Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(9) (2022) 437-440
DOI: 10.22060/mej.2022.21222.7405

Numerical Investigation of Heat Transfer of Water/Nano-Encapsulated Phase Change Materials in a Cavity Including a Rotating Cylinder

F. Mobadersani*, N. Rashidi

Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

ABSTRACT: In the present paper, heat transfer in a cavity containing a mixture of water/ phase change materials surrounded by nanoparticles is investigated. The left and right walls are fixed at hot and cold temperatures, respectively, and horizontal walls are assumed to be adiabatic. There is a circular rotating cylinder in the center of the hole that can rotate clockwise or counterclockwise. The problem is considered two-dimensional and fundamental governing equations such as continuity, momentum, and energy are solved in a coupled manner utilizing the finite element method. To check the accuracy of the numerical results, a comparison with the outputs of others is provided, which indicates a very good agreement between the results. The parameters studied in this study are the dimensionless radius of the cylinder (R), Rayleigh number (Ra), the dimensionless melting temperature of the phase change material (θ_{fu}), Stephan number (Ste), and the dimensionless angular velocity of the rotating cylinder (Ω). By increasing the dimensional radius of the cylinder and assuming the clockwise rotation of Ω =-300 from R =0.1 to R =0.4, the heat transfer rate increases by 23.37%. On the other hand, if the cylinder is not rotated and with =0.4, the heat transfer rate will decrease by about 59.7% compared to the cavity without the cylinder. This indicates the importance of the rotation of the cylinder inside the cavity in increasing the heat transfer rate.

Review History:

Received: Mar. 15, 2022
Revised: May, 17, 2022
Accepted: Jul. 03, 2022
Available Online: Jul. 27, 2022

Keywords:

Nano-encapsulated phase change materials
Rotating cylinder
Natural convection
Finite element method

1- Introduction

Supplying energy in the coming years and increasing the need for energy due to non-renewable and expensive fossil fuels, it is important and vital to replace these types of fuels with renewable energies. Today, with the methods that are on the agenda of many researchers, renewable energy can be harnessed, released, and stored. Mixed natural convection heat transfer, which includes both natural and forced heat transfer, is a target of interest in many industrial, engineering, and scientific fields including fan-cooled electrical equipment, heat exchangers in low-viscosity media, solar panels exposed to wind, flow oceans, atmospheric currents, etc. The use of phase change materials is one of the new methods in storage as well as improving thermal performance. Because these materials keep their temperature and the environment constant by taking heat during the phase change process and absorbing and releasing a lot of heat, which increases the speed of heat transfer in the use of these materials in the future. Ghalambaz et al. [1] simulated the effects of hybrid nanoparticles on the melting process of nanofluid-surrounded phase change material in a cavity. The heat moved from the horizontal wall at the bottom of the cavity to the cold horizontal wall at the top of the cavity and the vertical walls were insulated. Simulation results showed that increasing the volume fraction values of nanoparticles, viscosity, and conductivity parameters resulted in significant changes in the solid-liquid common surface for high values of Fourier number. Mobadersani et al. [2] investigated the effect of adding nanoparticles on the thermal performance of an oscillating heat pipe in the presence of a uniform magnetic field. This work showed that with the increase of the Hartmann number, the momentum of the fluid elements decreases, and therefore the heat transfer rate decreases. According to the review of previous works, the analysis and study of nanofluid flow of phase change materials and base fluid considering both natural and forced mechanisms inside a cavity containing a rotating cylinder has not been done. Due to the increasing importance of using phase change materials and, also nanoparticles in the cooling of industrial tools, in this article, a numerical analysis of these types of flows has been done.

2- Mathematical Formulation

In this paper, natural and forced convection heat transfer of two-dimensional laminar flow inside a square cavity filled with Nano-Encapsulated Phase Change Material (NEPCM) particles is investigated. The thermophysical properties of the base fluid, the core, and the shell of the NEPCM particles are

*Corresponding author's email: f.mobadersani@mee.uut.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

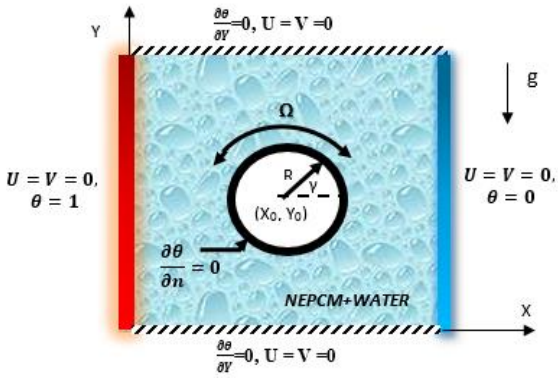


Fig. 1. Geometry and the boundary conditions of the problem

presented in Table 1. According to Fig. 1, there is an adiabatic rotating cylinder at the center of the cavity. It is necessary to explain that negative and positive rotational speeds mean clockwise and counterclockwise movement of the cylinder, respectively.

The basic dimensionless equations governing the problem include continuity, momentum, and energy equations as below:

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \tag{1}$$

$$\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\right)\left(U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial V}\right)=-\frac{\partial P}{\partial X}+\Pr\left(1+N\nu\phi\right)\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) \tag{2}$$

$$\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\right)\left(U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial V}\right)=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\Pr\left(1+N\nu\phi\right)\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right)+Ra.\Pr\left(\frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}}\right)\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\right)\theta_{nf} \tag{3}$$

$$Cr\left(U\frac{\partial\theta_{nf}}{\partial x}+V\frac{\partial\theta_{nf}}{\partial Y}\right)=\left(1+Nc\phi\right)\left(\frac{\partial^2\theta_{nf}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta_{nf}}{\partial Y^2}\right) \tag{4}$$

The thermophysical properties of the NEPCM/water mixture are calculated using the given relations [3]. The following relationship is performed to calculate the specific thermal capacity of the mixture

$$C_{p,nf}=\frac{(1+\phi)\left(\rho C_p\right)_{bf}+\phi\left(\rho C_p\right)_p}{\rho_{nf}} \tag{5}$$

Since the phase change materials as the core of nanoparticles can melt and absorb heat, so the heat capacity properties of the particles should also include the latent heat of the phase change materials:

Table 1. Thermophysical properties of the host fluid, core, and shell

	Host fluid	Nonadecane	Polyurethane	Solid
μ ($kgm^{-1}s^{-1}$)	8.9×10^{-4}	-	-	-
β (K^{-1})	21×10^{-5}	-	17.28×10^{-5}	-
K ($Wm^{-1}k^{-1}$)	0.613	-	-	-
c_p ($kJkg^{-1}K^{-1}$)	4179	2037	1317.7	475
ρ (kgm^{-1})	997	721	786	7850

$$Cr=\frac{\left(\rho C_p\right)_{nf}+\phi\left(\rho C_p\right)_p}{\left(\rho C_p\right)_{bf}}=\left(1-\phi\right)+\phi\lambda+\frac{\phi}{\delta Ste}f \tag{6}$$

In the provided relationships, dimensionless numbers are defined as follows:

$$\lambda=\frac{\rho_{co}\rho_{sh}\left(C_{p,co}+lC_{p,sh}\right)}{\left(\rho C_p\right)_{bf}\left(\rho_{sh}+l\rho_{co}\right)}\qquad \delta=\frac{T_{Mr}}{\Delta T}\qquad Ra=\frac{g\rho_{bf}\beta_{bf}\Delta TL^3}{\alpha_{bf}\mu_{bf}}$$
$$Ste=\frac{\left(\rho C_p\right)_{bf}\Delta T\left(\rho_{sh}+l\rho_{co}\right)}{\alpha_{bf}\left(h_{sf}\rho_{co}\rho_{sh}\right)}\qquad \Pr=\frac{\mu_{bf}}{\rho_{bf}\alpha_{bf}} \tag{7}$$

In the present work, the heat transfer rate is the most expected parameter. Therefore, the heat transfer rate on the hot wall is calculated locally as well as averagely as follows:

$$Nu_{local}=-\left(1+Nc\phi\right)\left(\frac{\partial\theta_{nf}}{\partial X}\right)_{X=0}\qquad Nu_{avg}=\int_0^1 Nu_{local}dY \tag{8}$$

3- Solution and Validation Method

The numerical solution of the above equations was carried out by the Galerkin method using Comsol Multiphysics 5.6 software. Non-structured triangular Mesh in the solution domain is also generated by this software. In order to confirm and check the accuracy of the results of the present numerical code, the phase change process of NEPCM particles in a square chamber without a rotating cylinder was compared with the results provided by Ghalambaz et al. [3]. This comparison is presented in Fig. 2 which shows very good agreement.

4- Results and Discussion

In this study, the effects of clockwise and anti-clockwise rotations of an insulated rotating cylinder in the center of the geometry on the heat transfer rate and melting process of

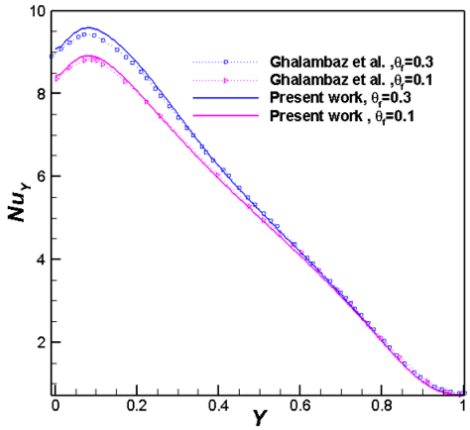


Fig. 2. Comparison of the local Nusselt number on the hot wall by implementing the present code with those of Ghalambaz et al. [3] versus different dimensionless fusion temperatures.

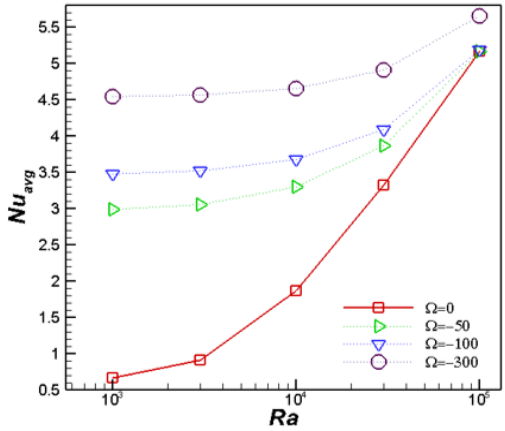


Fig. 4. The average Nusselt number at R =0.3 according to different Rayleigh numbers for clockwise rotations

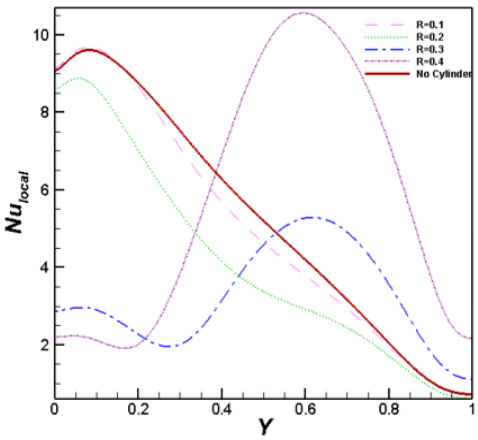


Fig. 3. The local Nusselt number on the hot wall versus the rotating cylinder radius assuming Ω =300

NEPCMs within a square cavity are presented.

Fig. 3 shows that increasing the cylinder radius leads to the enhancement of the local Nusselt at the middle of the hot wall and a maximum local heat transfer rate at the upper section of the hot wall is observed. This is due to the reduction of the flow area in the vicinity of the hot wall which causes the intensification of the fluid elements convection at the upper section of the hot wall. Furthermore, at these positions the forced and natural convections act aligned which amplifies the heat transfer rate more.

Fig. 4 presents the changes in the average Nusselt number in terms of the Rayleigh number for the clockwise angular velocities. It can be observed that the rotating cylinder insertion inside the cavity causes a significant enhancement in the average Nusselt number compared to the fixed cylinder case in lower Ra numbers. Because the buoyancy force is small in lower Ra numbers and by increasing the clockwise rotation of the cylinder, the momentum is transferred to the elements of the fluid which intensifies the natural convection flow, and thus, the average Nusselt number increases.

5- Conclusions

By increasing the dimensionless radius of the cylinder and assuming Ω=-300 from R =0.1 to R =0.4, the heat transfer rate increases by 23.37%, but the presence of the counterclockwise rotating cylinder inside the cavity is not favorable in terms of heat transfer.

Increasing the Rayleigh number when the cylinder rotates clockwise increases the average Nusselt at any angular velocity. When the cylinder rotates counter-clockwise, the mean Nusselt first decreases until it reaches a minimum point and then begins to increase.

In clockwise rotation, if the latent heat is ignored ($Ste \rightarrow \infty$), the heat transfer rate decreases by 10.56% compared to θ_{fu}=0.4.

References

[1] M. Ghalambaz, A. Doostani, E. Izadpanahi, A. Chamkha, Phase-change heat transfer in a cavity heated from below: the effect of utilizing single or hybrid nanoparticles as additives, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 72 (2017) 104-115.

[2] M. Farrokh, T. Goodarz, J. Samad, N. Javid, H. Amin, Analysis of Entropy Generation of a Magneto-Hydrodynamic Flow Through the Operation of an Unlooped Pulsating Heat Pipe, Journal of Heat Transfer, 140(8) (2018).

[3] M. Ghalambaz, A.J. Chamkha, D. Wen, Natural convective flow and heat transfer of nano-encapsulated phase change materials (NEPCMs) in a cavity, International journal of heat and mass transfer, 138 (2019) 738-749.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Mobadersani , N. Rashidi, Numerical Investigation of Heat Transfer of Water/Nano-Encapsulated Phase Change Materials in a Cavity Including a Rotating Cylinder, Amirkabir J. Mech Eng., 54(9) (2022) 437-440.

DOI: 10.22060/mej.2022.21222.7405

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۹، سال ۱۴۰۱، صفحات ۲۱۷۵ تا ۲۱۹۴
DOI: 10.22060/mej.2022.21222.7405

مطالعه عددی انتقال حرارت مخلوط آب/ مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات داخل حفره حاوی استوانه چرخان

فرخ مبادرثانی*، نگین رشیدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران.

خلاصه: در مقاله‌ی حاضر انتقال حرارت داخل حفره‌ای حاوی مخلوط آب/ مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره‌های سمت چپ و راست به ترتیب گرم و سرد بوده و دیواره‌های افقی آدیاباتیک فرض شده است. یک استوانه‌ی چرخان دایروی در مرکز حفره قرار دارد که به صورت ساعتگرد و یا پادساعتگرد می‌تواند چرخش نماید. معادلات اساسی حاکم به فرم بی‌بعد از قبیل: پیوستگی، بقاء مومنتوم و بقاء انرژی با استفاده از روش المان محدود و به صورت کوپل با یکدیگر حل شده‌اند. جهت بررسی صحت نتایج عددی، مقایسه‌ای با خروجی‌های دیگران ارائه شده است که نشانگر تطابق بسیار خوب نتایج می‌باشد. پارامترهای مورد بررسی در این مطالعه عبارتند از: شعاع بی‌بعد استوانه، عدد رایلی، دمای ذوب بی‌بعد ماده تغییر فاز دهنده، عدد استفان و سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه چرخان. طبق نتایج بدست آمده با افزایش شعاع بی‌بعد استوانه و با فرض چرخش ساعتگرد ۳۰۰- از ۰/۱ تا ۰/۴ ، نرخ انتقال حرارت ۲۳/۳۷ درصد افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، در صورت عدم چرخش استوانه و با ۰/۴= نرخ انتقال حرارت نسبت به حفره‌ی فاقد استوانه، حدود ۵۹/۷ درصد کاهش می‌یابد. که نشان دهنده‌ی اهمیت چرخش استوانه داخل حفره در افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۵/۰۵

کلمات کلیدی:
مواد تغییر فاز دهنده احاطه شده با نانوذرات
استوانه چرخان
انتقال حرارت همرفت طبیعی
روش المان محدود

۱- مقدمه

تأمین انرژی در سال‌های آتی و نیاز روز افزون به انرژی با توجه به رو به اتمام بودن و گران قیمت بودن سوخت‌های فسیلی و جایگزین کردن این نوع سوخت‌ها با انرژی‌های تجدید پذیر امری مهم و حیاتی می‌باشد. امروزه می‌توان انرژی تجدید پذیر را با روش‌هایی مهار، آزاد و ذخیره کرد که این امر دستور کار بسیاری از محققین قرار گرفته است.

انتقال حرارت همرفت طبیعی مختلط که شامل انتقال حرارت طبیعی و اجباری می‌باشد، یکی از اهداف مورد علاقه در بسیاری از زمینه‌های صنعتی، مهندسی و علمی از جمله: تجهیزات الکتریکی خنک شونده با فن، مبدل‌های حرارتی در محیط‌های با ویسکوزیته‌ی کم، صفحات خورشیدی در معرض باد، جریان‌های اقیانوس، جریان جو و... می‌باشد [۱]

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده یکی از روش‌های نوین در ذخیره سازی و همینطور بهبود عملکرد حرارتی می‌باشد. چراکه این مواد با گرفتن گرما در طی فرایند تغییر فاز، دمای خود ومحیط را ثابت نگه می‌دارند و مقدار بسیار زیادی گرما را جذب و آزاد می‌کنند که باعث افزایش نرخ انتقال حرارت در استفاده از این مواد در آینده می‌باشد.

سلیم افندی گیل و اوزتوپ [۲] دریک شبیه سازی عددی، جابجایی ترکیبی در یک حفره‌ی مربعی پر شده با ذرات تغییر فاز دهنده و تحت تأثیر یک استوانه‌ی چرخان در مرکز هندسه را بررسی و اثرات سرعت چرخش زاویه‌ای در دو ابعاد مختلف برای استوانه را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در استوانه بزرگ‌تر میانگین عدد ناسلت نسبت به استوانه کوچکتر زمانی که چرخش استوانه به صورت ساعتگرد است ۱۰درصد افزایش می‌یابد. آراسو و مجمدار [۳] دریک تحقیق عددی ذوب موم پارافین با آلومینیا را در یک محفظه‌ی مربعی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که ذخیره‌ی انرژی نهان در دیواره‌های عمودی نسبت به دیواره‌های افقی بیشتر است. آخلیش و همکاران [۴] تأثیر حضور باله را در چاه حرارتی پرشده با ذرات تغییرفازدهنده مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از این بود که افزایش ضخامت باله و فاصله‌ی باله‌ها از هم بر عملکرد ذوب ذرات تغییرفازدهنده تأثیر به‌سزایی دارد. لی و همکاران [۵] در یک محفظه‌ی مستطیلی باله دار پر شده با ذرات

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: f.mobadersani@mee.uut.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

تغییر فاز دهنده به تأثیر پارامترهای مختلفی چون عدد ناسلت میانگین، زمان ذوب و انرژی ذخیره شده توسط ذرات تغییر فاز دهنده پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد در مقایسه با طرح بدون باله حضور باله منجر به ذوب سریع‌تر ذرات تغییر فاز دهنده می‌شود.

از دیگر روش‌های غیرفعال در انتقال حرارت استفاده از نانوذرات می‌باشد. نانو ذرات موادی با ضریب هدایت بالا می‌باشند، لذا افزودن نانوذرات به سیال پایه منجر به بهبود انتقال حرارت می‌شود. افزودن نانوذرات به ذرات تغییر فاز دهنده موجب بهبود نرخ ذخیره و آزادسازی حرارت می‌شود. روزلان و همکاران [۶] درمطالعه‌ای اثر چرخش استوانه را برای انتقال حرارت در یک محفظه‌ی پرشده با نانوذرات به صورت بی‌بعد مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند انتقال حرارت تحت تأثیر اندازه، سرعت و جهت چرخش استوانه و غلظت نانوسیال می‌باشد. در بررسی دیگر سلیم افندی گیل و اوزتوپ [۷] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی برای نانوسیالات مختلف را در محفظه‌ی مکعبی حاوی دو استوانه چرخان ادیاباتیک شبیه سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد، بالاترین نرخ انتقال حرارت برای نانوسیال حاوی ذرات مس می‌باشد. خانافر و وفایی [۸] همرفت طبیعی نانوسیال مس–آب را در محفظه‌ای برای بازه‌ی اعداد گراشف مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که نرخ انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد. گنجی و ملوندی [۹] در یک بررسی تئوری، انتقال حرارت همرفت طبیعی نانوسیالات را در داخل یک حفره‌ی عمودی در حضور میدان مغناطیسی مورد تحقیق قرار دادند. مشاهدات آنها حاکی از این بود که عدد ناسلت میانگین در حضور میدان مغناطیسی برای نانو سیال آب–آلومنیا کاهش و برای نانو سیال آب–تیتانیا افزایش یافت. ژو و ژنگ [۱۰] انتقال حرارت جابجایی طبیعی را به صورت عددی در محفظه‌های مستطیلی و از روش تک فازی برای نانو سیال آلومنیا مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامترهایی چون عدد گراشف و کسر حجمی را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که انتقال حرارت، با افزایش کسر حجمی و افزایش ترم شناوری بهبود پیدا می‌کند. شند و رانا [۱۱] به صورت عددی انتقال حرارت جابجایی را برای بررسی تأثیر دوران در یک لایه‌ی افقی از نانو سیال پر شده با ماده‌ی متخلخل را شبیه سازی کردند. آن‌ها بررسی عواملی چون اعداد دارسی، لوئیس و نفوذ پذیری روی پایداری سیستم را دستور کار خود قرار دادند و اعلام کردند که عدد دارسی در صورت عدم دوران منجر به تقویت سیستم می‌شود، همچنین افزایش نسبت نفوذ و عدد لوئیس باعث تقویت وثبات همرفت می‌شود. ابونداء و اوزتوپ [۱۲] در مقاله‌ای انتقال حرارت جابجایی را در محفظه‌ای پر شده از نانو ذرات در زوایای شیب مختلف برای محفظه مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مقاله نشان داد که در زاویه‌ی شیب ۹۰ درجه کمترین نرخ انتقال حرارت رخ می‌دهد. مبادرثانی و همکاران [۱۳] تأثیر افزودن نانوذرات بر عملکرد حرارتی یک لوله‌ی حرارتی نوسانی را در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت بررسی کردند. این کار نشان داد که با افزایش عدد هارتمن مومنتوم المان‌های سیال کاهش یافته و بنابراین نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد. سلیم افندی گیل و همکاران [۱۴] در یک شبیه سازی عددی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی را در یک حفره‌ی مربعی پر شده با نانو ذرات که در داخلش یک استوانه چرخان عایق طراحی شده بود را برای بررسی تاثیرات عدد رایلی، سرعت چرخش زاویه‌ای استوانه، کسر حجمی نانوسیال و عدد دارسی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مقدار میانگین انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی، کسر حجمی و سرعت چرخش زاویه‌ای استوانه و عدد دارسی افزایش می‌یابد. همچنین ناسلت میانگین با افزایش ابعاد استوانه افزایش یافت. شرما و گانسان [۱۵] فرایند انجماد نانوسیال حاوی آب و اکسید مس را در یک محفظه‌ی ذوزنقه‌ای شکل با دیواره‌های افقی عایق و دیوارهای عمودی در دمای ثابت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دریافتند که افزایش کسر حجمی نانوسیال موجب بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود.

تیان و ژائو [۱۶] و همچنین لفدی و همکاران [۱۷] در یک تحقیق مشابه به صورت جداگانه نشان دادند که اندازه‌ی حفره و تخلخل برای مواد تغییر فاز دهنده با فوم‌های مسی و آلومینیومی، بر روی فرایند ذوب مواد تغییر فاز دهنده تأثیر می‌گذارد. وو و همکاران [۱۸] نشان دادند که با افزودن کسر حجمی کوچکی از نانوذرات مس به مواد تغییر فاز دهنده، زمان خنک شدن و گرمایش تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. جورابیان و همکاران [۱۹] بهبود انتقال حرارت را برای آب و یخ به عنوان ماده‌ی تغییر فاز دهنده از طریق پراکندگی نانوذرات مس محور اصلی مطالعات خود قرار دادند. آن‌ها اعلام کردند که مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات [1] موجب افزایش هدایت حرارتی و کاهش زمان ذوب در مقایسه با مواد تغییر فاز دهنده‌ی خالص می‌شود. کاشانی و همکاران [۲۰] اثرات پراکندگی نانوذرات را در فرایند انجماد مواد تغییر فاز دهنده در داخل یک محفظه‌ی مربعی در دماهای مختلف برای دیواره‌ی عمودی در سمت چپ به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات در مقایسه با مواد پایه، هدایت حرارتی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین

1 (Nano-Encapsulated Phase Change Material (NEPCM

نشان دادند که در زمانی که دمای دیواره پایین است، افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش کسر جامد می‌شود. مهریان و همکاران [۲۱] در مقاله‌ای انتقال حرارت همرفت ترکیبی را در داخل یک حفره‌ی مربعی حاوی یک استوانه‌ی نوسانی داغ مورد تحقیق قرار دادند. هدف آنها بررسی اثرات نانوسیال هیبریدی $Cu\ Al_2O_3$/آب و نانو سیال Al_2O_3 /آب بود. نتایج نشان داد حضور نانو ذرات، منجربه افزایش مقادیر ناسلت میانگین در اعداد رایلی پایین می‌شود، همچنین سرعت انتقال حرارت در نانوسیال ساده بالاتر از نانو سیال هیبریدی می‌باشد. قلم‌باز و همکاران [۲۲] اثرات نانو ذرات هیبریدی را بر فرایند ذوب ماده‌ی تغییر فازدهنده‌ی احاطه شده با نانوسیال را در یک حفره شبیه سازی کردند. گرما از دیواره‌ی افقی پایین حفره به سمت دیواره‌ی افقی سرد در بالای حفره حرکت می‌کرد و دیواره‌های عمودی عایق بودند. نتایج شبیه سازی حاکی از آن بود که افزایش مقادیر کسر حجمی نانوذرات، پارامترهای ویسکوزیته و رسانایی منجر به تغییرات قابل توجهی در سطح مشترک جامد_مایع برای مقادیر بالای عدد فوریه می‌شود.

باتوجه به مرور کارهای پیشین، تحلیل و مطالعه‌ی جریان نانو سیال مواد تغییر فاز دهنده و سیال پایه با در نظر گرفتن هر دو مکانیزم طبیعی و اجباری داخل یک حفره حاوی استوانه‌ی چرخان انجام نگرفته است. باتوجه به اهمیت روزافزون استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و همچنین نانوذرات در امر خنک کاری ابزارآلات صنعتی، در مقاله‌ی حاضر نسبت به ارائه تحلیل عددی این نوع جریان‌ها اقدام شده است.

۲- تعریف مسئله و مدل سازی ریاضی

دراین مقاله انتقال حرارت همرفت طبیعی و اجباری در جریان آرام دو بعدی داخل یک حفره‌ی مربعی که از مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات پر شده، بررسی شده است. طبق شکل ۱ در مرکز حفره یک استوانه چرخان آدیاباتیک قرار دارد. لازم به توضیح است که سرعت دورانی منفی و مثبت به ترتیب به مفهوم حرکت ساعتگرد و پادساعتگرد استوانه می‌باشد. در راستای عمود بر صفحه، دیواره‌ی حفره به اندازه‌ای بلند فرض شده است که تغییرات تمامی کمیت‌ها در آن جهت بسیار کوچک بوده و می‌توان هندسه را دو بعدی بررسی کرد. دیواره‌های افقی حفره آدیاباتیک بوده و دیواره‌ی سمت چپ در دمای گرم T_h ثابت بوده و دیواره‌ی سمت راست در دمای سرد T_C نگه داشته شده است. بدین ترتیب سیال عامل گرما را از سمت دیواره‌ی چپ حفره جذب کرده و به دیواره‌ی سمت راست منتقل می‌کند. سیال عامل مخلوطی مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات در سیال پایه‌ی آب با $Pr=6$. می‌باشد. کسر حجمی نانوذرات پخش شده در سیال پایه در مقدار ۴٪ ثابت بوده و هسته‌ی مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات از جنس نونادکان و پوسته‌ی آن از جنس پلی اورتان می‌باشد. خواص ترموفیزیکی این مواد در جدول ۱ آورده شده است.

هسته‌ی مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات با جذب گرما و رسیدن به دمای ذوب تغییر فاز می‌دهد و بدین ترتیب انتقال حرارت از دیواره‌ی گرم طی دو فرآیند انتقال حرارت محسوس و نهان انجام می‌گیرد. تمامی خواص مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات به غیر از دمای θ_{fu} ثابت در نظر گرفته می‌شود. رفتار میدان سیال تراکم ناپذیر فرض شده و تمامی خواص سیال پایه به غیر از چگالی ثابت فرض می‌شود. چگالی سیال پایه تابعی از دما می‌باشد که تغییرات آن به صورت خطی با فرض بوزینسک بدست می‌آید. از طرف دیگر، سیال پایه و ماده‌ی تغییر فاز دهنده داخل ذرات مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات بعد از تغییر فاز سیال نیوتنی می‌باشد. باتوجه به نتایج ارائه شده توسط بونجیورنو [۲۳] می‌توان از نیروی گریز از مرکز وارده بر نانو ذرات صرف نظر کرد.

۲- ۱- معادلات حاکم بر مسئله

باتوجه به فرضیات ذکر شده در بخش قبلی، با استفاده از پارامترهای بی‌بعد زیر معادلات اساسی بی‌بعد حاکم بر مسئله شامل معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به زیر خواهد بود

$$\theta_{nf} = \frac{T_{nf} - T_c}{\Delta T} \quad (۱)$$

$$P = \frac{pL^2}{\alpha_{bf}}$$

$$V = \frac{vL}{\alpha_{bf}}$$

$$Y = \frac{y}{L}$$

$$\Omega = \frac{\omega L^2}{\alpha_{bf}}$$

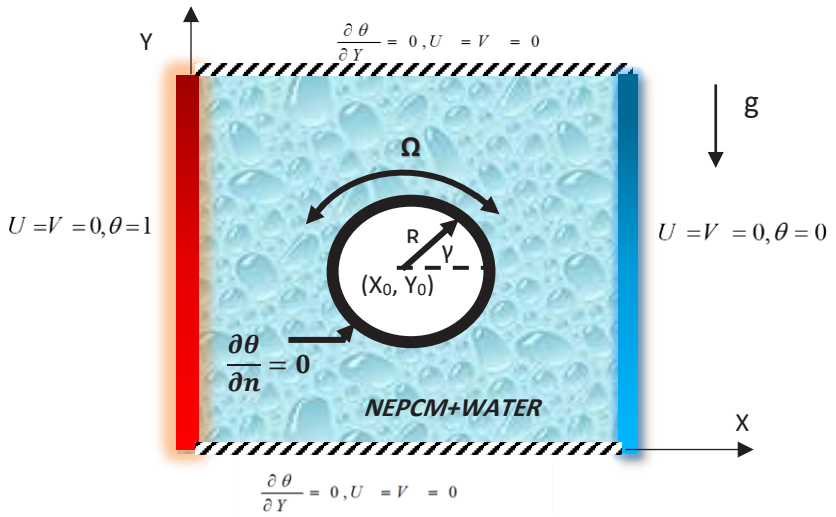
$$D = \frac{d}{L}$$

$$U = \frac{uL}{\alpha_{bf}}$$

$$R = \frac{r}{L}$$

$$X = \frac{x}{L}$$

درمعادلات فوق $\Delta T = T_h - T_c$ می‌باشد



شکل ۱. هندسه مسئله به همراه شرایط مرزی

Fig. 1. Geometry and boundary conditions of the problem

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی سیال پایه، هسته (نونادکان) و پوسته (پلی اورتان) [۲۴]

Table 1. Thermophysical properties of base fluid, core (Nonadecane) and shell (Polyurethane)

	μ (kgm^{-1}s^{-1})	β (K^{-1})	K (Wm^{-1}K^{-1})	cp (kJkg^{-1}K^{-1})	ρ (kgm^{-1})
سیال پایه	۸/۹ ×۱۰^{۴}	۲۱ ×۱۰^{۵}	۰/۶۱۳	۴۱۷۹	۹۹۷
نونادکان	-	-	-	۲۰۳۷	۲۷۱
پلی اورتان	-	۱۷/۲۸ ×۱۰$^{-۵}$	-	۱۳۱۷/۷	۷۸۶

–معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \qquad (۲)$$

–معادله‌ی بقاء مومنتوم در راستای X:

$$\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\right)\left(U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial U}{\partial V}\right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \Pr(1+N\nu\phi)\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) \qquad (۳)$$

–معادله‌ی بقاء مومنتوم در راستای Y:

$$-\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\right)\left(U\frac{\partial V}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial V}\right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \Pr(1+N\nu\phi)\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right) + Ra.\Pr\left(\frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}}\right)\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}\right)\theta_{nf} \qquad (۴)$$

–معادله‌ی انرژی:

$$Cr\left(U\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial x} + V\frac{\partial \theta_{nf}}{\partial Y}\right) = (1+Nc\phi)\left(\frac{\partial^2 \theta_{nf}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_{nf}}{\partial Y^2}\right) \qquad (۵)$$

۲- ۲- شرایط مرزی

با توجه به پارامترهای معرفی شده جهت بی‌بعد سازی، فرم بی‌بعد شرایط مرزی به صورت زیر می‌باشد. همچنین باعنایت به اینکه دیواره‌ی سمت چپ حفره گرم و دیواره‌ی سمت راست حفره در دمای سرد قراردارد و دیواره‌های افقی و استوانه‌ی چرخان عایق طراحی شده است، و همینطور با فرض شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها داریم:

-شرایط مرزی بر روی تمامی دیواره‌های حفره:

$$\begin{aligned} &V(X,0)=U(X,0)=0,\ V(X,1)=U(X,1)=0 \\ &V(0,Y)=U(0,Y)=0,\ V(1,Y)=U(1,Y)=0 \\ &\theta(0,Y)=1,\ \theta(1,Y)=0,\ \theta(X,0)=\theta(X,0)=\frac{\partial\theta}{\partial Y}=0 \end{aligned} \quad (۶)$$

-شرایط مرزی برروی دیواره‌ی استوانه برابر است با:

$$\frac{\partial\theta}{\partial n}=0 \qquad V=R\Omega \quad (۷)$$

خواص ترموفیزیکی مخلوط مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات +آب با استفاده از روابط ارائه شده به صورت زیر می‌باشد. تابع وزنی زیر برای محاسبه‌ی چگالی مخلوط، برابراست با [۲۵]:

$$\rho_{nf}=(1-\phi)\rho_{nf}+\phi\rho_p \quad (۸)$$

لذا چگالی مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات برابر است با [۲۵]:

$$\rho_p=\frac{(1+l)\rho_{co}\rho_{sh}}{\rho_{sh}+l\rho_{cp}} \quad (۹)$$

رابطه‌ی زیر برای محاسبه‌ی ظرفیت حرارتی ویژه‌ی مخلوط استفاده می‌شود [۲۴ و ۲۶]:

$$C_{p,nf}=\frac{(1+\phi)(\rho C_p)_{bf}+\phi(\rho C_p)_p}{\rho_{nf}} \quad (۱۰)$$

ضریب انبساط حرارتی مخلوط با استفاده از رابطه‌ی خطی زیر تعریف می‌شود [۲۷]:

$$\beta_{nf}=(1-\phi)\beta_{bf}+\phi\beta_p \quad (۱۱)$$

ویسکوزیته و هدایت حرارتی مخلوط با استفاده از روابط خطی ارائه شده توسط تحقیقات پیشین به صورت زیر می‌باشد: [۲۲ و ۲۸]

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}}=1+N_\upsilon\phi \quad (۱۲)$$

نسبت چگالی مخلوط به چگالی سیال پایه و همینطور نسبت ضریب انبساط حرارتی مخلوط به سیال با استفاده از روابط زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_{bf}}=(1-\phi)+\phi\left(\frac{\rho_P}{\rho_{bf}}\right) \qquad \frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}}=(1-\phi)+\phi\left(\frac{\beta_P}{\beta_{bf}}\right) \quad (۱۳)$$

که با فرض یکسان بودن ضریب انبساط حرارتی سیال پایه و مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات $\frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}}\approx 1$ $\frac{\beta_{nf}}{\beta_{bf}}\approx 1$ خواهد بود.

از آنجایی که مواد تغییر فاز دهنده به عنوان هسته‌ی نانو ذرات می‌توانند ذوب شوند و گرما جذب کنند، بنابراین خواص ظرفیت گرمایی ذرات باید شامل گرمای نهان مواد تغییر فاز دهنده نیز باشد: [۲۴ و ۲۷]

$$Cr=\frac{(\rho C_p)_{nf}+\phi(\rho C_p)_p}{(\rho C_p)_{bf}}=(1-\phi)+\phi\lambda+\frac{\phi}{\delta Ste}f \quad (۱۴)$$

که در رابطه‌ی بالا fبرابر است با:

$$f = \frac{\pi}{2}\sin\left(\frac{\pi}{\delta}\left(\theta - \theta_{fu} + \frac{\delta}{2}\right)\right)\Xi \qquad (۱۵)$$

$$\Xi = \begin{cases} 0 & \theta \langle \theta_{fu} \langle \frac{\delta}{2} \\ 1 & \theta_{fu} - \frac{\delta}{2} \langle \theta \langle \theta_{fu} + \frac{\delta}{2} \\ 0 & \theta \rangle \theta_{fu} + \frac{\delta}{2} \end{cases} \qquad \theta_{fu} = \frac{T_{fu} - T_C}{\Delta T} \qquad (۱۶)$$

در روابط فوق اعداد بی‌بعد به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\lambda = \frac{\rho_{co}\rho_{sh}\left(C_{p,co} + lC_{p,sh}\right)}{\left(\rho C_p\right)_{bf}\left(\rho_{sh} + l\rho_{co}\right)} \qquad \delta = \frac{T_{Mr}}{\Delta T} \qquad (۱۷)$$

$$Ste = \frac{\left(\rho C_p\right)_{bf}\Delta T\left(\rho_{sh} + l\rho_{co}\right)}{\alpha_{bf}\left(h_{sf}\rho_{co}\rho_{sh}\right)}$$

$$Ra = \frac{g\rho_{bf}\beta_{bf}\Delta T L^3}{\alpha_{bf}\mu_{bf}} \qquad \Pr = \frac{\mu_{bf}}{\rho_{bf}\alpha_{bf}}$$

درکار حاضر نرخ انتقال حرارت پارامترمطلوب می‌باشد. لذا نرخ انتقال حرارت بر روی دیواره‌ی گرم به صورت موضعی و همینطور به صورت میانگین به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu_{local} = -\left(1 + Nc\phi\right)\left(\frac{\partial\theta_{nf}}{\partial X}\right)_{X=0} \qquad (۱۸)$$

$$Nu_{avg} = \int_0^1 Nu_{local}dY$$

۳- روش حل، استقلال از مش واعتبار سنجی

به منظور حل معادلات اساسی حاکم بر مسئله از روش باقی مانده‌های وزنی گالرکین بر اساس المان محدود که یکی از رایج‌ترین روش عددی برای حل مسائل مهندسی و مدل‌های ریاضی است استفاده گردیده است. توابع وزنی به صورت زیر جهت حداقل نمودن باقی مانده‌ی متغیرهای میدانی به کار گرفته شده‌اند:

$$\int_\Omega wf(x)Rd\omega = 0\int_C wf(x)\mathrm{Re}s, d \in \qquad (۱۹)$$

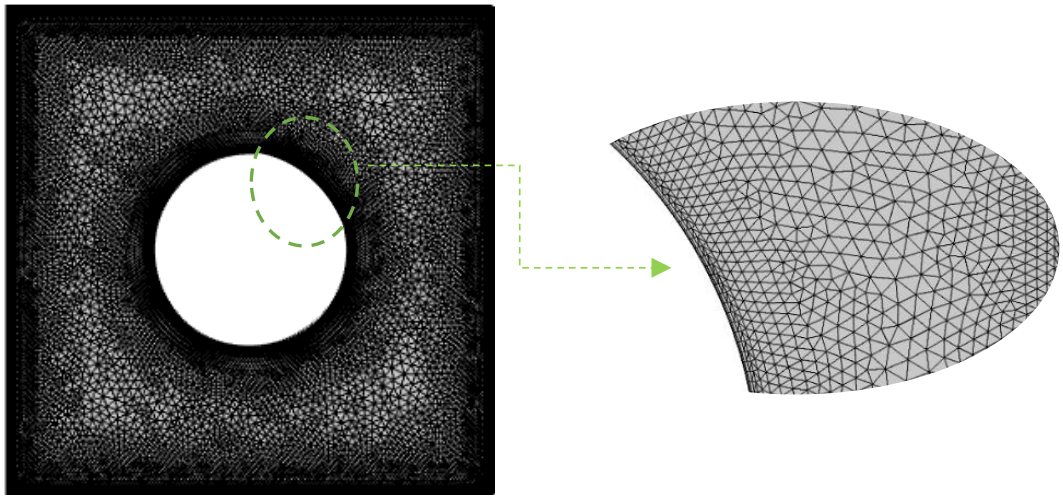
که در آن wf , Res, ϵ و C به ترتیب متغیر مکانی، باقی‌مانده، تابع وزنی و کل دامنه می‌باشد. تبدیل مشتقات جزئی به معادلات انتگرالی با استفاده از روش باقی‌مانده انجام گرفته و روش تکراری نیوتن-رفسون جهت حل این معادلات استفاده شده است. برای تمامی شبیه سازی‌های انجام شده، خطای عددی برای هر متغیر میدانی بایستی شرط زیر را ارضاء نماید:

$$\left|\frac{\Gamma^{n+1} - \Gamma^n}{\Gamma^{n+1}}\right| \langle 10^{-5} \qquad (۲۰)$$

که در آن n نشان دهنده‌ی هر گام می‌باشد. گسسته سازی‌های متغیرهای سرعت و فشار با استفاده از المان محدود لاگرانژی به روش $۱P - ۲P$ انجام گرفته است [۲۹]. حل عددی معادلات فوق به روش گالرکین با استفاده از نرم افزار کامسول مولتی فیزیکس ۵٫۶ انجام گرفته است. شبکه بندی نیز توسط همین نرم افزار صورت گرفته است. نمونه‌ای از شبکه بندی نامنظم مثلثی برای دامنه‌ی محاسباتی در شکل ۲ نشان داده شده است. این شبکه در نزدیکی دیواره‌ها به منظور محاسبه‌ی گرادیان‌های شدیدتر، دارای تراکم بیشتری می‌باشد.

استقلال نتایج عددی از شبکه در شرایط R =۰/۲، θ_{fu} =۰/۳ ، Ω =-۳۰۰ و Ste =۰/۲ و Ra =۱۰^۵ بررسی شده است. جدول ۲ مقایسه‌ی ناسلت میانگین در تعداد شبکه‌های مختلف را نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد المان‌ها اگرچه خطای عددی کاهش می‌یابد، ولی برای کم کردن هزینه‌های محاسباتی تعداد شبکه‌ی ۲۱۶۱۴ در تمامی شبیه سازی ارائه شده، استفاده شده است.

به منظور تأیید و بررسی صحت نتایج کد عددی حاضر، فرایند تغییر فاز، مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات در محفظه‌ی مربعی با نتایج ارائه شده توسط قلم‌باز و همکاران [۳۰] برای خطوط جریان، همدما، و نسبت ظرفیت گرمایی در شکل ۲ مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین



شکل۲. مش بندی دامنه‌ی محاسباتی و بر روی سیلندر چرخان

Fig. 2. Meshing of the domain and the rotating cylinder wall

جدول ۲. استقلال نتایج از تعداد مش

Table 2. Independency of the results from the mesh number

تعداد شبکه	ناسلت میانگین	خطا ($\frac{\text{مقدارقبلی}-\text{مقدارفعلی}}{\text{مقدارقبلی}}$ × ۱۰۰)
۷۳۵۲	۵/۴۶۸۷	-
۱۰۳۹۰	۵/۴۵۱۲	۰/۳
۲۰۳۹۴	۵/۴۴۹۹	۰/۰۲
۲۱۳۴۶	۵/۴۵۵۰	۰/۰۱
۲۷۷۲۸	۵/۴۵۰۱	۰/۰۰۷

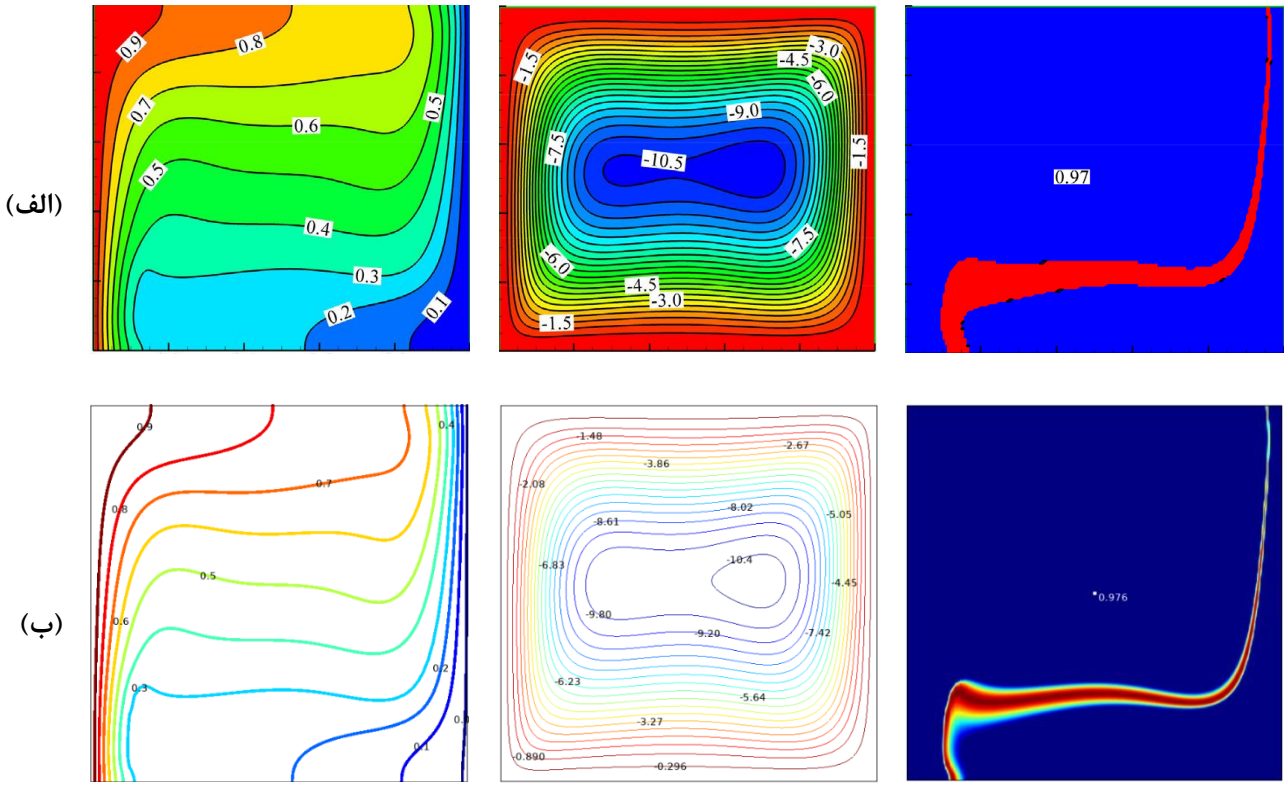
مقایسه‌ی نمودار ناسلت موضعی بر روی دیواره‌ی گرم را بر حسب دمای ذوب بی‌بعد در شکل ۳ برای کار حاضر و نتایج قلم‌باز و همکاران [۳۰] نشان داده شده است. حداکثر خطای به دست آمده مابین کار حاضر و نتایج ارائه شده ۱/۴ درصد می‌باشد. این مقایسه حاکی از تطابق بسیار خوب بین نتایج عددی حاضر و نتایج قلم‌باز و همکاران می‌باشد.

همچنین برای بررسی صحت نتایج شبیه سازی شده برای حفره‌ی حاوی یک استوانه، خطوط جریان و همدما با نتایج ارائه شده‌ی لیائو [۳۱] مورد بررسی قرار گرفته است. در این کار استوانه‌ای ساکن داخل یک حفره حاوی هوا قرار دارد. شکل ۵ مقایسه بین نتایج را نشان می‌دهد که بیانگر دقت بسیار خوب کد حاضر در محاسبه‌ی جریان همرفت طبیعی داخل یک حفره با استوانه‌ای در مرکز آن است.

۴- نتایج و بحث

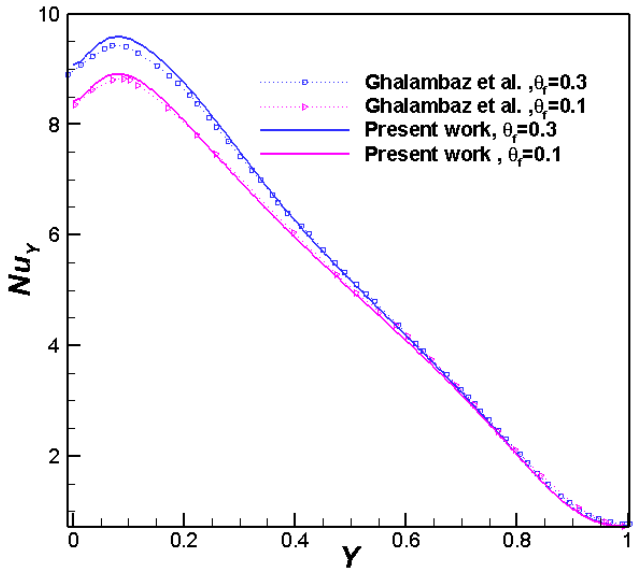
در این بررسی اثرات چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد یک استوانه چرخان عایق در مرکز هندسه بر روی نرخ انتقال حرارت و ذوب مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات ها در درون یک حفره‌ی مربعی به صورت دو بعدی و پایا ارائه شده است.

در تمامی شبیه سازی‌های انجام شده، کمیت‌های Pr =۶/۲، φ=۰/۰۴ ثابت بوده و تأثیر پارامترهای کنترلی در بازه‌های $\infty \geq Ste \geq$ ۰/۲، ۰/۴ ≤ θ_{fu} ≤ ۰/۲، ۱۰^۳ ≤ Ra ≤ ۱۰^۵، ۰/۴ ≤ R ≤ ۱/ و ۳۰۰ ≤ Ω ≤ -۳۰۰ برنتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است.



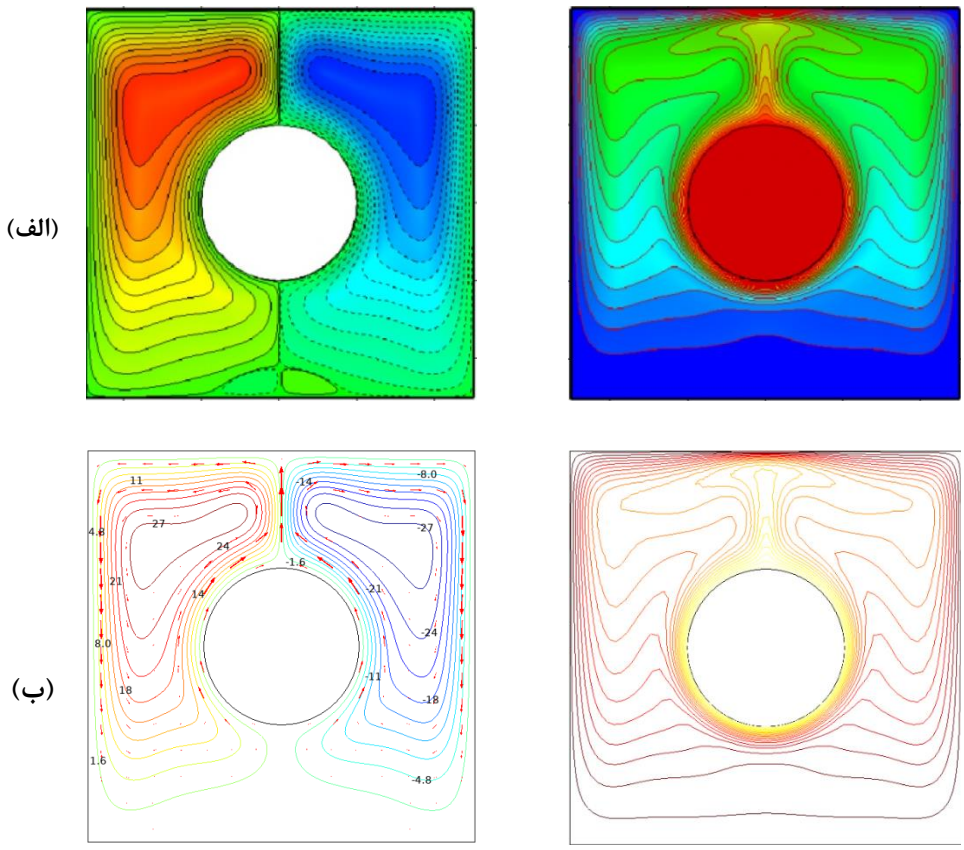
شکل ۳. خطوط جریان، همدما و نسبت ظرفیت حرارتی با فرض Ra =۱۰^۵ و θ_{fu} =۰/۳ الف) قلم‌باز و همکاران [۳۰] ب) کار حاضر

Fig. 3. Streamlines, isotherms and heat capacity ratio assuming Ra =10 ^{5} and θ_{fu} =0.3 a) Ghalambaz et al. [30] b) Present work



شکل ۴. مقایسه‌ی تغییرات عدد ناسلت موضعی بر روی دیوار گرم در کار حاضر و نتایج قلم‌باز و همکاران [۳۰] به ازاء دماهای همجوشی مختلف

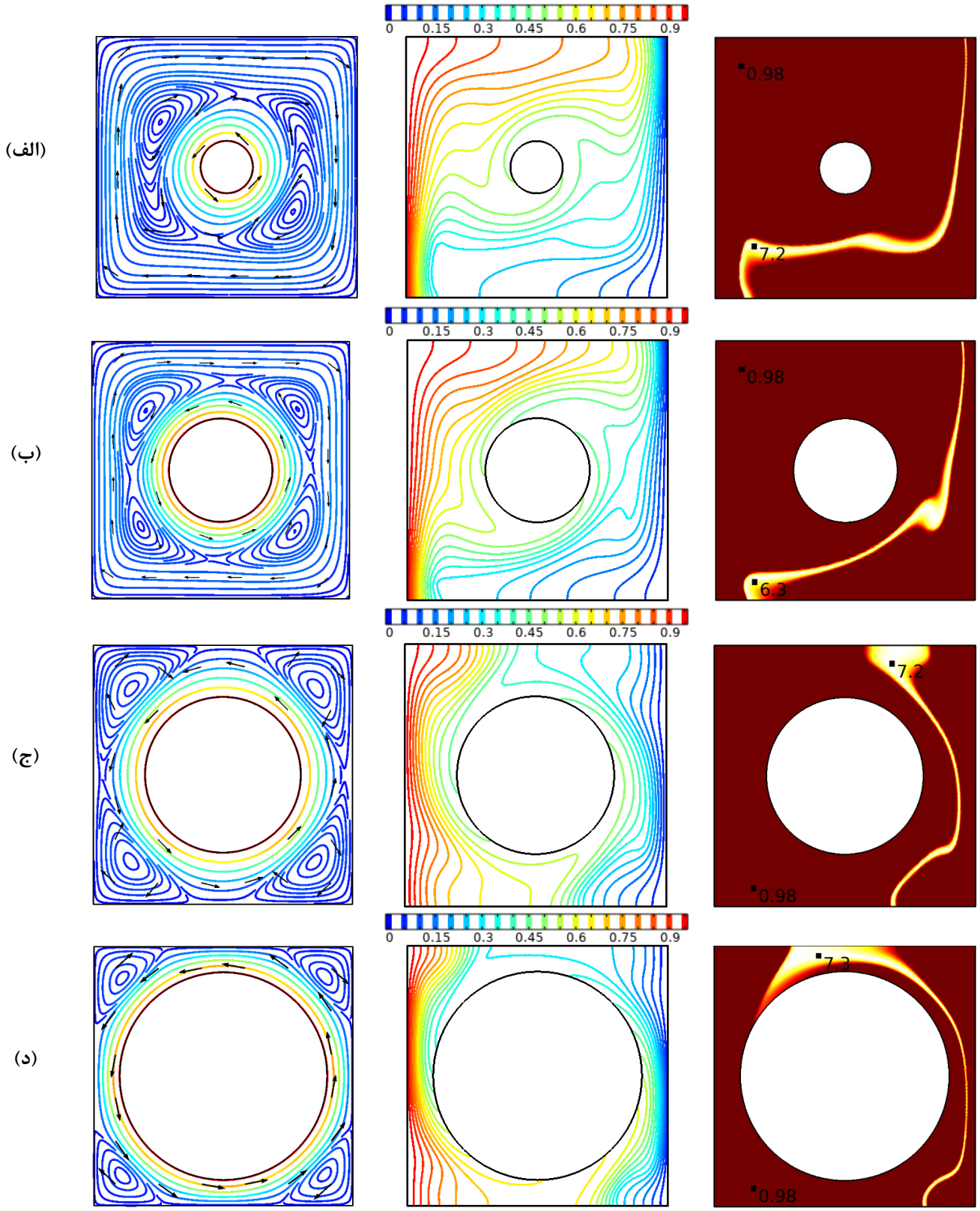
Fig. 4. Comparison of the variation of the local Nusselt number on the hot wall in the present work with those of Ghalambaz et al. [30] for different fusion temperatures.



شکل ۵. خطوط جریان و همدما با فرض ۲×۱۰۶= Ra و ۷= Pr الف) نتایج لیائو [۳۱] ب) شبیه سازی حاضر

Fig. 5. Streamlines and isothermal lines assuming Ra =2×10 6 and Pr =7.0 a) Liao's results [31] b) present simulation

شکل ۶، خطوط جریان، همدما و نسبت ظرفیت گرمایی را با فرض شعاع‌های مختلف برای استوانه چرخان با سرعت زاویه‌ای پاد ساعتگرد Ω =۳۰۰ را نشان می‌دهد. فرضیات در نظر گرفته شده برای رسم این شکل عبارتند از: Ra=۱۰^۵، θ_{fu}=۰/۳ و Ste=۰/۲ در R =۰/۱ خطوط جریان در نزدیکی استوانه به صورت پاد ساعتگرد در حال چرخش هستند و در نزدیکی دیواره‌های حفره به دلیل جابجایی طبیعی خطوط جریان به صورت ساعتگرد می‌باشند. از طرفی دو ورتکس محلی به دلیل برهمکنش جریان ناشی از استوانه چرخان و دیواره‌های حفره تشکیل شده است که به صورت ساعتگرد در حال چرخش هستند. همچنین در نزدیکی ورتکس‌ها نقاط سکونی (جریان مُرده) ایجاد شده است که به دلیل برخورد جریان‌های جابجایی اجباری و طبیعی به وجود آمده‌اند. در R =۰/۲ به دلیل افزایش برهمکنش بین استوانه چرخان و دیواره‌های حفره چهار ورتکس محلی تشکیل می‌شود که جهت جریان آنها به صورت ساعتگرد می‌باشد و نقاط سکون ناشی از جریان مرده در نزدیکی استوانه حوالی خط مرکزی افقی و خط مرکزی عمودی حفره مشاهده می‌شود. با افزایش شعاع استوانه به R =۰/۳ ورتکس‌های محلی ایجاد شده به سمت گوشه‌های حفره منتقل می‌شوند و ورتکس‌های تشکیل شده نسبت به حالات قبلی بزرگ‌تر بوده و قدرت چرخشی بزرگتری دارند. مشاهده می‌شود که در این شعاع جریان مُرده فقط بر روی خط مرکزی افقی نزدیکی دیواره‌ی عمودی حفره تشکیل می‌شود؛ زیرا در نزدیکی دیواره‌های بالایی و پایینی به دلیل دور بودن از گوشه‌های حفره، المان‌های سیال تحت تأثیر جابجایی اجباری ناشی از چرخش استوانه می‌باشند و به صورت پادساعتگرد در حال گردش می‌باشند. در R =۰/۴ هیچ جریان مُرده‌ای اطراف استوانه مشاهده نمی‌شود و چهار ورتکس محلی در کنج حفره تشکیل شده‌اند و همگی به صورت ساعتگرد



شکل ۶. خطوط جریان، خطوط همدما و نسبت ظرفیت گرمایی با فرض الف) R =۰/۱ ، ب) R =۰/۲ ، ج) R =۰/۳ و د) R =۰/۴ در Ω =۳۰۰

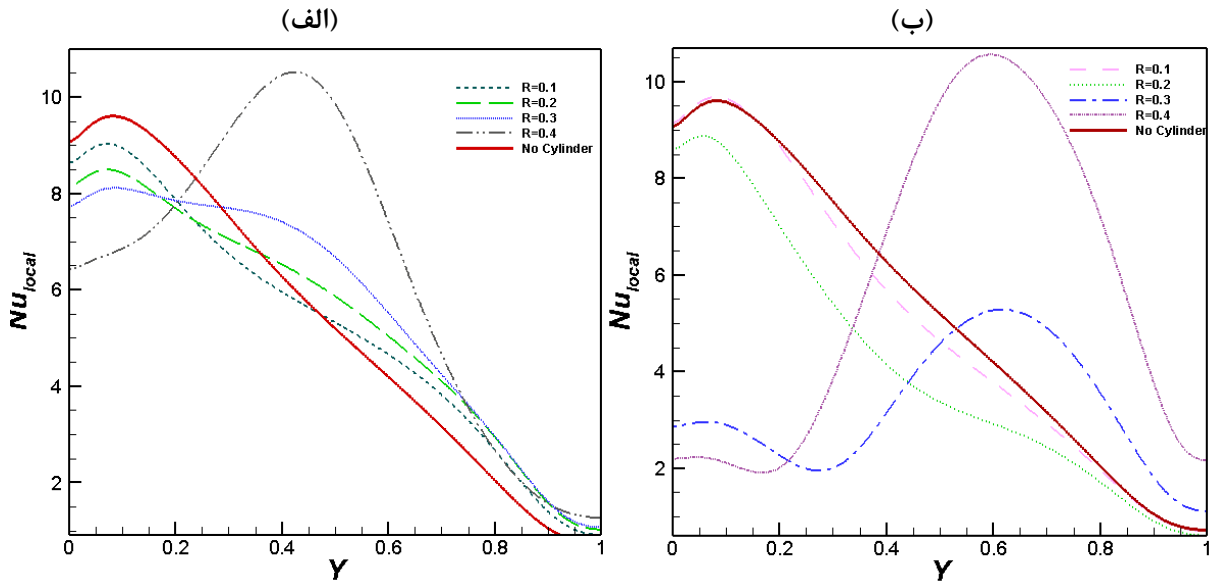
Fig. 6. Streamlines, isothermal lines and heat capacity ratio assuming a) R =0.1, b) R =0.2, c) R =0.3 and d) R =0.4 in Ω =300

در حال گردش هستند. همچنین به دلیل افزایش مومنتوم انتقالی از استوانه به میدان سیال، در این شعاع جریان جابجایی اجباری مکانیزم غالب بوده و حتی بر روی دیواره‌های حفره جریان، برخلاف جهت جابجایی طبیعی، حرکت المان‌های سیال به صورت پادساعتگرد می‌باشد. برخلاف آن، در شعاع‌های کوچک اثرات مومنتومی استوانه چرخان بسیار کوچک‌تر بوده و به این دلیل سرعت‌های مماسی بسیار کوچک هستند. بنابراین مومنتوم جریان بر روی دیواره‌ی گرم در شعاع‌های کوچک کمتر است و جابجایی طبیعی مکانیزم غالب می‌باشد. با توجه به اینکه جریان جابجایی طبیعی به صورت ساعتگرد و جریان استوانه به صورت پادساعتگرد است، از برهمکنش این دو جریان خطوط هم دما در نزدیکی استوانه، دچار خمیدگی شده و شکل ناهمگونی دارند. با افزایش شعاع استوانه، اثرات مومنتومی برروی استوانه چرخان داخلی افزایش یافته در نتیجه جابجایی اجباری ناشی از چرخش استوانه قدرت می‌گیرد. از طرفی در ابتدای دیواره‌ی گرم، با افزایش شعاع استوانه ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی بیشتر شده که منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت می‌شود. افزایش شعاع استوانه منجر می‌شود در R =۰/۴ مومنتوم جریان فقط ازاستوانه داخلی قدرت بگیرد و این امر منجر به غالب شدن جابجایی اجباری به جابجایی طبیعی می‌گردد و خطوط همدما ساختار مرتبی پیدا می‌کنند پس ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی مابین دیواره و حفره در اواسط دیواره‌ی گرم کمتر می‌شود و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. لایه‌ی مرزی حرارتی مجدداً در بالای دیواره‌ی گرم حفره شروع به افزایش ضخامت کرده و در نتیجه کاهش نرخ انتقال حرارت را سبب می‌شود.

بنابر تغییرات C_r ارائه شده در شکل ۶، نسبت ظرفیت حرارتی به دلیل تغییر فاز تغییر می‌کند. ناحیه‌ی زرد رنگ نشان دهنده‌ی حوزه‌ی تغییر فاز می‌باشد. در این حوزه، هسته‌ی مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات از فاز جامد به مایع و یا بالعک تغییر فاز می‌دهند. همانطورکه این شکل نشان می‌دهد، ضخامت حوزه‌ی تغییر فاز در محدوده‌ی دمای ذوبθ_{fu} =۰/۳ می‌باشد. از طرف دیگر، نسبت ظرفیت حرارتی خارج از این ناحیه دارای مقدار ثابت بوده و برابر ۰/۹۸ است. همانگونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، با افزایش شعاع استوانه، به دلیل تغییر موقعیت خطوط همدما، ناحیه‌ی تغییر فاز، به سمت دیواره‌ی سرد منتقل شده و در شعاع‌های بزرگ ناحیه‌ی تغییر فاز در محیط بالای استوانه گسترش پیدا کند.

شکل ۷ الف، نمودار تغییرات ناسلت موضعی، بر روی دیواره‌ی گرم را بر حسب شعاع‌های مختلف استوانه‌ی چرخان در سرعت زاویه‌ای ۳۰۰-= Ω نشان می‌دهد. در ابتدا فرض بر این است که حفره فاقد استوانه داخلی می‌باشد. در این حالت مکانیزم‌های انتقال حرارت، جابجایی طبیعی، اجباری و تبادل گرمای نهان در اثر تغییر فاز می‌باشد. با توجه به اینکه لایه‌ی مرزی حرارتی تشکیل شده در ابتدای دیواره‌ی گرم حفره ضخامت کمتری دارد و با پیشروی بر روی دیواره‌ی گرم ضخامت آن بیشتر می‌شود، نرخ انتقال حرارت در پایین حفره بیشترین مقدار را دارد و با افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی شروع به کاهش می‌کند. استوانه با سرعت زاویه‌ای ۳۰۰- Ω به صورت ساعتگرد و هم‌جهت با جابجایی طبیعی، منجر به تقویت مکانیزم جابجایی طبیعی در اواسط دیواره‌ی گرم می‌شود. در شعاعR =۰/۴ لایه‌ی مرزی حرارتی در پایین حفره بر خلاف شعاع‌های کوچک، بسیارضخیم بوده که دلیل آن انتقال سیال از نواحی پایین حفره توسط استوانه‌ی چرخان به نواحی بالایی دیواره‌ی گرم می‌باشد. در این صورت لایه‌ی مرزی حرارتی بسیارضخیم تر خواهد بود. با توجه به شکل در میانه‌ی دیواره‌ی گرم، به دلیل کاهش سطح مقطع بین استوانه و دیواره‌ی گرم، مومنتوم سیال افزایش پیدا می‌کند؛ درنتیجه ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی بسیار کم شده و این امر منجر به افزایش چشمگیر نرخ انتقال حرارت و نقطه‌ی حداکثری در ناسلت موضعی در آن نواحی می‌شود. لازم به ذکر است که افزایش شعاع استوانه موجب می‌شود که سیال مومنتوم مورد نیاز خود را از چرخش استوانه دریافت کند و چون جهت چرخش هم جهت با جابجایی طبیعی است ناسلت موضعی تشدید شده و نرخ انتقال حرارت افزایش یابد.

شکل ۷ ب، نمودار تغییرات ناسلت موضعی، بر روی دیواره‌ی گرم را با فرض طول شعاع‌های مختلف برای استوانه چرخان در سرعت زاویه‌ای ۳۰۰= Ω نشان می‌دهد. در این حالت چرخش استوانه پادساعتگرد و برخلاف جابجایی طبیعی بوده و این چرخش منجر به تضعیف فرایند جابجایی طبیعی می‌شود. در R =۰/۱ به دلیل شعاع کم و مومنتوم بسیار کم انتقالی از طرف استوانه، جریان جابجایی طبیعی غالب بوده و در پایین حفره تغییرات ناسلت موضعی تقریباً برابر حالت بدون استوانه می‌باشد. در اواسط حفره نیز چون استوانه به صورت پادساعتگرد می‌چرخد، سیال را از سطح جدا کرده و لایه‌ی مرزی حرارتی ضخیم‌تر می‌شود که موجب تضعیف قدرت جابجایی طبیعی شده وناسلت موضعی کاهش می‌یابد. افزایش شعاع همانطور که در شکل ۵ مشاهده شد، منجر به افزایش ضخامت لایه‌ی مزری در پایین دیواره‌ی گرم شده ونقطه‌ی حداکثری نمودار پایین‌تر از حداکثر مقدار نمودار ناسلت موضعی فاقد استوانه می‌باشد. با این وجود همچنان انتقال حرارت جابجایی طبیعی مکانیزم غالب بوده و حضور استوانه چرخان با چرخش پادساعتگرد فقط منجر به تضعیف این مکانیزم می‌شود. در R =۰/۳ و R =۰/۴ در نمودار ناسلت

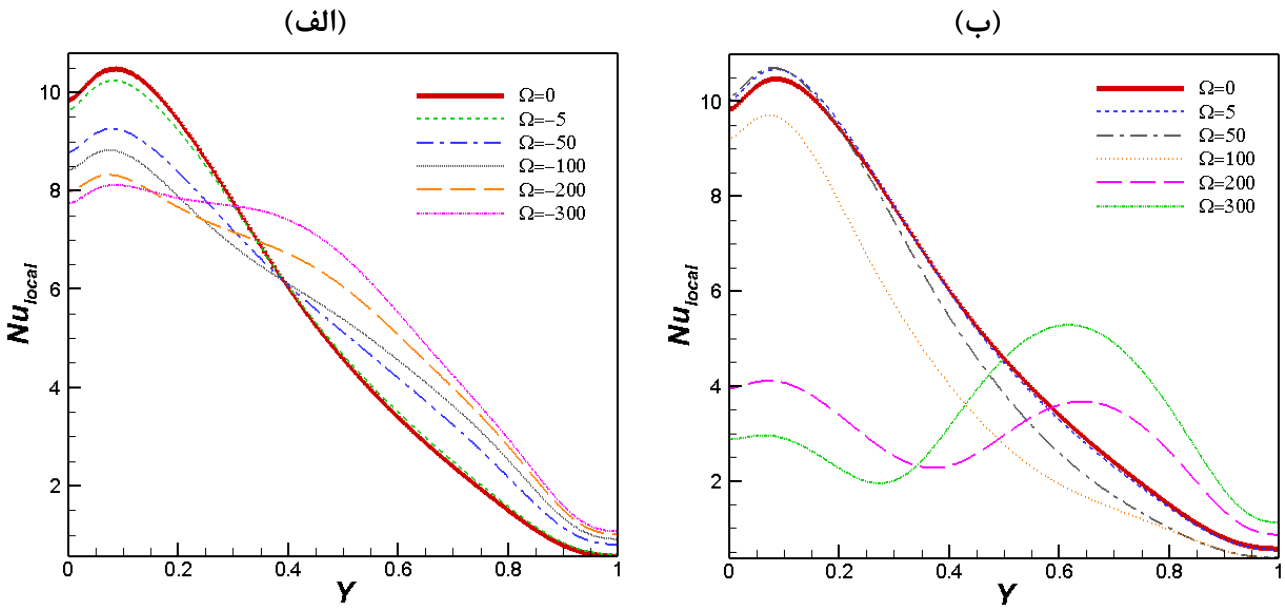


شکل ۷. تغییرات ناسلت موضعی بر روی دیواره‌ی گرم بافرض طول شعاع‌های مختلف برای استوانه چرخان با فرض الف) Ω =-۳۰۰ و ب) Ω =۳۰۰

Fig. . 7. Variations of the local Nusselt on the hot wall assuming different radiuses of the rotating cylinder assuming a) Ω =-300 and b) Ω =300

موضعی مقادیر حداقلی به ترتیب در Y =۰/۲ و Y =۰/۳ مشاهده می‌شود که دلیل این امر برابری قدرت جابجایی اجباری ناشی از چرخش پادساعتگرد استوانه و جابجایی طبیعی می‌باشد که منجر به افت ناسلت موضعی می‌شود از آن پس، جابجایی اجباری غالب بوده و در مرکز دیواره مطابق شکل۵ الف و ب ضخامت لایه‌ی مرزی به شدت کم شده و نقطه‌ی حداکثری ناسلت موضعی تشکیل می‌شود.

شکل۸ الف، نمودار ناسلت موضعی بر روی دیواره‌ی گرم را بر حسب سرعت زاویه‌ای مختلف استوانه نشان می‌دهد. در حالتی که استوانه ثابت باشد، فرایند انتقال حرارت به صورت جابجایی طبیعی و همینطور تبادل حرارت نهان از ابتدای دیواره‌ی گرم حفره آغاز می‌شود و به دلیل ضخامت کم لایه‌ی مرزی، دارای نقطه‌ی حداکثری در آن ناحیه خواهد بود و پس از آن با افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی روند نزولی ناسلت موضعی مشاهده می‌گردد. در حالت چرخش استوانه با Ω=-۵، چون سرعت چرخشی بسیار کوچک است، مومنتوم کافی جهت تقویت فرایند انتقال حرارت به المان‌های سیال منتقل نمی‌شود، از این رو تقریباً رفتاری مشابه با استوانه ساکن ایجاد می‌گردد. افزایش سرعت زاویه‌ای منجر به افزایش ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی در ابتدای دیواره‌ی گرم شده و ناسلت موضعی را کاهش می‌دهد. در Ω=-۵۰ ناسلت موضعی در Y =۰/۴ نسبت به استوانه ساکن بیشتر بوده که به دلیل چرخش ساعتگرد استوانه و در نتیجه تقویت جابجایی طبیعی می‌باشد. در Ω=-۲۰۰ و Ω=-۳۰۰ مشاهده می‌شود که نمودار عدد ناسلت موضعی در میانه‌ی دیواره‌ی گرم دارای انحنا می‌شود، دلیل آن این است که در سرعت زاویه‌ی بزرگتر، عامل اصلی در ایجاد مومنتوم جریان سیال، حرکت چرخشی استوانه بوده که موجب نازک‌تر شدن لایه‌ی مرزی حرارتی در آن ناحیه می‌شود و درنتیجه ناسلت موضعی افزایش می‌یابد. شکل ۸ ب، نمودار ناسلت موضعی بر روی دیواره‌ی گرم را برای چرخش پادساعتگرد استوانه بر حسب سرعت زاویه‌ای‌های مختلف استوانه نشان می‌دهد. به دلیل چرخش غیر هم جهت دوجریان همرفت طبیعی و اجباری استوانه نسبت به هم، فرایند نرخ انتقال حرارت تضعیف شده بطوری که در سرعت‌های Ω<۲۰۰ مومنتوم ایجادی توسط چرخش استوانه فقط منجر به تضعیف فرایند جابجایی طبیعی شده و مکانیزم جابجایی طبیعی غالب است. در حالت‌های Ω≥۲۰۰، در ابتدای دیواره‌ی گرم به دلیل سرعت بالای چرخش استوانه، لایه‌ی مرزی حرارتی نسبت به سرعت‌های چرخشی پایین‌تر بسیار ضخیم‌تر بوده و نتیجتاً ناسلت موضعی بسیار کم می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نقطه‌ی حداقلی بر روی نمودار ناسلت موضعی دیده می‌شود که دلیل آن سرکوب و برابری قدرت دو جریان می‌باشد. بعد از گذر از نقطه‌ی حداقلی، نمودار ناسلت موضعی روندی صعودی را طی می‌کند؛ زیرا فاصله‌ی بین استوانه و دیواره‌ی گرم کمتر شده و چرخش استوانه به



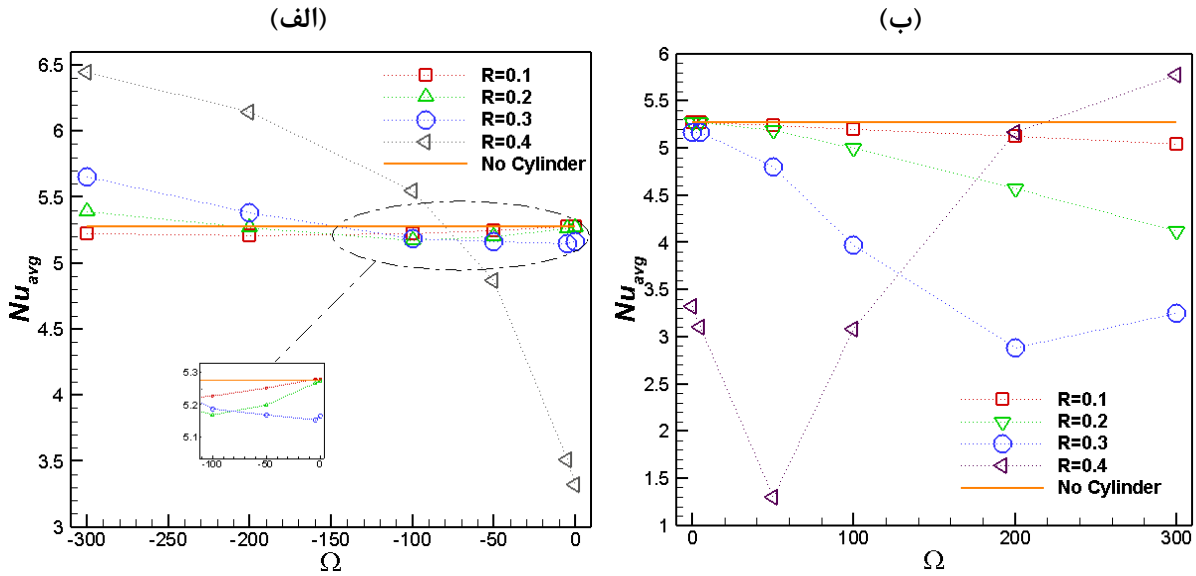
شکل ۸. ناسلت موضعی بر روی دیواره‌ی گرم در R =۰/۳ با فرض الف) چرخش ساعتگرد استوانه ب) چرخش پاد ساعتگرد استوانه

Fig. 8. Local Nusselt number on the hot wall at R =0.3 assuming a) clockwise rotation of the cylinder b) counter-clockwise rotation of the cylinder

المان‌های سیال مومنتوم بالاتری منتقل کرده و منجر به نازک شدن لایه‌ی مرزی حرارتی در اواسط و انتهای دیواره‌ی گرم و غالب شدن جابجایی اجباری و در نتیجه بهبود ناسلت موضعی می‌شود

تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب سرعت زاویه‌ای منفی (ساعتگرد) بافرض طول شعاع‌های مختلف در شکل ۹ الف ارائه شده است. در حالت حفره‌ی بدون استوانه، نرخ انتقال حرارت برابر ۵/۲۷ می‌باشد و درون حفره فرایند انتقال حرارت جابجایی طبیعی حاکم است. هسته‌ی مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات از پایین حفره با گرفتن گرما به دمای تغییر فاز رسیده و با شرکت در فرایند جابجایی طبیعی به سمت بالای حفره حرکت کرده و مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات سرد که هسته‌ی آنها به دمای تغییر فاز نرسیده‌اند به سمت پایین حفره حرکت می‌کنند که منجر به تشکیل یک چرخه می‌شود. هنگامی که استوانه ساکن است، Ω=۰، در مرکز حفره همچون یک دیوار، مانع حرکت المان‌های سیال شده و اجازه‌ی عبور سیال و انتقال گرما توسط آن را نمی‌دهد؛ لذا در R =۰/۴ و با فرض استوانه‌ی بدون چرخش (بیشترین مساحت ممکن در برابر چرخش جریان) نرخ انتقال حرارت در کمترین مقدار می‌باشد که با کاهش شعاع، نرخ انتقال حرارت بهبود می‌یابد ولی نرخ انتقال حرارت با وجود استوانه ساکن در هر شعاعی کمتر از حالت بدون استوانه بوده و مطلوب نمی‌باشد. زمانی که استوانه چرخش ساعتگرد و هم جهت با همرفت طبیعی دارد، برای ۰/۳و۰/۲و۰/۱= R تا سرعت زاویه‌ای Ω=-۵۰ نرخ انتقال حرارت افزایش ناچیزی را نشان می‌دهد زیرا چرخش با سرعت کم به المان‌های سیال مومنتوم کافی جهت تقویت نرخ انتقال گرما را نمی‌دهد. درسرعت زاویه‌ای Ω=-۳۰۰ مشاهده می‌شود که برای R =۰/۱ حالت بدون استوانه همچنان عملکرد بهتری دارد زیرا شعاع به اندازه‌ای کوچک است که حتی در سرعت زاویه‌ای زیاد نیز به المان‌های سیال مومنتوم کافی برای بهبود انتقال حرارت را نمی‌دهد. ولی با افزایش شعاع، R ≥۰/۲، انتقال حرارت اجباری بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی به دلیل افزایش مومنتوم المان سیال با سرعت زاویه‌یΩ=-۳۰۰ غالب شده و نرخ انتقال حرارت بیشتر از حالت بدون استوانه می‌شود. این اتفاق در R =۰/۴ در سرعت زاویه‌ای Ω≥-۱۰۰ رخ می‌دهد، زیرا سرعت چرخش در این ابعاد منجر می‌شود که المان‌های سیال مومنتوم مضاعفی دریافت کرده و نرخ انتقال حرارت در Ω=-۳۰۰ و R =۰/۴ نسبت به حالت بدون استوانه ۲۲/۱۲٪ افزایش یابد.

شکل ۹ ب، تغییرات ناسلت میانگین بر حسب سرعت‌های زاویه‌ای مثبت (پادساعتگرد) را با فرض شعاع‌های مختلف ارائه می‌دهد. در ۰/۲≤



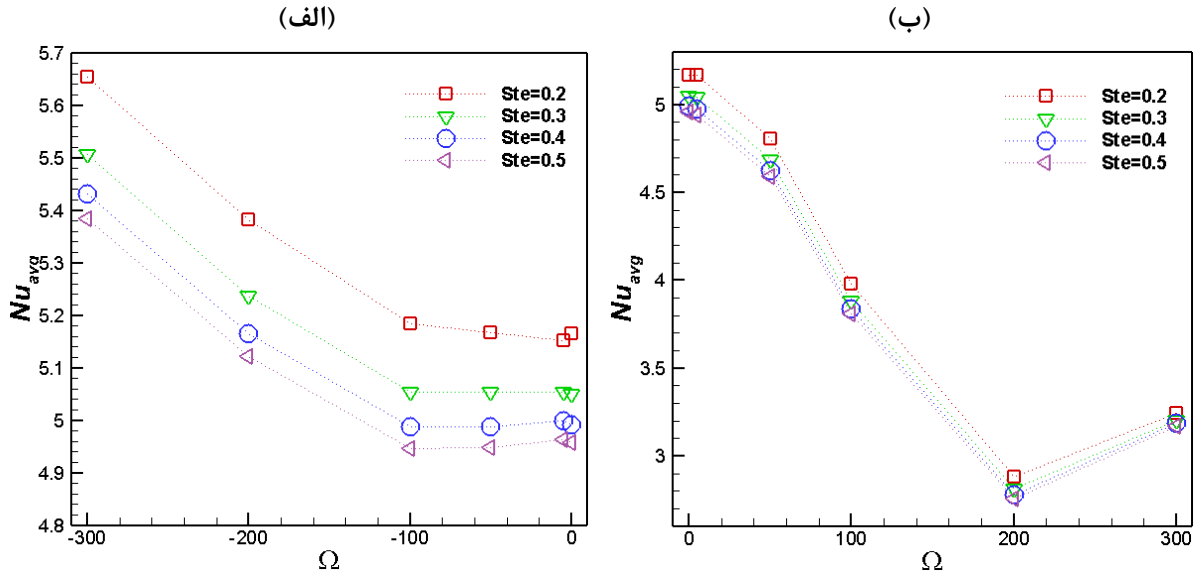
شکل ۹. تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب الف) سرعت زاویه‌ای منفی و ب) سرعت زاویه‌ی مثبت، با فرض طول شعاع‌های مختلف برای استوانه چرخان

Fig. 9. Variations of the average Nusselt number in terms of a) negative angular velocity and b) positive angular velocity, assuming different radiuses of the rotating cylinder.

R چرخش استوانه در خلاف جهت جریان همرفت طبیعی با افزایش سرعت زاویه‌ای موجب تضعیف نرخ انتقال حرارت می‌شود. زیرا چرخش بر خلاف همرفت طبیعی درسدد سرکوب انتقال حرارت طبیعی بر می‌آید.

در R =۰/۳ افزایش سرعت زاویه‌ای منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت به دلیل برهمکنش انتقال حرارت جابجایی ازاد و طبیعی می‌شود. در ۲۰۰= Ω نقطه‌ی مینیموم برای این شعاع مشاهده می‌شود که دلیل آن برابری قدرت همرفت طبیعی و همرفت اجباری می‌باشد. از این نقطه به بعد با افزایش سرعت زاویه‌ای، چرخش استوانه به المان‌های سیال مومنتوم منتقل کرده و باعث می‌شود همرفت اجباری بر همرفت طبیعی غالب شود و نرخ انتقال حرارت افزایش یابد. در R =۰/۴ حداقل نرخ انتقال حرارت در ۵۰= Ω رخ می‌دهد بطوری که فرایند انتقال حرارت را عملاً متوقف می‌کند ولی با افزایش سرعت زاویه‌ای در حالت‌های ۵۰≤Ω نرخ انتقال حرارت به دلیل غالب شدن همرفت اجباری، شروع به افزایش می‌کند بطوری که در ۳۰۰= Ω نرخ انتقال حرارت بیشتر از حالت بدون استوانه می‌شود. در حالت کلی می‌توان بیان کرد که جاگذاری استوانه‌ی چرخان پادساعتگرد داخل حفره از نظر نرخ انتقال حرارت مطلوب نمی‌باشد.

شکل ۱۰ الف، تغییرات عدد ناسلت میانگین را برای چرخش ساعتگرد استوانه داخلی با فرض اعداد استفان مختلف در R =۰/۳ نشان می‌دهد. باتوجه به اینکه عدد استفان بیانگر نسبت گرمای مورد نیاز جهت تغییر دما به گرمای نهان مبادله شده می‌باشد؛ افزایش عدد استفان موجب می‌شود اختلاف دمای فاز جامد و مایع بیشتر شده و سیال برای تغییر فاز گرمای بیشتری نیاز داشته باشد. به عبارت دیگر در اعداد استفان بالاتر، سهم انتقال حرارت نهان در مقابل محسوس کمتر خواهد بود. لذا در Ste =۰/۲ بیشترین مقدار ناسلت میانگین در هر سرعت زاویه‌ای دلخواه اتفاق می‌افتد چراکه هردو مکانیزم انتقال حرارت محسوس و نهان در تبادل حرارتی نقش خواهند داشت. همچنین هم جهت بودن دو جریان همرفت طبیعی و اجباری استوانه در چرخش ساعتگرد، موجب تقویت نرخ انتقال حرارت شده و با افزایش سرعت زاویه‌ای ناسلت میانگین افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ ب، تغییرات عدد ناسلت میانگین را با فرض چرخش پاد ساعتگرد استوانه داخلی بر حسب اعداد استفان مختلف نمایش می‌دهد. در سرعت‌های زاویه‌ای پایین، استوانه تنها به عنوان یک مانع در برابر همرفت طبیعی رفتار می‌کند. با افزایش سرعت زاویه‌ای پادساعتگرد استوانه، تضعیف همرفت طبیعی افزایش می‌یابد و برای تمامی اعداد استفان تا ۲۰۰= Ω روند نزولی و کاهش ناسلت میانگین ادامه دارد بگونه‌ای که در ۲۰۰= Ω حداقل نرخ انتقال حرارت بدست می‌آید زیرا دو جریان غیر هم‌جهت، یکدیگر را خنثی می‌کنند. با افزایش سرعت زاویه‌ای از این مقدار، مومنتوم المان‌های سیال تحت تأثیر چرخش استوانه‌ی



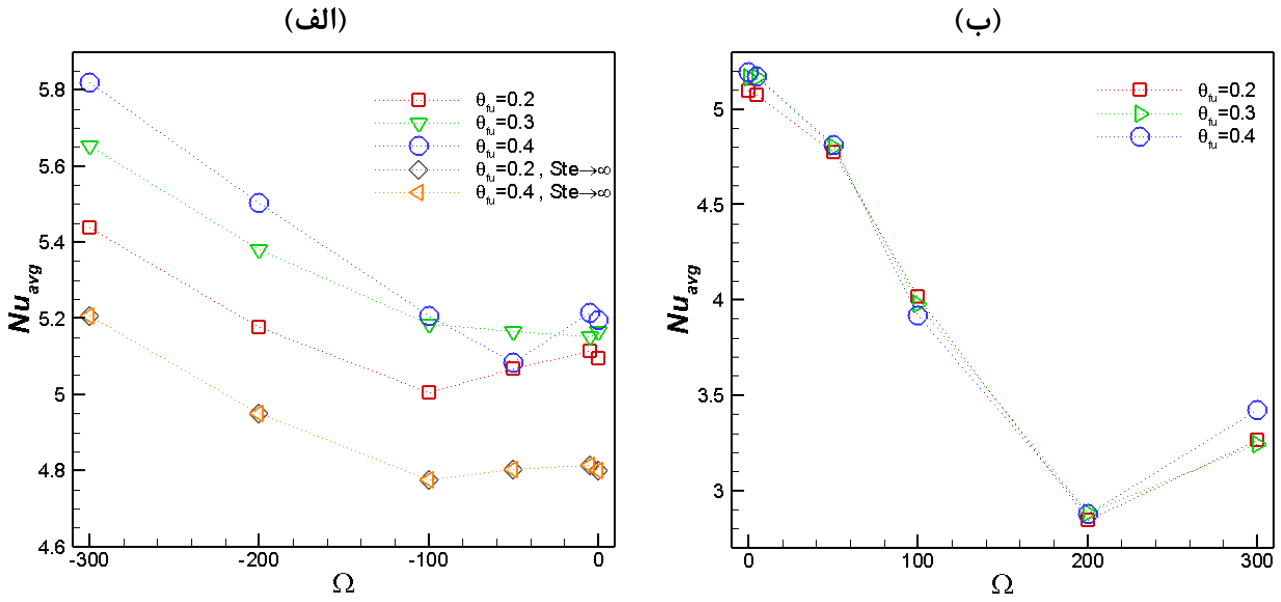
شکل ۱۰. تغییرات عدد ناسلت میانگین R =۰/۳ برحسب الف) سرعت زاویه‌ای مثبت و ب)سرعت زاویه‌ای منفی با فرض اعداد استفان مختلف

Fig. 10. Variations of the average Nusselt number at R =0.3 according to a) positive angular velocity and b) negative angular velocity assuming different Stefan numbers

داخلی بوده و جابجایی اجباری غالب می‌شود و نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. نتایج نشان داده شده نشان می‌دهد که در چرخش پادساعتگرد استوانه نیز نرخ انتقال حرارت در اعداد استفان کوچک بیشتر خواهد بود که ناشی از مشارکت انتقال حرارت نهان در خنک‌کاری سطح گرم می‌باشد.

شکل۱۱الف، تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب سرعت زاویه‌ای مختلف برای استوانه‌ی چرخان ساعتگرد را در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف نشان می‌دهد. θ_{fu} دمایی است که هسته‌ی ذرات مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات در این دما شروع به تغییر فاز می‌کنند. ابتدا برای بررسی تأثیر تغییر فاز در هسته‌ی ذرات مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات بر روی نرخ انتقال حرارت $Ste \to \infty$ فرض شده است که به مفهوم عدم وجود تغییر فاز در هسته‌ی نانوذرات می‌باشد. همانطور که درشکل مشاهده می‌شود، هنگامی که $Ste \to \infty$ دو نمودار ۰/۳و۰/۲= θ_{fu} کاملاً بر روی هم منطبق بوده و نشان می‌دهد ناسلت میانگین مستقل از θ_{fu}بوده و هیچگونه تغییر فازی رخ نمی‌دهد. طبق این نتایج با فرض۳۰۰-= Ω و۰/۴= θ_{fu} تغییر فاز در هسته‌ی ذرات مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات موجب بهبود ۷۹/۱۱ درصدی نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت بدون تغییر فاز در همین سرعت زاویه‌ای می‌شود. چرخش استوانه به صورت ساعتگرد موجب می‌شود سیال از پایین دیواره‌ی گرم به سمت بالای حفره کشیده شود که این امر موجب رشد لایه‌ی مرزی حرارتی شده و عدد ناسلت کاهش می‌یابد. از طرفی هرچه به خط تقارن حفره نزدیک می‌شویم، چون فاصله‌ی بین دیواره و سطح استوانه کمتر می‌شود، مومنتوم المان‌های سیال افزایش یافته و ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی کاهش می‌یابد که موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود.

شکل۱۱ ب، نیز تغییرات ناسلت میانگین را زمانی که استوانه به صورت پاد ساعتگرد در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف در حال چرخش است نمایش می‌دهد. در سرعت زاویه‌ای پایین به دلیل اینکه جابجایی طبیعی غالب است، بیشترین ناسلت میانگین در حالت ۰/۴= θ_{fu} اتفاق می‌افتد چراکه هسته‌ی ذرات مواد تغییرفاز دهنده احاطه شده با نانوذرات در این دما به راحتی به دمای تغییر فاز می‌رسند. با افزایش سرعت تا ۲۰۰≥Ω به دلیل تضعیف جریان همرفت طبیعی توسط چرخش پادساعتگرد استوانه، ناسلت میانگین برای تمامی نمودارها کاهش می‌یابد و در ۲۰۰=Ω با برهمکنش برابر دوجریان، پایین‌ترین میزان ناسلت میانگین رخ داده و از این سرعت به بعد با افزایش Ω و غلبه‌ی جابجایی اجباری به جابجایی آزاد ناسلت میانگین افزایش می‌یابد.

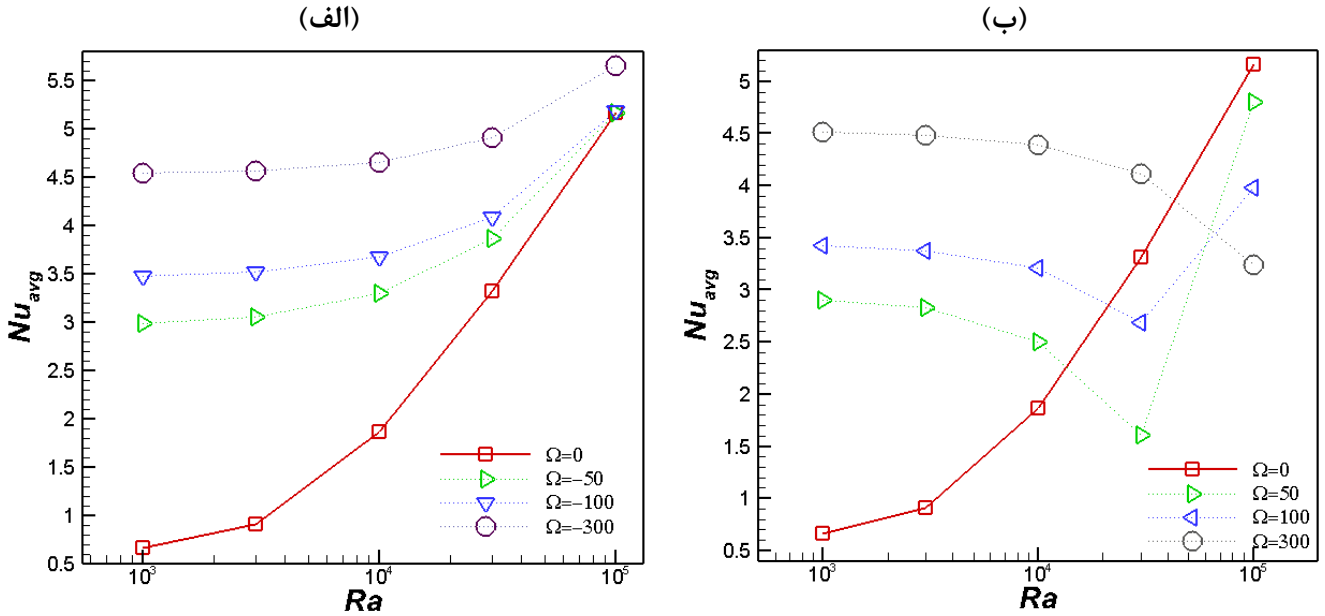


شکل ۱۱. تغییرات عدد ناسلت میانگین در R =۰/۳ برحسب الف) سرعت زاویه‌ای مثبت و ب)سرعت زاویه‌ای منفی با فرض‌های مختلف

Fig. 11. Variations of the average Nusselt number at θ_{fu} =0.3 according to a) positive angular velocity and b) negative angular velocity assuming different .

شکل ۱۲ الف، تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب اعداد رایلی مختلف را با فرض سرعت زاویه‌ای ساعتگرد ارائه می‌دهد. در این نمودار مشاهده می‌شودکه افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه در Ra =۱۰^۳ موجب افزایش چشمگیر عدد ناسلت میانگین نسبت به استوانه ساکن می‌شود؛ زیرا، در Ra=۱۰^۳ نیروی شناوری کوچک بوده و با افزایش سرعت استوانه چرخان به صورت ساعتگرد، به المان‌های سیال مومنتوم منتقل شده و جریان همرفت طبیعی را به شدت تقویت می‌کند و عدد ناسلت میانگین افزایش پیدا می‌کند. به طوری که درRa=۱۰^۵ و Ω=-۳۰۰، نرخ انتقال حرارت ۴۶/۹ درصد نسبت به استوانه‌ی ساکن افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رایلی و تقویت جابجایی طبیعی، ناسلت میانگین روند صعودی را طی می‌کند. درRa=۱۰^۵ مشاهده می‌شود که ناسلت میانگین Ω≤-۱۰۰ تقریباً باهم برابرند؛ زیرا تا Ω≤-۱۰۰ فرایند انتقال حرارت جابجایی طبیعی غالب بوده و چرخش استوانه فقط موجب تقویت نرخ انتقال حرارت می‌شود. ولی با افزایش عدد رایلی، نقش استوانه‌ی چرخان در نرخ انتقال حرارت کم رنگ می‌شود.

شکل ۱۲ ب، تغییرات عدد ناسلت میانگین برحسب اعداد رایلی مختلف بر حسب سرعت زاویه‌ای مختلف استوانه داخلی که به صورت پادساعتگرد می‌چرخد را نشان می‌دهد. در اعداد رایلی کوچک، چرخش پاد ساعتگرد استوانه با تمامی سرعت‌های زاویه‌ای، ناسلت میانگین را افزایش می‌دهد. زیرا نیروی شناوری کوچک، به المان‌های سیال مومنتوم کافی را منتقل نمی‌کند و حضور استوانه چرخان موجب می‌شود که المان‌های سیال از چرخش استوانه مومنتوم مورد نیاز برای فرایند انتقال حرارت را دریافت کند. با افزایش عدد رایلی ناسلت میانگین برای سرعت‌های زاویه‌ای مختلف کاهش می‌یابد؛ زیرا افزایش عدد رایلی درسدد افزایش قدرت جابجایی طبیعی می‌باشد، به طوری که درRa=۱۰^۵×۳ و سرعت‌های زاویه‌ای ۱۰۰و Ω=۵۰ ناسلت میانگین به کمترین مقدار خود رسیده که نقطه‌ی برابری قدرت دوجریان و خنثی کردن اثرات متقابل هم می‌باشد و از آن پس با غالب شدن همرفت طبیعی با افزایش عدد رایلی ناسلت میانگین افزایش می‌یابد. در سرعت زاویه‌ای Ω=۳۰۰ مشاهده می‌شود ناسلت میانگین تا Ra=۱۰^۵ همچنان روند نزولی داشته زیرا در اعداد رایلی بالا مومنتوم‌های ناشی از چرخش استوانه چرخان توانایی غلبه بر جابجایی آزاد را ندارند و فقط منجر به تضعیف نرخ انتقال حرارت می‌شود.



شکل۱۲. تغییرات عدد ناسلت میانگین در ۰/۳= R برحسب اعداد رایلی مختلف با فرض الف) سرعت زاویه‌ای منفی ب) سرعت زاویه‌ای مثبت

Fig. 12. Variations of the average Nusselt number in R =0.3 in terms of different Rayleigh numbers assuming a) negative angular velocity B) positive angular velocity

۵- نتیجه گیری

در مقاله‌ی حاضر، انتقال حرارت همرفت طبیعی و اجباری نانوسیال مواد تغییرفاز دهنده‌ی احاطه شده با نانوذرات محلول در سیال پایه‌ی آب به صورت عددی تحلیل شده است. مسئله شامل یک حفره‌ی مربعی با دو دیواره‌ی گرم و سرد عمودی بوده و در مرکز آن یک استوانه‌ی چرخان قرار دارد. با ارائه‌ی خطوط جریان، همدما و همینطور نتایج عدد ناسلت موضعی و میانگین نتایج زیر بدست آمده است:

- با چرخش استوانه به صورت پادساعتگرد و با فرض شعاع‌های کوچک، ورتکس‌های محلی در مجاورت استوانه تشکیل شده و با افزایش شعاع استوانه این ورتکس‌ها به گوشه‌های حفره منتقل می‌شوند. بگونه‌ای که در R =۰/۴، جریان اجباری ناشی از استوانه مکانیزیم غالب جریان می‌باشد.
- افزایش شعاع منجر به بهبود ناسلت موضعی در میانه‌های دیواره‌ی گرم می‌شود. همچنین یک نقطه‌ی حداکثری در میانه‌های دیواره‌ی گرم مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع این نقطه منتقل می‌شود.
- در های پادساعتگرد بزرگ تغییرات ناسلت موضعی، از یک نقطه‌ی حداکثری در ابتدای دیواره تبدیل به یک نقطه‌ی حداکثری در اواسط دیواره می‌شود. در Ω ساعتگرد بزرگ، مکانیزم اصلی انتقال حرارت جابجایی اجباری می‌باشد.
- با افزایش شعاع بی‌بعد استوانه و با فرض Ω=-۳۰۰ از۰/۱= R تا۰/۴= R، نرخ انتقال حرارت ۲۳/۳۷ درصد افزایش می‌یابد اما حضور استوانه‌ی دوار پادساعتگرد در داخل حفره از نظر انتقال حرارت مطلوب نمی‌باشد.
- با افزایش عدد استفان مقدار ناسلت میانگین کاهش می‌یابد چراکه انتقال حرارت تنها توسط مکانیزم محسوس انجام گرفته و نقش انتقال حرارت نهان تضعیف می‌شود.
- در چرخش ساعتگرد در صورتی که از گرمای نهان صرف نظر شود ($Ste \to \infty$) نرخ انتقال حرارت نسبت به۰/۴= θ_{fu} ۱۰/۵۶درصد کاهش می‌یابد. درچرخش پادساعتگرد استوانه با افزایش θ_{fu} تا نقطه‌ی برابری قدرت دو جریان جابجایی اجباری و آزاد ناسلت میانگین کاهش می‌یابد و از آن پس شروع به افزایش می‌کند.

- افزایش عدد رایلی وقتی استوانه به صورت ساعتگرد می‌چرخد در هر سرعت زاویه‌ای ناسلت میانگین را افزایش می‌دهد. زمانی که استوانه چرخش پاد ساعتگرد دارد، ناسلت میانگین ابتدا تا رسیدن به نقطه‌ی مینیموم کاهش وسپس شروع به افزایش می‌کند.

۶- فهرست علائم

علائم یونانی

ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})	α
لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
دمای بی‌بعد	θ
کسر حجمی نانو ذرات	ϕ
دمای تغییر فاز بی‌بعد	θ_{fu}
سرعت زاویه‌ای ($rad.s^{-1}$)	ω
سرعت زاویه‌ای بی‌بعد	Ω
زیرنویس‌ها	
نانوسیال	nf
سیال پایه	bf
سرد	c
گرم	h
عدد ناسلت موضعی	Nu_{local}
عدد ناسلت میانگین	Nu_{avg}
عدد رایلی	Ra
عدد استفان	Ste
عدد پرنتل	Pr
دمای تغییر فاز	T_{fu}
ظرفیت حرارتی ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	c_p
نسبت ظرفیت گرمایی	C_r
شعاع استوانه داخلی	R
طول حفره	L
مؤلفه‌ی افقی مکان (m)	x
مؤلفه افقی بی‌بعد مکان	X
مؤلفه‌ی عمودی مکان (m)	y
مؤلفه‌ی عمودی بی‌بعد مکان	Y
مؤلفه‌ی افقی سرعت (ms^{-1})	u
مؤلفه‌ی افقی بی‌بعد سرعت	U
مؤلفه‌ی عمودی سرعت (ms^{-1})	v
مؤلفه‌ی عمودی بی‌بعد سرعت	V
دما (K)	T

منابع

[1] E. Jamesahar, M. Sabour, M. Shahabadi, S. Mehryan, M. Ghalambaz, Mixed convection heat transfer by nanofluids in a cavity with two oscillating flexible fins: A fluid–structure interaction approach, Applied Mathematical Modelling, 82 (2020) 72-90.

[2] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, Natural convection and melting of NEPCM in a corrugated cavity under the effect of magnetic field, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 140(3) (2020) 1427-1442.

[3] A.V. Arasu, A.S. Mujumdar, Numerical study on melting of paraffin wax with Al2O3 in a square enclosure, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39(1) (2012) 8-16.

[4] R. Akhilesh, A. Narasimhan, C. Balaji, Method to improve geometry for heat transfer enhancement in PCM composite heat sinks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 48(13) (2005) 2759-2770.

[5] L.-L. Tian, X. Liu, S. Chen, Z.-G. Shen, Effect of fin material on PCM melting in a rectangular enclosure, Applied Thermal Engineering, 167 (2020) 114764.

[6] R. Roslan, H. Saleh, I. Hashim, Effect of rotating cylinder on heat transfer in a square enclosure filled with nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(23-24) (2012) 7247-7256.

[7] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, Mixed convection in a PCM filled cavity under the influence of a rotating cylinder, Solar Energy, 200 (2020) 61-75.

[8] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, International journal of heat and mass transfer, 46(19) (2003) 3639-3653.

[9] D. Ganji, A. Malvandi, Natural convection of nanofluids

inside a vertical enclosure in the presence of a uniform magnetic field, Powder technology, 263 (2014) 50-57.

[10] K.S. Hwang, J.-H. Lee, S.P. Jang, Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al2O3 nanofluids in a rectangular cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 50(19-20) (2007) 4003-4010.

[11] R. Chand, G. Rana, On the onset of thermal convection in rotating nanofluid layer saturating a Darcy–Brinkman porous medium, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(21-22) (2012) 5417-5424.

[12] E. Abu-Nada, H.F. Oztop, Effects of inclination angle on natural convection in enclosures filled with Cu–water nanofluid, International Journal of Heat and Fluid Flow, 30(4) (2009) 669-678.

[13] M. Farrokh, T. Goodarz, J. Samad, N. Javid, H. Amin, Analysis of Entropy Generation of a Magneto-Hydrodynamic Flow Through the Operation of an Unlooped Pulsating Heat Pipe, Journal of Heat Transfer, 140(8) (2018).

[14] F. Selimefendigil, M.A. Ismael, A.J. Chamkha, Mixed convection in superposed nanofluid and porous layers in square enclosure with inner rotating cylinder, International Journal of Mechanical Sciences, 124 (2017) 95-108.

[15] R. Sharma, P. Ganesan, Solidification of nano-enhanced phase change materials (NEPCM) in a trapezoidal cavity: A CFD study, Universal Journal of Mechanical Engineering, 2(6) (2014) 187-192.

[16] Y. Tian, C.-Y. Zhao, A numerical investigation of heat transfer in phase change materials (PCMs) embedded in porous metals, Energy, 36(9) (2011) 5539-5546.

[17] K. Lafdi, O. Mesalhy, S. Shaikh, Experimental study on the influence of foam porosity and pore size on the melting of phase change materials, Journal of Applied Physics, 102(8) (2007) 083549.

[18] S. Wu, D. Zhu, X. Zhang, J. Huang, Preparation and melting/freezing characteristics of Cu/paraffin nanofluid as phase-change material (PCM), Energy & fuels, 24(3) (2010) 1894-1898.

[19] M. Jourabian, M. Farhadi, A.A.R. Darzi, Outward melting of ice enhanced by Cu nanoparticles inside cylindrical horizontal annulus: Lattice Boltzmann approach, Applied Mathematical Modelling, 37(20-21) (2013) 8813-8825.

[20] S. Kashani, A. Ranjbar, M. Madani, M. Mastiani, H. Jalaly, Numerical study of solidification of a nano-enhanced phase change material (NEPCM) in a thermal storage system, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 54(5) (2013) 702-712.

[21] S. Mehryan, E. Izadpanahi, M. Ghalambaz, A. Chamkha, Mixed convection flow caused by an oscillating cylinder in a square cavity filled with Cu–Al2O3/water hybrid nanofluid, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 137(3) (2019) 965-982.

[22] M. Ghalambaz, A. Doostani, E. Izadpanahi, A. Chamkha, Phase-change heat transfer in a cavity heated from below: the effect of utilizing single or hybrid nanoparticles as additives, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 72 (2017) 104-115.

[23] J. Buongiorno, Convective Transport in Nanofluids, Journal of Heat Transfer, 128(3) (2005) 240-250.

[24] S. Barlak, O.N. Sara, A. Karaipekli, S. Yapıcı, Thermal conductivity and viscosity of nanofluids having nanoencapsulated phase change material, Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 20(2) (2016) 85-96.

[25] L. Chai, R. Shaukat, L. Wang, H.S. Wang, A review on heat transfer and hydrodynamic characteristics of nano/microencapsulated phase change slurry (N/MPCS) in mini/microchannel heat sinks, Applied Thermal Engineering, 135 (2018) 334-349.

[26] B. Chen, X. Wang, R. Zeng, Y. Zhang, X. Wang, J. Niu, Y. Li, H. Di, An experimental study of convective heat transfer with microencapsulated phase change material suspension: laminar flow in a circular tube under constant heat flux, Experimental Thermal and Fluid Science, 32(8) (2008) 1638-1646.

[27] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, International journal of heat and mass transfer, 54(19-20)

(2011) 4410-4428.

[28] A. Zaraki, M. Ghalambaz, A.J. Chamkha, M. Ghalambaz, D. De Rossi, Theoretical analysis of natural convection boundary layer heat and mass transfer of nanofluids: effects of size, shape and type of nanoparticles, type of base fluid and working temperature, Advanced Powder Technology, 26(3) (2015) 935-946.

[29] I. Abd. Karim, C. Hean Lee, A. J. Gil, J. Bonet, A two-step Taylor-Galerkin formulation for fast dynamics, Engineering Computations, 31(3) (2014) 366-387.

[30] M. Ghalambaz, A.J. Chamkha, D. Wen, Natural convective flow and heat transfer of nano-encapsulated phase change materials (NEPCMs) in a cavity, International journal of heat and mass transfer, 138 (2019) 738-749.

[31] C.-C. Liao, C.-A. Lin, Influence of Prandtl number on the instability of natural convection flows within a square enclosure containing an embedded heated cylinder at moderate Rayleigh number, Physics of Fluids, 27(1) (2015) 013603..

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Mobadersani , N. Rashidi, Numerical Investigation of Heat Transfer of Water/Nano-Encapsulated Phase Change Materials in a Cavity Including a Rotating Cylinder, Amirkabir J. Mech Eng., 54(9) (2022) 2175-2194.

DOI: 10.22060/mej.2022.21222.7405