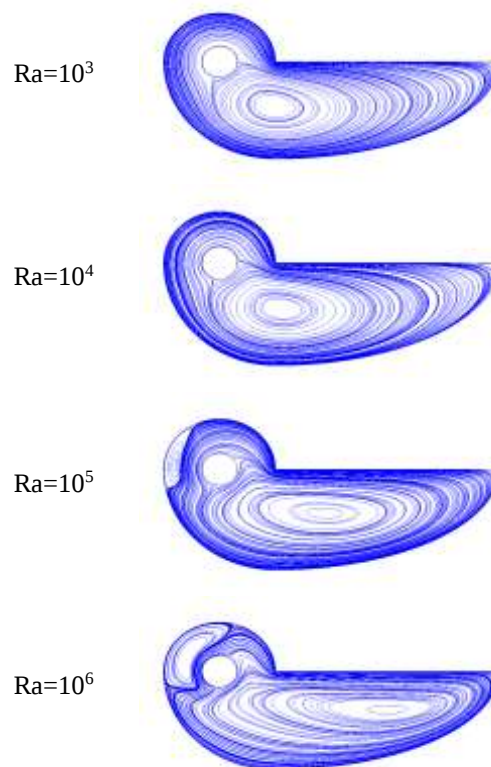
طبق شکل (۶) در عدد رایلی 10^3 ، به دلیل شدت کم همرفت و سرعت پایین جریان درون حفره، حالت اصلی انتقال حرارت از طریق هدایت حرارتی صورت می گیرد. بنابراین، خطوط همدمما نسبتاً صاف و یکنواخت و عمودی هستند. وقتی عدد رایلی به 10^6 افزایش می یابد، ستون های حرارتی بالای منبع حرارتی تشکیل می شوند و مستقیماً به دیواره بالای حفره برخورد می کنند که منجر به خنک تر شدن قسمت پایین حفره می گردد. لازم به ذکر است که در اعداد رایلی بالا، به دلیل تشکیل ستون های حرارتی و افزایش شدت همرفت، خطوط همدمما به طور یکنواخت توزیع نمی شوند.



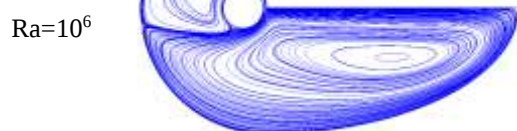
شکل ۷- (الف) کانتور سرعت (ب) خطوط جریان و (ج) کانتور دما برای موقعیت قرارگیری (a) برای رایلی ۱۰۶ و در $\phi = 0.003$

شکل ۹- کانتور سرعت برای موقعیت قرارگیری (b) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.003$

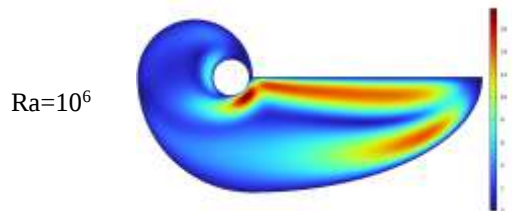
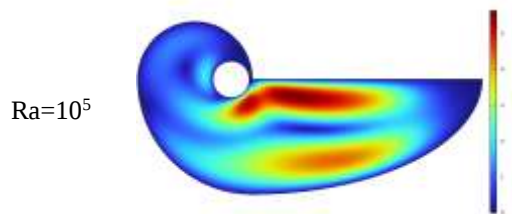
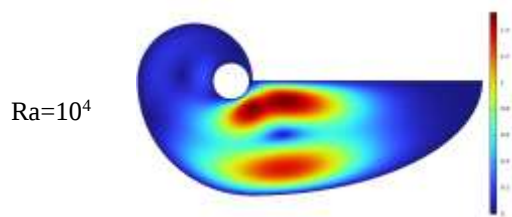
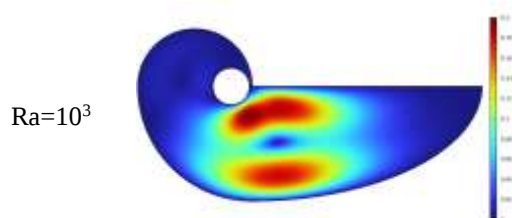
شکل‌های (۸) تا (۱۰) به ترتیب خطوط جریان، کانتورهای سرعت و کانتورهای همدمای را برای حالتی که منبع حرارتی دایره‌ای در وسط حفره یعنی موقعیت (b) قرار دارد، برای مقادیر مختلف Ra در $\phi = 0.003$ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در رایلی 10^3 و 10^4 ، الگوهای خطوط جریان و خطوط همدمای مشابه هستند. در این موقعیت با مقایسه موقعیت (a) تشکیل یک گردابه ثانویه در سمت چپ بالا مانع با افزایش عدد رایلی قابل مشاهده است. سرعت داخل حفره در این موقعیت نسبت به موقعیت (a) افزایش یافته است. توزیع خطوط همدمای نسبتاً یکنواخت به نظر می‌رسد و هیچ ستون حرارتی مشهود نمی‌باشد. با این حال، با افزایش Ra به 10^5 و 10^6 ، خطوط همدمای محسوسی افقی می‌شوند که نشان‌دهنده حضور ستون‌های حرارتی قابل توجه است.



شکل ۸- خطوط جریان برای موقعیت قرارگیری (b) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.003$



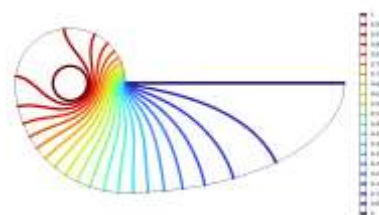
شکل ۱۱- خطوط جریان برای موقعیت قرارگیری (c) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.001$



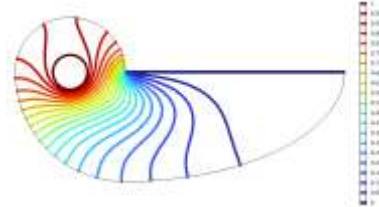
شکل ۱۲- کانتور سرعت برای موقعیت قرارگیری (c) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.001$

مطابق شکل (۱۲)، قرارگیری مانع در این حالت منجر به افزایش سرعت جریان در بخش سمت راست حفره گردیده است. با مقایسه شکل (۱۳) با شکل های (۵) و (۹)، تغییر

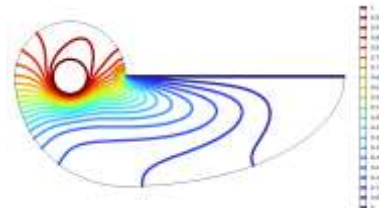
$Ra=10^3$



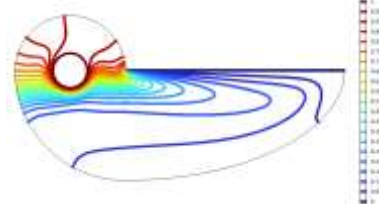
$Ra=10^4$



$Ra=10^5$



$Ra=10^6$



شکل ۱۰- کانتور دما برای موقعیت قرارگیری (b) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.003$

شکل های (۱۱) تا (۱۳) به ترتیب خطوط جریان، کانتورهای سرعت و کانتورهای همدم را برای حالتی که منبع حرارتی دایره ای در منتهی الیه سمت راست حفره یعنی موقعیت (c) قرار دارد، برای مقادیر مختلف Ra در $\phi = 0.001$ را نشان می دهد. مطابق شکل (۱۱)، تشکیل دو گردابه پر قدرت در داخل حفره کاملاً مشهود است که تحت تاثیر موقعیت مانع در منتهی الیه سمت راست، ایجاد گردیده و با افزایش عدد رایلی، قدرت آن افزایش می یابد.

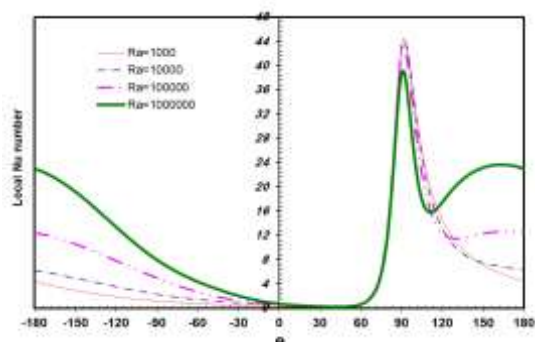
$Ra=10^3$



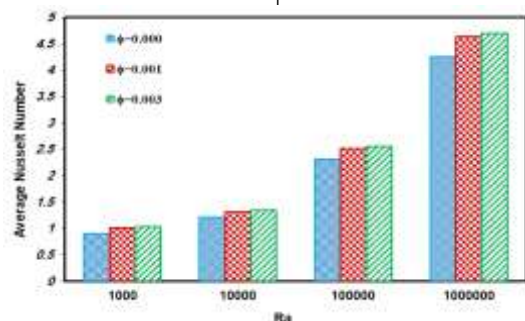
$Ra=10^4$



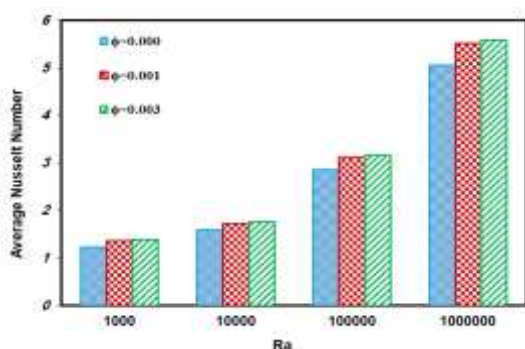
مربوطه به حالت رایلی ماکزیمم می باشد که در آن نیروی جابجایی ترم غالب می باشد.



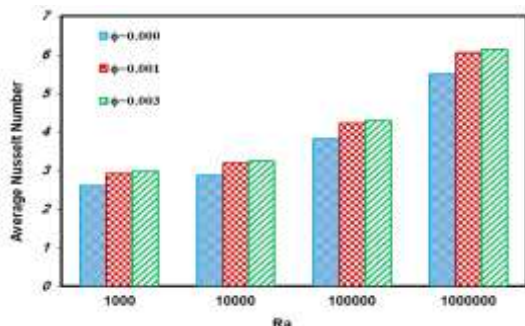
شکل ۱۴- نمودارهای عدد ناسلت محلی بر حسب عدد رایلی و زاویه برای حالت قرارگیری مانع در موقعیت (c) برای $\phi = 0.003$



(الف)



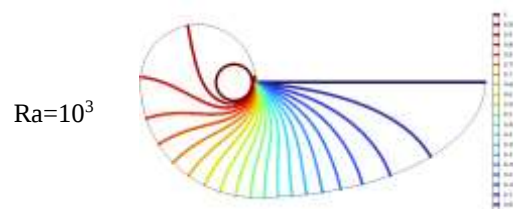
(ب)



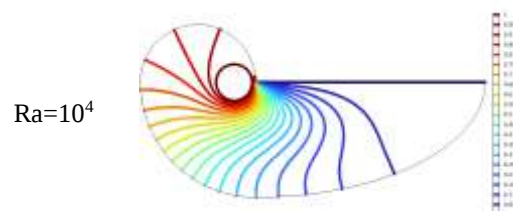
(ج)

شکل ۱۵- نمودارهای عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رایلی، به ازای وجود مانع در حالت‌های قرارگیری (الف) موقعیت (a) و (ب) موقعیت (b) و (ج) موقعیت (c)

خطوط دما ناشی از موقعیت خاص مانع مشهود می باشد. همچنین آشکار است که در اعداد رایلی پایین خطوط همدمان منظم بوده ولی تحت تاثیر نیروی جابجایی، در اعداد رایلی بالا بهم می خورد.



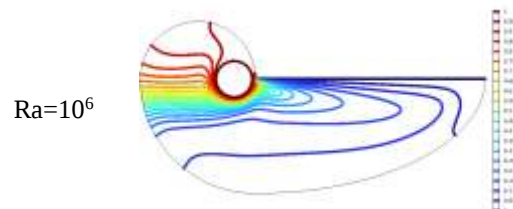
$Ra=10^3$



$Ra=10^4$



$Ra=10^5$



$Ra=10^6$

شکل ۱۶- کانتور دما برای موقعیت قرارگیری (c) برای اعداد رایلی مختلف و در $\phi = 0.001$

به منظور بررسی میزان انتقال گرما، عدد ناسلت محلی و متوسط بر روی مانع داغ محاسبه گردید. در شکل (۱۴) عدد ناسلت محلی در اعداد رایلی متفاوت و زوایای مختلف به ازای حالت قرارگیری مانع در موقعیت (c) برای $\phi = 0.003$ نشان داده شده است. همانگونه که دیده می شود، با شروع حرکت از لبه بالایی مانع به سمت راست، عدد ناسلت افزایش یافته و در موقعیت زاویه ۹۰ درجه به دلیل بالا بودن گرادیان دما به ماکزیمم مقدار خود می رسد. سپس این مقدار کاهش می یابد. همچنین با شروع حرکت از لبه بالایی مانع به سمت چپ نیز شاهد افزایش میزان انتقال حرارت هستیم. بیشترین مقدار انتقال حرارت نیز

جمع کننده ذخیره ساز یکپارچه خورشیدی با وجود منبع حرارتی بررسی شده است. تأثیر عدد رایلی (Ra)، کسر حجمی نانوذرات و موقعیت منبع حرارتی بر فرآیند جابجایی تحلیل شده است. مشاهده شد که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. همچنین، هنگامی که منبع حرارتی از منطقه چپ به منطقه راست منتقل می‌شود، عملکرد انتقال حرارت بهبود می‌یابد. بهترین حالت انتقال حرارت مربوط به رایلی 10^6 و ϕ برابر 0.003 در منتهی الیه سمت راست مشاهده گردید.

نتایج نشان می‌دهند که افزایش هم‌زمان کسر حجمی نانوذرات و عدد رایلی به افزایش چشمگیر میزان انتقال حرارت منجر می‌شود. در این حالت، حضور نانوذرات با رسانایی بالا و جریان همرفتی قوی، به‌طور هم‌افزا عمل کرده و بهینه‌ترین شرایط انتقال حرارت را فراهم می‌کنند. از این رو، طراحی بهینه کلکتور خورشیدی می‌تواند با ترکیبی از استفاده از نانوسیالات با کسر حجمی بالا و تنظیم شرایط حرارتی برای دستیابی به اعداد رایلی بالا به دست آید. این نکته به طراحان کمک می‌کند تا با اعمال شرایطی که هر دو پارامتر را بهینه سازند، به حداکثر کارایی دست یابند. نتایج این تحقیق جهت طراحی ساخت کلکتورهای خورشیدی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

تقدیر و تشکر

ندارد.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تأییدیه اخلاقی

نویسندگان متعهد می‌شوند که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده‌اند.

مشارکت‌های نویسندگان

همه توسط بنده انجام شده و نویسنده دیگری ندارد.

منابع مالی

ندارد.

شکل (۱۵) مقادیر متوسط عدد ناسلت را در مقادیر مختلف ϕ و Ra برای حالت قرارگیری مانع در موقعیت‌های متنوع حفره را نشان می‌دهد. با مقایسه حالت‌های مختلف، مشاهده می‌شود که وقتی منبع حرارتی از چپ به راست منتقل می‌شود، عدد ناسلت متوسط در هر مقدار Ra افزایش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که وقتی منبع حرارتی در سمت راست حفره قرار دارد، به منبع سرد نزدیک‌تر است و این امر به بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های انتقال حرارت کمک می‌کند.

مطابق شکل (۱۵) مقدار Nu_{ave} با افزایش Ra و ϕ ، صرف‌نظر از موقعیت منبع حرارتی، افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش کسر حجمی نانوذرات به‌طور مستقیم باعث افزایش عدد ناسلت و بهبود میزان انتقال حرارت شده است. این افزایش ناشی از بهبود رسانایی حرارتی نانوسیال به دلیل حضور نانوذرات است. این امر به‌ویژه در طراحی کلکتورهای خورشیدی اهمیت دارد، زیرا استفاده از نانوسیال با کسر حجمی بالاتر می‌تواند به کارایی بالاتر سیستم منجر شود و توانایی جذب و انتقال انرژی حرارتی را افزایش دهد. از این رو، انتخاب کسر حجمی بهینه برای بهبود کارایی کلکتورهای خورشیدی، از اهمیت بالایی برخوردار است.

افزایش عدد رایلی نشان‌دهنده افزایش شدت جریان همرفتی و جابجایی حرارتی در سیستم است. به عبارت دیگر، در اعداد رایلی بالا، انتقال حرارت ناشی از همرفت تقویت شده که این امر باعث بهبود عملکرد کلکتور می‌شود. از دیدگاه طراحی، این نتایج به معنای آن است که در شرایطی که امکان افزایش رایلی به دلیل تفاوت دمایی وجود دارد، می‌توان بهبود قابل توجهی در انتقال حرارت و عملکرد کلی سیستم انتظار داشت. بنابراین، در طراحی کلکتورهای خورشیدی باید توجه ویژه‌ای به تنظیم شرایط به گونه‌ای که حداکثر رایلی را داشته باشد، مد نظر قرار گیرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، جابجایی طبیعی نانوسیال درون یک نوع

مراجع

- [1] Atems, B., and C. Hotaling. "The effect of renewable and nonrenewable electricity generation on economic growth." *Energy Policy* 112, (2018): 111–118.
- [2] Vahidhosseini, Seyed Mohammad, Saman Rashidi, Shu-Han Hsu, Wei-Mon Yan, and Abbas Rashidi. "Integration of solar thermal collectors and heat pumps with thermal energy storage systems for building energy demand reduction: A comprehensive review." *Journal of Energy Storage* 95, (2024): 112568.

- [3] Tripanagnostopoulos, Y., and P. Yianoulis. "Integrated collector-storage systems with suppressed thermal losses." *Solar Energy* 48, no. 1 (1992): 31-43.
- [4] Reddy, K.S., S.K. Natarajan, and G. Veershetty. "Experimental performance investigation of modified cavity receiver with fuzzy focal solar dish concentrator." *Renew Energy*, no. 74 (2015): 148-57.
- [5] Soltani, S., M. Bonyadi, and A.V. Madadi. "A novel optical-thermal modeling of a parabolic dish collector with a helically baffled cylindrical cavity receiver." *Energy*, no. 168 (2019): 88-98.
- [6] Si-Quan, Z., L. Xin-Feng, D. Liu, and M. Qing-Song. "A numerical study on optical and thermodynamic characteristics of a spherical cavity receiver." *Appl Therm Eng*, no. 149 (2019): 11-21.
- [7] Mohebbi, R., Y. Ma, and P. Soleymani. "Investigating the Impact of Sinusoidal Walls on Fluid Flow and Heat Transfer Performance of C-Shaped Cavity." *Iran J Sci Technol Trans Mech Eng* (2024). <https://doi.org/10.1007/s40997-024-00781-y>
- [8] Tajik Jamal-Abad, M., M. Dehghan, S. Saedodin, M.S. Valipour, A. Zamzamian. "An experimental investigation of rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids." *J Heat Mass Transf Res* 1, no. 1 (2014): 17-23.
- [9] Waghole, D.R., R. Warkhedkar, and R. Shrivastva. "Experimental investigations on heat transfer and friction factor of silver nanofluid in absorber/receiver of parabolic trough collector with twisted tape inserts." *Energy Procedia*, no. 45 (2014): 558-67.
- [10] Chang, C., A. Sciacovelli, Z. Wu, X. Li, Y. Li, M. Zhao, et al. "Enhanced heat transfer in a parabolic trough solar receiver by inserting rods and using molten salt as heat transfer fluid." *Appl Energy*, no. 220 (2018): 337-50.
- [11] Korres, D., E. Bellos, and C. Tzivanidis. "Investigation of a nanofluid-based compound parabolic trough solar collector under laminar flow conditions." *Appl Therm Eng*, no. 149 (2019): 366-76.
- [12] Zou, B., Y. Jiang, Y. Yao, and H. Yang. "Thermal performance improvement using unilateral spiral ribbed absorber tube for parabolic trough solar collector." *Solar Energy*, no.183 (2019): 371-85.
- [13] Bozorg, M.V., M.H. Doranehgard, K. Hong, and Q. Xiong. "CFD study of heat transfer and fluid flow in a parabolic trough solar receiver with internal annular porous structure and synthetic oil-Al₂O₃ nanofluid." *Renew Energy*, no. 145 (2020): 2598-614.
- [14] Tripanagnostopoulos, Y., and P. Yianoulis. "Integrated collector-storage systems with suppressed thermal losses." *Solar Energy* 48, no. 1 (1992): 31-43.
- [15] Mohebbi, R., and Y. Ma. "Hybrid Nanoparticle-Enhanced Fluid Flow and Heat Transfer Behaviors in a Parabolic Cavity with a Heat Source." *Arab J Sci Eng* (2024). <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09586-2>
- [16] Mohebbi, R., and M.M. Rashidi. "Numerical Simulation of Natural Convection Heat Transfer of a Nanofluid in an L-Shaped Enclosure with a Heating Obstacle." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, no. 72 (2017): 70-84.
- [17] Mohebbi, R., and M.M. Rashidi. "Numerical Simulation of Natural Convection Heat Transfer of a Nanofluid in an L-Shaped Enclosure with a Heating Obstacle." *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, no.72 (2017): 70-84.
- [18] Sebdani, S.M., M. Mahmoodi, and S.M. Hashemi. "Effect of nanofluid variable properties on mixed convection in a square cavity." *International Journal of Thermal Sciences*, no. 52 (2012): 112-126.
- [19] Chen, Z., C. Shu, L.M. Yang, X. Zhao, and N.Y. Liu. Immersed boundary-simplified thermal lattice Boltzmann method for incompressible thermal flows Editor's Pick, *Phys. Fluids* 32, 013605 (2020).
- [20] Moukalled, F., and S. Acharya. "Natural convection in the annulus between concentric horizontal circular and square cylinders." *J. Thermophys. Heat Transfer*, no. 10 (1996): 524-531.
- [21] Ren, W., C. Shu, J. Wu, and W. Yang. "Boundary condition-enforced immersed boundary method for thermal flow problems with Dirichlet temperature condition and its applications." *Comput. Fluids*, no. 57 (2012): 40-51.