Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(special issue 3) (2021) 465-468
DOI: 10.22060/mej.2020.17242.6546

Numerical analysis of flow and natural convection heat transfer in a circular enclosure heated from bottom utilizing porous layer

F. Mobadersani[1,*], F. Tavakkol[2]

[1] Faculty of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran
[2] Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: In the present paper, laminar flow and heat transfer of Fe_3O_4 /water nanofluid in a circular enclosure have been numerically carried out using the Buongiorno's model. A porous layer is attached to the hot wall of the enclosure and an applied uniform external magnetic field generates magnetohydrodynamic effect in the cavity. The simulations are performed utilizing a two-phase model and nano particle concentration distribution is presented. All of the equations are solved in dimensionless form. The control parameters in this study are Darcy number $(1e-6 \le Da \le 1e-1)$, angle of the applied magnetic field $(0 \le \gamma \le 90)$, Hartmann number $(0 \le Ha \le 200)$, effective conductive heat transfer coefficient of the porous layer $(10 \le k_{eff} \le 100)$, Rayleigh number $(1e3 \le Ra \le 5e5)$, geometrical parameters like porous layer thickness $(0.01 \le t_{layer} \le 0.09)$, and central angle of the cavity . The gained results which are derived in form of plots, contours, and also streamlines show the dependency of Nusselt number to control parameters. According to the results, any changes in Darcy number cause Nusselt number variations, and also there is a specified Darcy number that heat transfer reduces by an increase of Darcy number. Moreover, by an increment of Hartmann number, leading to higher Lorentz force, the average Nusselt number will reduce because the momentum of fluid flow and consequently convective heat transfer decrease inside the enclosure.

Review History:

Received: Oct. 18, 2019
Revised: May. 16, 2020
Accepted: Jan. 20, 2020
Available Online: Aug. 05, 202

Keywords:

Circular enclosure
Nanofluid
Porous layer
Magnetohydrodynamic
Buongiorno two-phase model

1- Introduction

Natural convection heat transfer has attracted the attention of many researchers due to its extensive applications in engineering such as electrical cooling, air conditioning, insulation of reactors, solar collectors, fire protection systems, heat exchangers, etc. [1, 2]. Numerous numerical and experimental studies have been performed on various applications of heat transfer in the cavity. In the experimental investigation field, the studies of Davis [3] and Giva et al. [4] are momentous. Shi and Khodadai [5] numerically studied heat transfer in a cavity, in which a fin was placed on the hot wall. Park et al. [6] examined natural heat transfer in an inclined cavity with circular hot obstacles inside it numerically. Choi et al. [7] investigated the effect of placing a circular cylinder in a rhombus cavity on the natural heat transfer. They concluded that by changing the cylinder location from bottom to top of the cavity, the Nusselt number reduces significantly. Khanafer et al. [8] studied laminar natural heat transfer in a cavity with a porous fin attached to the hot wall. Kakarantzas et al. [9] studied nanofluid natural convection in a cavity under magnetic field effect and concluded that any increase in Hartmann number leads to a decrease of Nusselt number. Also, Rudraiah et al. [10] reached the same conclusion about the significance of conduction in a cavity in high Hartmann numbers.

As mentioned, cavities with different geometries have various applications in air conditioning systems, renewable energy, heat exchangers, etc., and due to the poor thermal performance of ordinary fluids, the researchers look for any active or passive methods to improve thermal performance. Indeed, it will be important to study any geometry or other possibility that may result in better thermal performance in the cavities. Based on the authors' best knowledge, there is no work about the nanofluid flow and heat transfer in a quarter of a circular cavity considering two-phase method, so far. Additionally, magnetohydrodynamics effects are considered in the present paper by applying a uniform magnetic field, and also, a porous thin layer has been inserted above the hot wall of the cavity.

2- Mathematical Modeling

In this paper, the incompressible, steady, and two-dimensional flow assumptions are considered to investigate natural convection inside a floor-heated circular cavity with a porous layer mounted on its hot wall. The geometry of the problem is presented in Fig. 1 along with the boundary conditions. The radius of the circular cavity is R and the boundary conditions in this case, whose geometry is a quarter of a circle, are the hot temperature T_h at the bottom of the

*Corresponding author's email: fmobadersani@gmail.com

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.

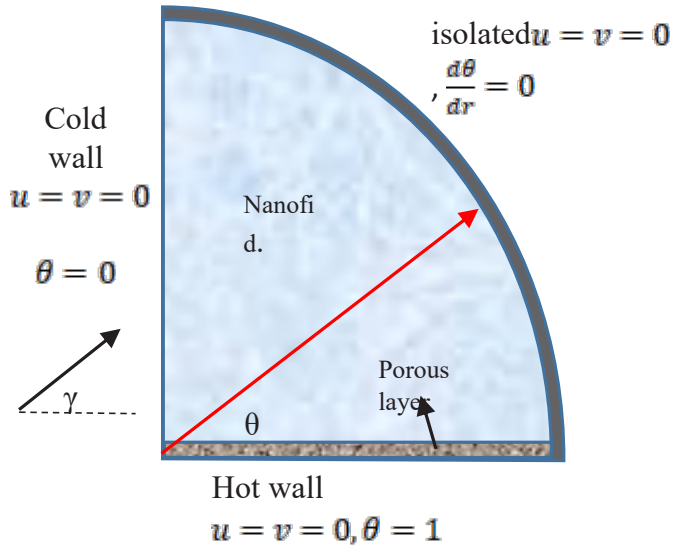


Fig. 1. Geometry and boundary conditions

cavity and the cold temperature T_c at the left wall, as well as the arc of the cavity is adiabatic. It should be noted that the values of hot and cold temperatures are assumed to be such that the fluid does not change phase. Also, any changes in physical properties of the base fluid with respect to temperature can be ignored (except for the fluid density). The chamber contains nanofluid Fe_3O_4-water and also has a porous layer according to the shape with a dimensionless thickness T_{layer} located on the floor of the cavity attached to the hot wall. It is assumed that the surface of the nanoparticles is covered with surfactant, which prevents them from settling on the solid wall of the porous area or sticking to each other [11]. It should be noted that the presence and absence of this layer, as well as its dimensionless thickness, are among the control parameters of the problem and variable. In the porous region, the Local Thermal Equilibrium (LTE) is assumed and the developed Darcy (Forchheimer-Brinkman) relationship is used. The uniform magnetic flux B is induced by the angle γ to the fluid field, which leads to the application of the Lorentz force (magnetohydrodynamic force) on the fluid elements. The diameter of the nanoparticles of Fe_3O_4 is 10 nanometers and the base fluids Prandtl number is 6.97. It is assumed that the density changes are only a function of temperature and follow the Boussinesq approximation. On the other hand, the distribution of nanoparticles inside the cavity has been calculated using the Buongiorno model.

The governing equations including continuity, momentum, energand nanoparticle distribution equations for both the clear and porous regions are solved numerically.

The governing equations for the porous layer are as follows:

-continuity equation:

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

-Momentum equation in X-direction:

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}\frac{1}{\varepsilon^2}\left(U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial U}{\partial Y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\Pr}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right)\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} - \frac{\Pr}{Da}U\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}\right) - \frac{F}{\sqrt{Da}}|V|U - Ha^2\Pr\left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f}\right)(B_y^2 U - B_x B_y V) \tag{2}$$

-Momentum equation in Y-direction:

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}\frac{1}{\varepsilon^2}\left(U\frac{\partial V}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial Y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\Pr}{\varepsilon}\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right)\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} - \frac{\Pr}{Da}V\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}\right) - \frac{F}{\sqrt{Da}}|V|V - Ha^2\Pr\left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f}\right)(B_x^2 V - B_x B_y U) + Ra\Pr\left(\frac{\beta_{nf}}{\beta_f}\right)\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}\right)\theta \tag{3}$$

-Energy equation:

$$B\left(U\frac{\partial \theta}{\partial X} + V\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right) = \frac{k_{eff}}{k_{nf}}\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right) + N_b\left(\frac{\partial \phi}{\partial X}\frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \phi}{\partial Y}\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right) + N_t\left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)^2\right] \tag{4}$$

-Nanoparticle distribution

$$\left(U\frac{\partial \phi}{\partial X} + V\frac{\partial \phi}{\partial Y}\right) = \frac{\varepsilon}{Le}\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2}\right) + \frac{N_t \varepsilon}{Le N_b}\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right) \tag{5}$$

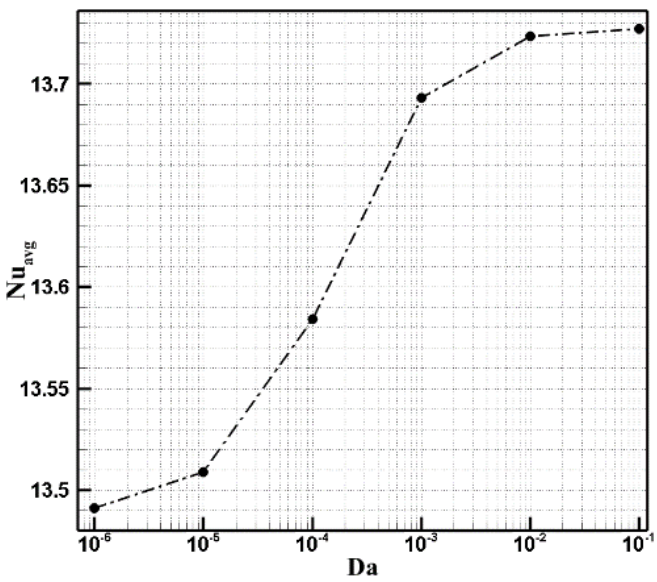


Fig. 2. Variations in the average Nusselt number by Darcy number considering

Ra=1E5, Ha=30, γ=45, k_eff=10

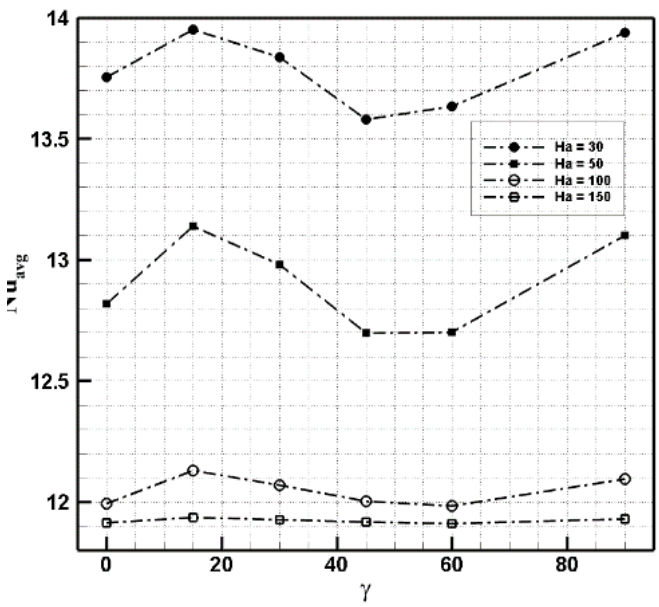


Fig. 3. Variations in the Nusselt number according to the magnetic field applying angle and

Ra=1E5, Da=5E-5, =10

Due to the continuum hypothesis of temperature, momentum, and nanoparticle distribution at the porous and clear regions interfaces and also the no-slip condition at the solid walls, the boundary conditions are as follows:

-At the interface of the clear and porous region:

$$U_{Nanofluid}=U_{porous}\ ,\ V_{Nanofluid}=V_{porous}\ ,\ \left.\frac{\partial U}{\partial n}\right|_{fluid}=\frac{1}{\varepsilon}\left.\frac{\partial U}{\partial n}\right|_{porous},$$
$$\left.\frac{\partial V}{\partial n}\right|_{fluid}=\frac{1}{\varepsilon}\left.\frac{\partial V}{\partial n}\right|_{porous}\quad \theta_{Nanofluid}=\theta_{porous}\ ,\ \phi_{fluid}=\phi_{porous}\ , \tag{6}$$
$$\left.\frac{\partial \phi}{\partial n}\right|_{fluid}=\left.\frac{\partial \phi}{\partial n}\right|_{porous}$$

-At the walls:

$$U(0,Y)=V(0,Y)=0,\quad \theta(0,Y)=1,\quad \theta(\sqrt{X^2+Y^2}=1)=0,$$
$$N_b\left.\frac{\partial \phi}{\partial X}\right|_{\sqrt{X^2+Y^2}=1}+N_t\left.\frac{\partial \phi}{\partial X}\right|_{\sqrt{X^2+Y^2}=1}=0\ ,\ U(\sqrt{X^2+Y^2}=1)=V(\sqrt{X^2+Y^2}=1)= \tag{7}$$
$$U(X,0)=V(X,0)=0\ ,\ \frac{\partial \phi(X,0)}{\partial Y}=\frac{\partial \phi(X,1)}{\partial Y}$$

3- Result and Discussion

In the present paper, the flow and heat transfer of nanofluid within a circular enclosure with a porous layer over the hot wall are analyzed using two-phase method. In addition, a uniform magnetic field on the fluid field has been applied, which caused magnetohydrodynamic effects. The numerical results are verified by comparing against different previously published numerical and experimental data. By examining the various simulations, we can obtain the effective parameters in this problem, which include: the angle of the enclosure (in small Hartmann numbers), the Hartmann number, the angle of application of the magnetic field, the dimensionless thickness of the porous layer and the Darcy number (in numbers).

Fig. 2 reports the average Nusselt number variations versus Darcy number. In low Darcy numbers, the pressure drop increases due to the low permeability of the porous region. Thus, the fluid elements' momentum decreases which results in a reduction of the Nusselt Number.

To investigate the Lorentz force effects on the fluid flow and heat transfer in the enclosure, average Nusselt number changes versus Hartmann number and the magnetic field applying angle are illustrated in Fig. 3. Whenever **γ** is zero the Lorentz force is applied in *Y* direction which leads to weakening the *Y* direction elongated vortices. According to this figure, the maximum Nusselt number happens in the case of **γ**=90, in which the buoyancy force is not affected by Lorentz force.

4- Conclusions

In the present paper, the nanofluid heat transfer in a quarter of a circular cavity has been performed. Also, a uniform magnetic field has been applied to the fluid field to study the Lorentz force.

The results indicate that severe nanoparticle distribution gradients are formed in lower sector angles. According to the results, any changes in Darcy number cause Nusselt number variations, and also there is a specified Darcy number that heat transfer reduces by an increase of Darcy number. Moreover, by an increment of the Hartmann number, leading to a higher Lorentz force, the average Nusselt number will reduce.

References

[1] M. Sheikholeslami, & Rashidi, M. M. , Effect of space dependent magnetic field on free convection of Fe3O4–water nanofluid, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 56 (2015) 6-15.

[2] M.M. Rashidi, Momoniat, E., Ferdows, M., & Basiriparsa, A. , Lie group solution for free convective flow of a nanofluid past a chemically reacting horizontal plate in a porous media, Mathematical Problems in Engineering, , (2014).

[3] G. de Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution, International Journal for numerical methods in fluids, 3 (1983) 249-264.

[4] S.O. Giwa, Sharifpur, M., & Meyer, J. P. , Experimental study of thermo-convection performance of hybrid nanofluids of Al2O3-MWCNT/water in a differentially heated square cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 148 (2020) 119072.

[5] X. Shi, & Khodadadi, J. M. , Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated square cavity due to a thin fin on the hot wall, Journal of Heat Transfer, 125(4) (2003) 624-634.

[6] H.K. Park, Ha, M. Y., Yoon, H. S., Park, Y. G., & Son, C. , A numerical study on natural convection in an inclined square enclosure with a circular cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, 66 (2013) 295-314.

[7] C. Choi, Jeong, S., Ha, M. Y., & Yoon, H. S. , Effect of a circular cylinder's location on natural convection in a rhombus enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 77 (2014) 60-73.

[8] K. Khanafer, AlAmiri, A., & Bull, J., Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated cavity with a thin porous fin attached to the hot wall, International Journal of Heat and Mass Transfer, 87 (2015) 59-70.

[9] S.C. Kakarantzas, Sarris, I. E., Grecos, A. P., & Vlachos, N. S., Magnetohydrodynamic natural convection in a vertical cylindrical cavity with sinusoidal upper wall temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer,, 52(1-2) (2009) 250-259.

[10] N. Rudraiah, Barron, R. M., Venkatachalappa, M., & Subbaraya, C. K., Effect of a magnetic field on free convection in a rectangular enclosure, International Journal of Engineering Science, 33(8) (1995) 1075-1084.

[11] D.A. Nield, & Kuznetsov, A. V. , The Cheng–Minkowycz problem for natural convective boundary-layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid., International Journal of Heat and Mass Transfer, 52(25-26) (2009) 5792-5795.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Mobadersani1, F. Tavakkol , Numerical analysis of flow and natural convection heat transfer in a circular enclosure heated from bottom utilizing porous layer. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 465-468.

DOI: 10.22060/mej.2020.17242.6546

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ویژه ۳، سال ۱۴۰۰، صفحات ۱۹۳۷ تا ۱۹۶۲
DOI: 10.22060/mej.2020.17242.6546

تحلیل عددی جریان و انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌ی قطاعی گرم‌شده از کف با استفاده از لایه‌ی متخلخل

فرخ مبادرثانی*، فرداد توکل

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران
[۲] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

خلاصه: در مقاله‌ی حاضر، جریان آرام و انتقال حرارت نانوسیال Fe3O4/آب در یک محفظه‌ی دایروی به صورت عددی و با روش دوفازی بونجیورنو انجام شده است. یک لایه‌ی متخلخل به دیواره‌ی داغ محفظه جاگذاری شده و اعمال میدان مغناطیسی یکنواخت خارجی موجب ایجاد اثرات مگنتوهیدرودینامیکی در محفظه شده است. تمامی معادلات به صورت بی‌بعد حل شده و توزیع غلظت نانوذرات ارائه شده است. پارامترهای کنترلی در این مطالعه شامل عدد دارسی $10^{-6} \le Da \le 10^{-1}$، زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی $0 \le \gamma \le 90$، عدد هارتمن $0 \le Ha \le 200$، ضریب انتقال حرارت هدایتی موثر لایه‌ی متخلخل $10 \le k_{eff} \le 100$، عدد رایلی $0 \le Ra \le 5\times10^{5}$، پارامترهای هندسی نظیر ضخامت لایه‌ی متخلخل $0.01 \le t_{layer} \le 0.09$ و زاویه‌ی مرکزی محفظه $0 \le \theta \le 90$ می‌باشد. نتایج بدست‌آمده از بررسی‌های انجام‌شده به صورت نمودار، کانتور و همچنین خطوط جریان، وابستگی عدد ناسلت به پارامترهای کنترلی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بدست‌آمده، با تغییر عدد دارسی، عدد ناسلت میانگین تغییر یافته و مقدار مشخصی از عدد دارسی وجود دارد که کمتر از آن مقدار، جاگذاری لایه‌ی متخلخل موجب کاهش انتقال حرارت می‌گردد. با این وجود، با افزایش عدد هارتمن که موجب اعمال نیروی لورنتس می‌شود، عدد ناسلت کاهش خواهد یافت زیرا مومنتوم جریان سیال و بنابراین انتقال حرارت جابجایی در داخل محفظه کاهش می‌یابد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۲/۲۷
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۵/۱۵

کلمات کلیدی:
محفظه‌ی دایروی
نانوسیال
لایه‌ی متخلخل
مگنتوهایدرودینامیک
روش دوفازی بونجیورنو

۱- مقدمه

انتقال حرارت جابجایی آزاد به واسطه‌ی کاربردهای گسترده‌ی آن در فرآیندهای مهندسی از قبیل خنک‌کاری الکتریکی، تهویه‌ی مطبوع، عایق‌بندی راکتورها، کالکتورهای خورشیدی، سیستم‌های اطفاء حریق، مبدل‌های حرارتی و غیره [۱-۴] مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. مطالعات عددی و تجربی زیادی بر روی کاربردهای مختلف انتقال حرارت جابجایی در حفره انجام گرفته است. در میان این پژوهش‌ها می‌توان به آزمایشات دیویس [۵] و همینطور گیوا و همکاران [۶] اشاره کرد. همچنین مطالعات زیادی در خصوص افزایش انتقال حرارت جابجایی طبیعی در محفظه‌های بسته انجام گرفته که به صورت تاریخچه ارائه شده است [۷]. دیویس [۵] جابجایی طبیعی در یک حفره مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی در دو دمای متفاوت و ثابت را به صورت عددی بررسی کرد. در سال ۲۰۰۹، وو و چینگ [۸] جابجایی طبیعی در یک حفره مربعی حاوی هوا با وجود مانع در دیواره‌ی بالایی را بررسی کردند. مطالعات آن‌ها در شرایط عایق‌بودن دیواره‌ی بالایی نشان داد که وجود تیغه باعث بوجودآمدن گردابه و جدایش جریان در پشت مانع می‌شود و شکل جریان گردابه به محل قرارگیری تیغه و دمای دیواره‌ی بالایی بستگی دارد. در سال ۲۰۰۳، شی و خدادادی [۹] انتقال حرارت جابجایی طبیعی را به صورت عددی در یک حفره مربعی با یک تیغه‌ی نازک در دیواره‌ی سمت چپ

* 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.

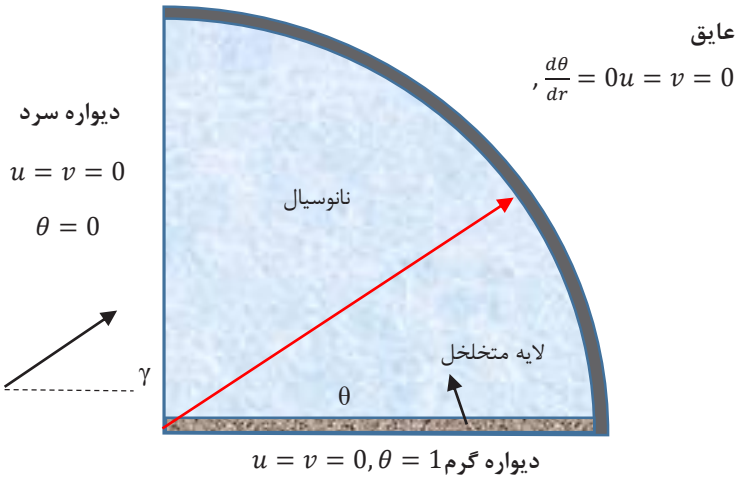
آن بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که قراردادن تیغه روی دیواره‌ی سمت چپ باعث چرخش گردابه‌ها به صورت ساعتگرد می‌شود و همچنین نرخ جریان در اعداد رایلی بزررگ، بدون توجه به محل قرارگیری تیغه افزایش می‌یابد. سیواسانکاران و کانداسوامی [۱۰] انتقال حرارت جابجایی طبیعی در داخل یک حفره با موانع داغ را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش ارتفاع موانع، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد و همچنین محل قرارگیری موانع تاثیر زیادی بر روی حرکت سیال و عدد ناسلت دارد. پارک و همکاران [۱۱] جابجایی طبیعی جریان آرام را بر روی یک محفظه‌ی بسته‌ی شیب‌دار با یک مانع استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش زاویه‌ی شیب حفره، عدد ناسلت متوسط در امتداد دیواره‌ی بالایی و پایینی حفره به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. پارک و همکاران [۱۲, ۱۳] جابجایی طبیعی در داخل یک حفره مربعی با چند استوانه‌ی دایروی داغ در داخل آن را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که در اعداد رایلی پایین، توزیع خطوط دماثابت و خطوط جریان به میزان زیادی به فاصله‌ی میان استوانه‌ها و دیواره حفره بستگی دارد. وانگ و همکاران [۱۴] ، پارک و همکاران [۱۵]و دای و همکاران [۱۶] جابجایی طبیعی در جریان آرام را در یک محفظه‌ی بسته‌ی دو بعدی شامل یک جفت میکرولوله‌ی افقی سرد و داغ بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که محل قرارگیری استوانه‌های سرد و داغ تاثیر زیادی بر روی عدد ناسلت متوسط دارد. چوی و همکاران [۱۷] تاثیر محل قرارگیری استوانه‌ی دایروی در انتقال حرارت جابجایی طبیعی را در یک محفظه‌ی لوزی‌شکل بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که با تغییر موقعیت استوانه‌ی داغ از نیمه‌ی پایینی محفظه به نیمه‌ی بالایی، میانگین عدد ناسلت به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد. در سال‌های اخیر، بسیاری از محققان اقدام به استفاده از نانوسیال به عنوان یکی از راه‌های افزایش انتقال حرارت کرده‌اند. نانوسیالات نوعی از سیالات انتقال حرارتی می‌باشند که شامل مقدار اندکی ذره در ابعاد نانو می‌باشند که هدایت گرمایی بالاتری نسبت به سیال پایه دارند. اطلاعات جامعی در مورد رسانایی گرمایی نانوسیال و تاثیر آن بر ویسکوزیته‌ی دینامیکی و افزایش افت فشار ناشی از این ذرات به صورت تاریخچه موجود می‌باشد [۱۸, ۱۹]. موضوع نانوسیالات بخشی از علم مکانیک سیالات است که در آن به بررسی نمونه‌ای از سیالات انتقال حرارتی که از مخلوط همگن سیالات شناخته‌شده نظیر آب و اتیلن گلیکول و ذرات با اندازه‌ی نانو به وجود می‌آیند و با توجه به خواص ویژه‌ی این ذرات نظیر رسانایی حرارتی بالا و خاصیت فرومغناطیس، این سیالات خواص منحصربه فردی دارند که منجر به استفاده از آن‌ها در کاربردهای متنوع از قبیل کاربردهای مهندسی عمران، مکانیکی و شیمیایی، دستگاه‌های ذخیره سازی انرژی حرارتی، مبدل‌های حرارتی، سیستم‌های آب زیرزمینی، خنک‌کننده الکترونیکی، دیگ‌های بخار، تلفات گرما از لوله، استخراج نفت خام، و غیره شده است. همچنین لازم به ذکر است که برخی از سیالات در طبیعت مانند خون که دارای گلبول‌های قرمز حاوی آهن می‌باشند و رفتار مغناطیسی از خود نشان می‌دهند نیز به عنوان فروسیال بیولوژیکی شناخته می‌شوند. رفتار این دسته از سیال‌ها در حضور میدان مغناطیسی امروزه توجه زیادی را به خود جلب کرده و تحقیقات قابل توجهی روی آن‌ها صورت گرفته است [۲۰-۲۴]. بلجین [۲۵] جابجایی طبیعی در یک حفره مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی هم‌دما با وجود یک تیغه باریک چسبیده به دیواره را به صورت عددی بررسی کرد. وی با تغییر طول بی‌بعد تیغه از ۰/۱تا ۰/۹، تغییر موقعیت بی‌بعد تیغه از ۰ تا ۰/۹ و اعمال سایر تغییرات دریافت که با افزایش عدد رایلی عدد ناسلت افزایش می‌یابد و با افزایش طول تیغه و نسبت رسانایی حرارتی روند کاهشی دارد. بن نهی و چمخا [۲۶] جابجایی طبیعی در یک محفظه‌ی مربعی با یک تیغه نازک شیب‌دار که طول آن ثابت نگه داشته شده است را به صورت عددی بررسی کردند. در این پژوهش فین شیب‌دار به دیواره‌ی عمودی سمت چپ که دیواره‌ی داغ می‌باشد، چسبیده است و بقیه دیواره‌ها سرد می‌باشند که در نتیجه‌ی آن اثرات زاویه‌ی شیب و طول تیغه و رسانایی حرارتی دیواره‌های سرد بر روی خطوط جریان و کانتورهای دما در داخل محفظه بررسی شده اند. خنافر و الامیری [۲۷] جابجایی طبیعی جریان آرام را در داخل یک حفره مربعی با وجود یک تیغه نازک متخلخل که به دیواره‌ی داغ چسبیده است به صورت عددی تحت شرایط پایا بررسی کردند. در این پژوهش که تیغه متخلخل به دیواره‌ی داغ که در سمت چپ قرار دارد چسبیده و دیواره‌ی سمت راست در دمای پایین‌تری قرار دارد، تغییر پارامترهای مختلف نظیر عدد رایلی، عدد دارسی، زاویه‌ی شیب تیغه ، طول و محل قرارگیری تیغه بررسی شده و نتایج بدست‌آمده حاکی از این است که وجود تیغه متخلخل عدد ناسلت میانگین را افزایش می‌دهد

و بهترین موقعیت برای تیغه نزدیک به سطح زیرین یا در وسط حفره می‌باشد. کفایتی [۲۸] انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام نانوسیال غیرنیوتنی در حضور میدان مغناطیسی افقی خارجی در یک حفره مربعی به روش اختلاف محدود شبکه‌ی بولتزمن بررسی کرد. در پژوهش موردنظر تغییرات پارامترهایی نظیر عدد رایلی، اندیس پاورلاو، عدد هارتمن و درصد حجمی نانوذره بررسی شده و نتایج بدست‌آمده حاکی از کاهش انتقال حرارت با افزایش اندیس پاورلاو در غیاب میدان مغناطیسی و افزایش آن در حضور میدان مغناطیسی می‌باشد و همچنین با افزایش درصد حجمی نانوذره و کاهش عدد هارتمن انتقال حرارت افزایش می‌یابد. شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال آب در داخل یک محفظه‌ی دایروی با زوایای مرکزی متفاوت به صورت عددی توسط میر عابدیان و فرهادی [۲۹] انجام گرفت. در این شبیه‌سازی که به کمک روش المان محدود انجام گرفت، اثرات عدد رایلی بر روی نرخ انتقال حرارت با توجه به عدد ناسلت متوسط مطالعه شده و نتایج بدست‌آمده حاکی از افزایش عدد ناسلت متوسط با کم‌شدن زاویه‌ی مرکزی محفظه‌ی دایروی بود. همچنین یک رابطه برای نرخ انتقال حرارت با توجه به اثر زاویه‌ی بین دو سطح محفظه و عدد رایلی با استفاده از نتایج شبیه‌سازی میر عابدیان و فرهادی بدست آمد. کاکرانتاس و همکاران [۳۰] ، انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی را در یک محفظه‌ی استوانه‌ای عمودی با دمای سینوسی دیواره‌ی بالایی بررسی کردند. نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی عددی آن‌ها نشان داد که افزایش عدد هارتمن موجب کاهش حرکت سیال‌شده و انتقال حرارت هدایتی به طور مداوم بیش از انتقال حرارت جابجایی می‌شود. اثر میدان مغناطیسی استاتیک بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه استوانه‌ای افقی پرشده با نانوسیال با استفاده از روش شبکه‌ی بولتزمن توسط آشورنژاد و همکاران انجام شد [۳۱]. آن‌ها دریافتند با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رایلی، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد، درحالی‌که با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. روادیا و همکاران [۳۲] اثر میدان مغناطیسی بر روی جابجایی طبیعی در یک محفظه مستطیلی را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که اعمال میدان مغناطیسی باعث کاهش میزان انتقال حرارت خواهد شد. همچنین ازتوپ و همکاران [۳۳] جابجایی طبیعی مگنتوهیدرودینامیک را در یک محفظه با استفاده از دو گرمکن نیم‌دایره‌ای در دیواره‌ی پایینی مطالعه کردند. نتایج بدست‌آمده نشان داد که مومنتوم المان‌های سیال با افزایش عدد هارتمن کاهش می‌یابد؛ و این یعنی اعمال میدان مغناطیسی و تقویت آن منجر به کاهش انتقال حرارت خواهد شد. سلیم افندی گیل و همکاران [۳۴] انتقال حرارت و جریان نانوسیال داخل یک حفره‌ی زاویه‌دار با افق را تحت تاثیر میدان مغناطیسی بررسی کردند. ایشان علاوه بر گزارش تغییرات عدد ناسلت، تغییرات آنتروپی را نیز ارائه نموده‌اند.

همانطورکه اشاره گردید، حفره‌ها با هندسه‌های گوناگون کاربردهای مختلفی در سیستم‌های تهویه مطبوع، انرژی‌های تجدیدپذیر، مبدل‌های حرارتی و غیره دارد و به دلیل عملکرد حرارتی ضعیف سیالات معمولی، استفاده از نانوسیالات موجب بهبود عملکرد حرارتی داخل این حفره‌ها می‌گردد. بدیهی است که بررسی هرگونه هندسه و یا امکان دیگری که موجب بهبود عملکرد حرارتی و یا سیالاتی داخل حفره‌ها گردد، دارای اهمیت خواهد بود. با بررسی‌های فراوانی که نویسندگان این مقاله انجام داده‌اند، تاکنون تحقیقی درباره‌ی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات به صورت دوفازی در حفره‌های ربع دایره و یا قطاع دایره تحت تاثیر اثرات مگنتوهیدرودینامیک صورت نگرفته است. در مقاله‌ی حاضر، بررسی پدیده‌های فوق به همراه یک ناحیه‌ی متخلخل، که می‌تواند بخشی از یک لایه‌ی کامپوزیت باشد، انجام گرفته است.

۲-مدلسازی ریاضی و تعریف مسئله

در این مقاله، جریان تراکم‌ناپذیر، پایا و دو بعدی بر اثر جابجایی طبیعی در داخل یک محفظه ی دایروی گرم‌شده از کف که بر روی دیواره ی گرم آن یک لای ه‌ی متخلخل نصب گردیده، بررسی شده است. هندسه ی مسئله ی مورد نظر به همراه شرایط مرزی در شکل ۱ ارائه گردیده است. شعاع محفظه ی دایروی مورد نظر بوده و شرایط مرزی در این مسئله که هندسه ی آن به صورت یک چهارم دایره می‌باشد، به صورت دمای گرم در کف محفظه و دمای سرد در دیوار ه‌ی سمت چپ آن می‌باشد و همچنین کمان حفره به صورت آدیاباتیک می‌باشد. بایستی توجه کرد که مقادیر دمای گرم و سرد بگونه‌ای فرض می‌شود که سیال تغییر فاز نداده، بتوان از تغییرات خواص فیزیکی (به‌غیر از چگالی) سیال پایه نسبت به دما صرفنظر



شکل ۱: هندسه و شرایط مرزی مسئله

Fig. 1.Geometry and boundary conditions

نموده و همینطور پایداری نانوسیال کاهش نیابد. محفظه حاوی نانوسیال Fe_3O_4 – آب بوده و همچنین یک لایه‌ی متخلخل مطابق شکل با ضخامت بی بعد در کف محفظه چسبیده به دیواره‌ی گرم قرار دارد. فرض می‌شود که سطح نانوذرات با سرفوکتانت پوشش داده شده که مانع ته‌نشینی آن‌ها در دیواره‌ی جامد ناحیه‌ی متخلخل و یا چسبیدن آن‌ها به یکدیگر می‌شود [۳۵, ۳۶]. لازم به ذکر است که وجود و عدم وجود این لایه و همچنین ضخامت بی‌بعد آن جزء پارامتر های کنترلی مسئله و متغیر می‌باشند. در ناحیه‌ی متخلخل، تعادل حرارتی محلی فرض شده و از رابطه‌ی توسعه یافته‌ی دارسی (فورچهایمر-برینکمن) استفاده شده است. شار مغناطیسی یکنواخت B با زاویه‌ی γ به میدان سیال القاء می‌شود که منجر به اعمال نیروی لورنتس (نیروی مگنتوهیدرودینامیک) بر المان ها ی سیال می‌گردد. قطر نانوذرات Fe_3O_4، ۱۰ نانومتر و عدد پرانتل سیال پایه برابر ۶/۹۷ در نظر گرفته شده است. تمامی خواص نانوسیال به غیر از چگالی ثابت در نظر گرفته شده و فرض می‌شود که تغییرات چگالی نیز تنها تابعی از دما بوده و از رابطه‌ی بوزینسک پیروی می‌کند. از طرف دیگر، با استفاده از مدل بونجیورنو توزیع نانوذرات داخل محفظه محاسبه شده است.

معادلات حاکم بر مسئله شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی در ناحیه‌ی نانوسیال و در ناحیه‌ی متخلخل می‌باشد. همچنین معادله‌ی بونجیورنو داخل ناحیه‌ی نانوسیال و متخلخل به منظور محاسبه‌ی توزیع نانوذرات با معادلات اساسی کوپل شده است [۳۷]:

۲-۱- ناحیه‌ی نانو سیال

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \qquad (۱)$$

معادلات مومنتوم در جهت‌های X و Y:

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}\left(U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial U}{\partial Y}\right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \Pr\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right)\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} - Ha^2 \Pr\left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f}\right)\left(B_y^2 U - B_x B_y V\right) \qquad (۲)$$

معادله‌ی بقاء انرژی:

$$\left(U\frac{\partial \theta}{\partial X} + V\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right) = A\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right) + N_b\left(\frac{\partial \phi}{\partial X}\frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \phi}{\partial Y}\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right) + N_t\left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)^2\right] \qquad (۴)$$

معادله‌ی توزیع نانوذرات:

$$(U\frac{\partial\phi}{\partial X}+V\frac{\partial\phi}{\partial Y})=\frac{1}{Le}(\frac{\partial^2\phi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial Y^2})+\frac{N_t}{LeN_b}(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}) \quad (۵)$$

۲-۲- ناحیه‌ی متخلخل:

معادله‌ی پیوستگی:

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \quad (۶)$$

معادلات مومنتوم به ترتیب در جهت‌های X و Y:

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}\frac{1}{\varepsilon^2}(U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y})=-\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{\Pr}{\varepsilon}(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2})\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}-\frac{\Pr}{Da}U\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}\right)-\frac{F}{\sqrt{Da}}|V|U-Ha^2\Pr\left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f}\right)(B_y{}^2U-B_xB_yV) \quad (۷)$$

$$\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}\frac{1}{\varepsilon^2}(U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y})=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{\Pr}{\varepsilon}(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2})\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}-\frac{\Pr}{Da}V\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f}\right)-\frac{F}{\sqrt{Da}}|V|V-Ha^2\Pr\left(\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f}\right)(B_x{}^2V-B_xB_yU)+Ra\Pr\left(\frac{\beta_{nf}}{\beta_f}\right)\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_f}\right)\theta \quad (۸)$$

معادله‌ی بقاء انرژی:

$$B(U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y})=\frac{k_{eff}}{k_{nf}}(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2})+N_b(\frac{\partial\phi}{\partial X}\frac{\partial\theta}{\partial X}+\frac{\partial\phi}{\partial Y}\frac{\partial\theta}{\partial Y})+N_t\left[(\frac{\partial\theta}{\partial X})^2+(\frac{\partial\theta}{\partial Y})^2\right] \quad (۹)$$

معادله‌ی توزیع نانوذرات:

$$(U\frac{\partial\phi}{\partial X}+V\frac{\partial\phi}{\partial Y})=\frac{\varepsilon}{Le}(\frac{\partial^2\phi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\phi}{\partial Y^2})+\frac{N_t\varepsilon}{LeN_b}(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}) \quad (۱۰)$$

در معادلات فوق F، ضریب درگ فورچهایمر می‌باشد که به صورت ($F=1.75/\sqrt{150\varepsilon^3}$) تعریف می‌شود. همینطور ضریب هدایت موثر متخلخل به صورت $k_{eff}=\varepsilon k_f+(1-\varepsilon)k_s$ تعریف شده و پارامترهای زیر برای استخراج معادلات بی‌بعد فوق تعریف شده‌اند:

$$X=\frac{x}{L}\quad Y=\frac{y}{L}\quad U=\frac{uH}{\alpha_f}\quad V=\frac{vH}{\alpha_f}\quad P=\frac{p}{\rho_f\left(\frac{\alpha_f}{L}\right)}\quad \theta=\frac{(T-T_H)}{(T_H-T_c)} \quad (۱۱)$$

$$Ra=\frac{g\beta_f\Delta TH^3}{\alpha_f\nu_f}\quad \phi=\frac{c}{c_0}$$

$$N_b=\frac{D_T\Delta T}{\alpha_{nf}T_c}\quad Le=\frac{\alpha_{nf}}{D_B}\quad Da=\frac{K}{H^2}$$

$$B=\frac{\varepsilon(\rho c_p)_{nf}+(1-\varepsilon)(\rho c_p)_s}{\varepsilon(\rho c_p)_f+(1-\varepsilon)(\rho c_p)_s}$$

$$A=\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right)\left(\frac{(\rho c_p)_f}{(\rho c_p)_{nf}}\right)$$

روابط زیر برای بدست‌آوردن خواص نانوسیال بعد از حل معادلات (۵) و (۱۰) و بدست‌آوردن توزیع نانوذرات داخل میدان مورد استفاده قرارگرفته‌اند:

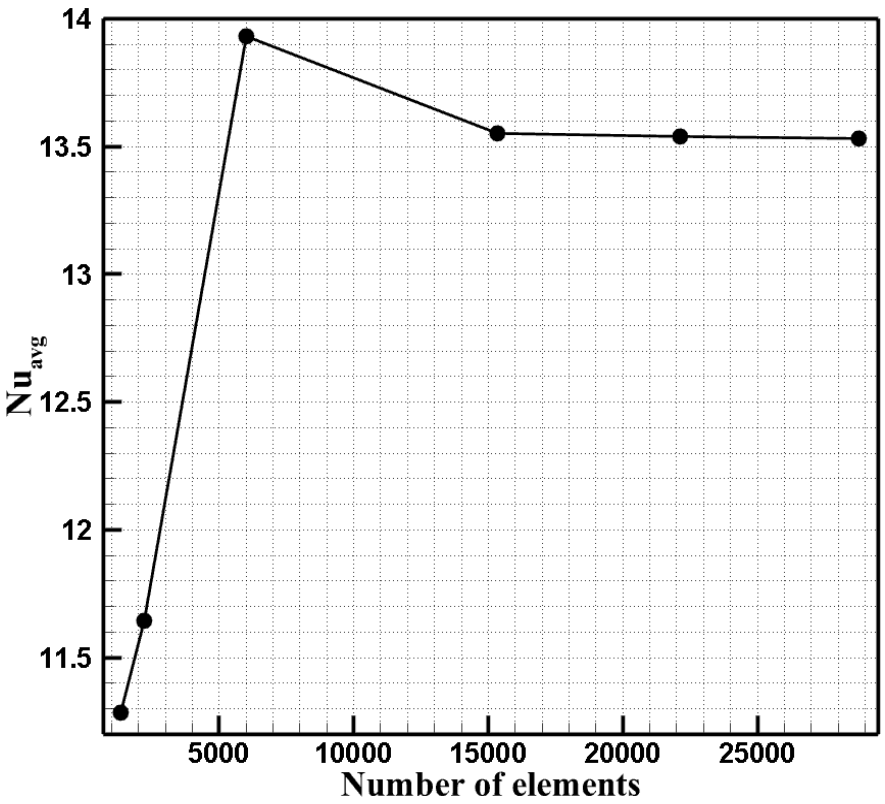
$$\rho_{nf} = (1-c)\rho_f + c\rho_p$$
$$(\rho c_p)_{nf} = (1-c)(\rho c_p)_f + c(\rho c_p)_p$$
$$(\rho\beta_p)_{nf} = (1-c)(\rho\beta)_f + c(\rho\beta)_p$$
$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-c)^{2.5}} \qquad (۱۲)$$
$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{-2(k_f - k_p)c + 2k_f + k_p}{(k_f - k_p)c + 2k_f + k_p}$$

۳-۲- شرایط مرزی

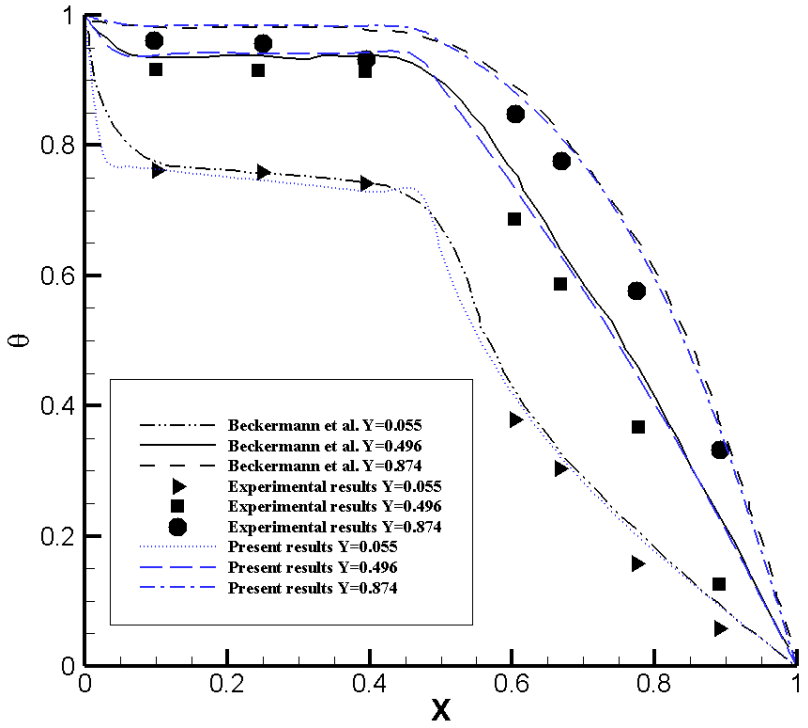
با فرض پیوسته‌بودن سرعت‌ها و گرادیان آن‌ها و همینطور دما در سطح تماس ناحیه‌ی نانوسیال و متخلخل می‌توان شرایط مرزی را در سطح مشترک نانوسیال و محیط متخلخل نوشت. همینطور می‌توان پیوستگی توزیع نانوذرات را در ناحیه‌ی نانوسیال و تیغه درنظرگرفت، چراکه از هرگونه ته‌نشینی نانوذرات در محیط متخلخل صرفنظر می‌شود. بنابراین در سطح مشترک نانوسیال و تیغه شرایط مرزی زیر را خواهیم داشت:

$$U_{Nanofluid} = U_{porous} \quad , \quad V_{Nanofluid} = V_{porous} \qquad (۱۳)$$
$$\left.\frac{\partial U}{\partial n}\right|_{fluid} = \frac{1}{\varepsilon}\left.\frac{\partial U}{\partial n}\right|_{porous} \quad , \quad \left.\frac{\partial V}{\partial n}\right|_{fluid} = \frac{1}{\varepsilon}\left.\frac{\partial V}{\partial n}\right|_{porous}$$
$$\theta_{Nanofluid} = \theta_{porous} \quad , \quad \phi_{fluid} = \phi_{porous}$$
$$\left.\frac{\partial \phi}{\partial n}\right|_{fluid} = \left.\frac{\partial \phi}{\partial n}\right|_{porous}$$

در دیواره‌ها نیز اصل عدم لغزش حاکم بوده و در دیواره‌های عمودی انتقال انرژی صورت گرفته ولیکن در دیواره‌های افقی گرادیان دما برابر صفر خواهد بود. لازم بذکر است که در مورد شرایط مرزی معادله‌ی توزیع نانوذرات بر روی دیواره‌ها، بایستی مقدار شار جرمی نانوذرات بر روی دیواره‌ها برابر صفر باشد.

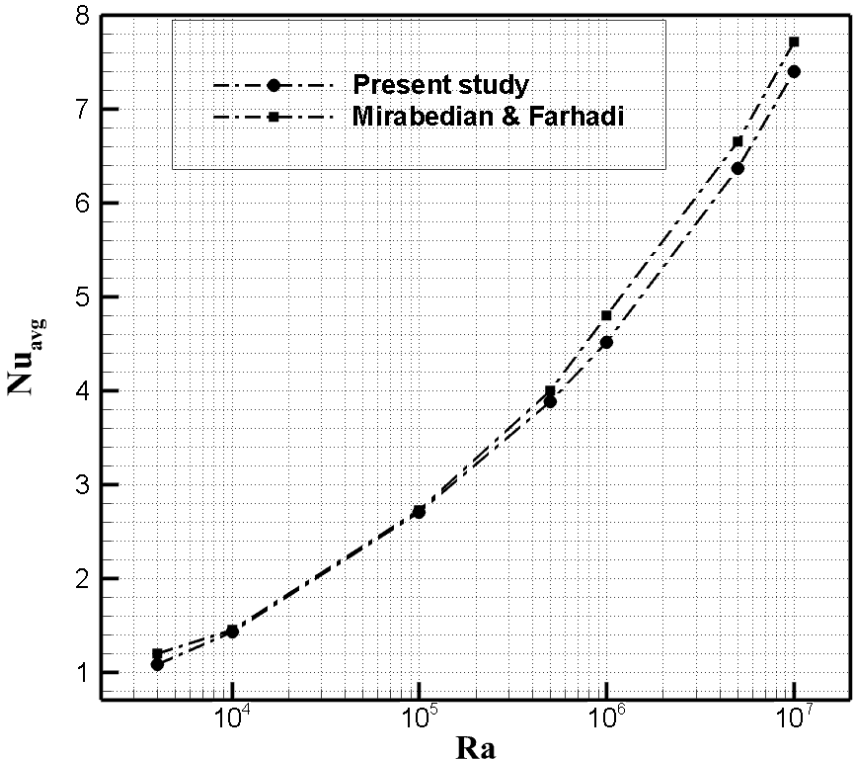


شکل ۲: مقدار ناسلت متوسط بر حسب تعداد المان‌های مش و با فرضیات:
Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30, γ =45, keff=10
Fig. 2. Average Nusselt number according to the number of mesh elements considering Ra=1E5, Da=5E-5 Ha=30, γ =45, keff=10



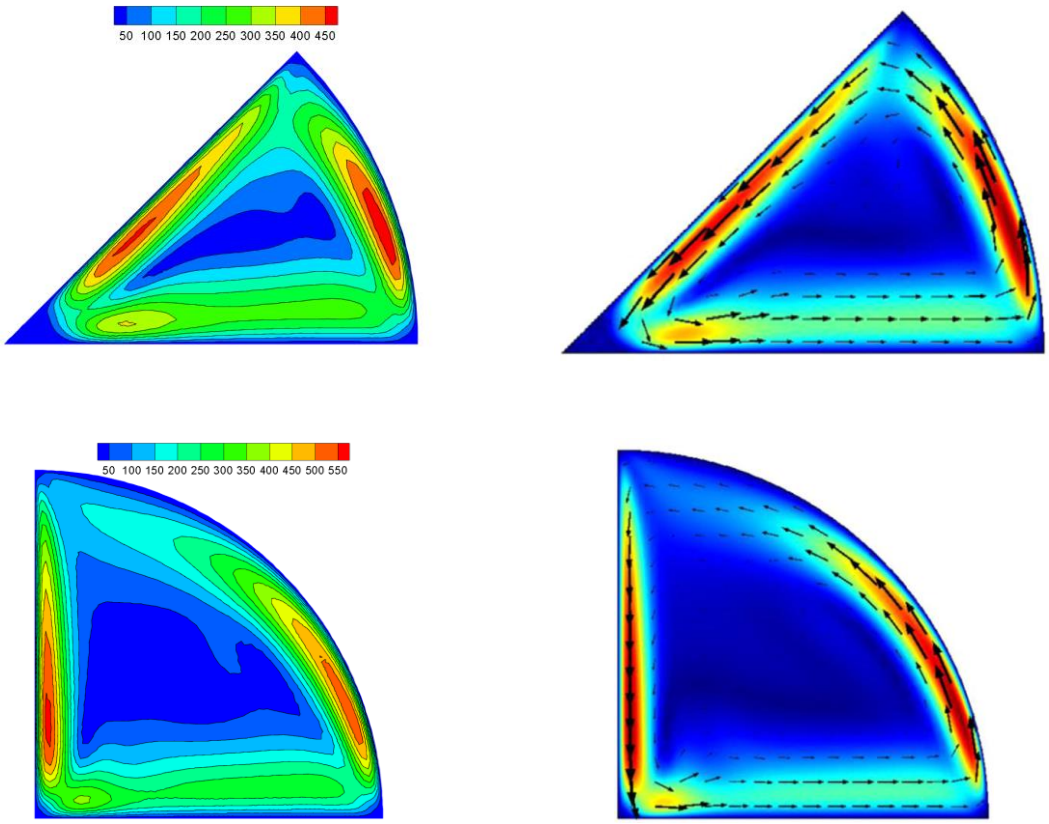
شکل ۳: مقایسه‌ی نتایج دمای بی‌بعد کد حاضر با نتایج بکرمن و همکاران [۳۸]

Fig. 3. Comparison the dimensionless results of the present code with the results of Beckerman et al. [38]



شکل ۴: مقایسه‌ی نتایج عدد ناسلت در اعداد رایلی مختلف مطالعه‌ی حاضر با نتایج میرعابدیان و فرهادی [۲۹]

Fig. 4. Comparison of Nusselt number in different Rayleigh s between the present study and those of Mirabedian and Farhadi ‘s [29]



شکل ۵: مقایسه‌ی نتایج کد حاضر (سمت چپ) تاثیر زاویه‌ی قطاع بر روی کانتور سرعت در داخل محفظه در مقایسه با نتایج میرعابدیان و فرهادی [۲۹] (سمت راست)

Fig. 5. Comparison of the results of present code (left side) the effect of angle of enclosure on the velocity contour (inside the cavity with results of Mirabedian and Farhadi (right side

بنابراین شرایط مرزی بر روی دیواره‌های حفره برای هر دو محیط نانوسیال و متخلخل به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} &U(0,Y)=V(0,Y)=0, \quad \theta(0,Y)=1 \\ &\theta(\sqrt{X^2+Y^2}=1)=0, \quad N_b \left.\frac{\partial\phi}{\partial X}\right|_{\sqrt{X^2+Y^2}=1} \\ &+N_t \left.\frac{\partial\phi}{\partial X}\right|_{\sqrt{X^2+Y^2}=1}=0 \\ &U(\sqrt{X^2+Y^2}=1)=V(\sqrt{X^2+Y^2}=1)=0 \\ &U(X,0)=V(X,0)=0, \quad \frac{\partial\phi(X,0)}{\partial Y}=\frac{\partial\phi(X,1)}{\partial Y} \end{aligned} \tag{۱۴}$$

۳- اعتبارسنجی و استقلال نتایج از مش

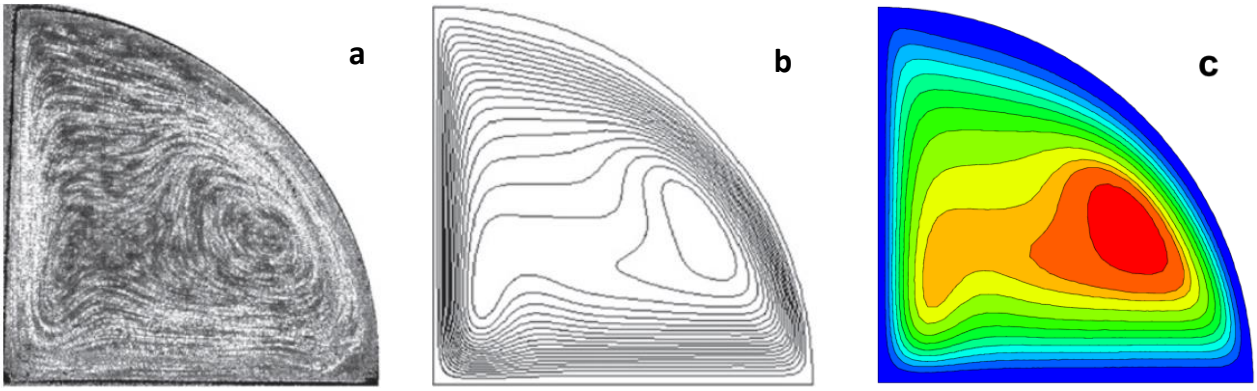
روش باقی‌مانده‌های وزنی گالرکین بر مبنای المان محدود برای حل معادلات کوپل حاکم مورد استفاده قرار گرفته است. تصحیح متغیرهای میدانی محاسبه شده و حداقل‌نمودن آن‌ها به وسیله‌ی توابع وزنی انجام می‌گیرد:

$$\int_{\Omega} wf(x)R\,d\omega=0 \tag{۱۵}$$

که در آن wf، R، ω و Ω به ترتیب متغیر مکانی، باقی‌مانده، تابع وزنی و کل دامنه می‌باشد. با استفاده از روش باقی‌مانده، مشتقات جزئی حاکم به معادلات انتگرالی تبدیل گردیده و با استفاده از روش تکراری نیوتن- رفسون حل می‌شوند. خطای عددی برای هر متغیر میدانی بایستی شرط زیر را ارضاء نماید:

$$\left|\frac{\Gamma^{n+1}-\Gamma^{n}}{\Gamma^{n+1}}\right|<10^{-5} \tag{۱۶}$$

که در آن n نشان‌دهنده‌ی هر گام می‌باشد. از المان محدود لاگرانژی به روش ۱P - ۲P برای گسسته‌سازی مولفه‌های سرعت و فشار



شکل ۶: مقایسه‌ی خطوط جریان در محفظه‌ی دایروی در (a) مطالعات آزمایشگاهی و (b) شبیه‌سازی عددی انجام‌گرفته توسط آیدین و یسیلوز [۳۹] و (c) مطالعه‌ی حاضر

Fig. 6. Comparison of stream lines in a circular enclosure in (a) laboratory studies (b) Numerical simulation performed by Aydin and Yesiloz [39] and (c) present study

استفاده شده و یک شبکه‌ی نامنظم مثلثی به منظور مش‌بندی دامنه استفاده گردیده است. این شبکه در نزدیکی دیواره‌ها به منظور محاسبه‌ی گرادیان‌های شدیدتر، دارای تراکم بیشتری می‌باشد.

تمامی شبیه‌سازی‌های ارائه‌شده در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار کامسول نسخه ۵,۴ انجام گرفته است. بدین ترتیب که با درنظرگرفتن حدس اولیه، معادلات (۹)-(۱) به همراه شرایط مرزی آن حل شده و نتایج آن به منظور بدست‌آوردن توزیع نانوذرات ذخیره می‌گردد. پس از بدست‌آمدن توزیع اولیه‌ی نانوذرات از طریق حل معادله‌ی (۱۰) به همراه شرایط مرزی، معادلات (۱۲) حل شده و خواص فیزیکی نانوسیال در هر المان محاسباتی می‌شود. گام اول با مقایسه‌ی اختلاف نتایج با مقدار تلرانس مورد قبول خاتمه یافته و در صورت عدم ارضاء شرایط همگرایی، نتایج گام اول به عنوان حدس اولیه‌ی گام دوم در نظر گرفته می‌شود. حل این مسئله بر روی رایانه‌ای با رم ۸ گیگ انجام شده و هر شبیه‌سازی در حدود ۲۱۰۰ ثانیه زمان نیاز دارد. برای ترسیم نتایج نیز از نرم‌افزار تک پلات ۳۶۰ استفاده گردیده است.

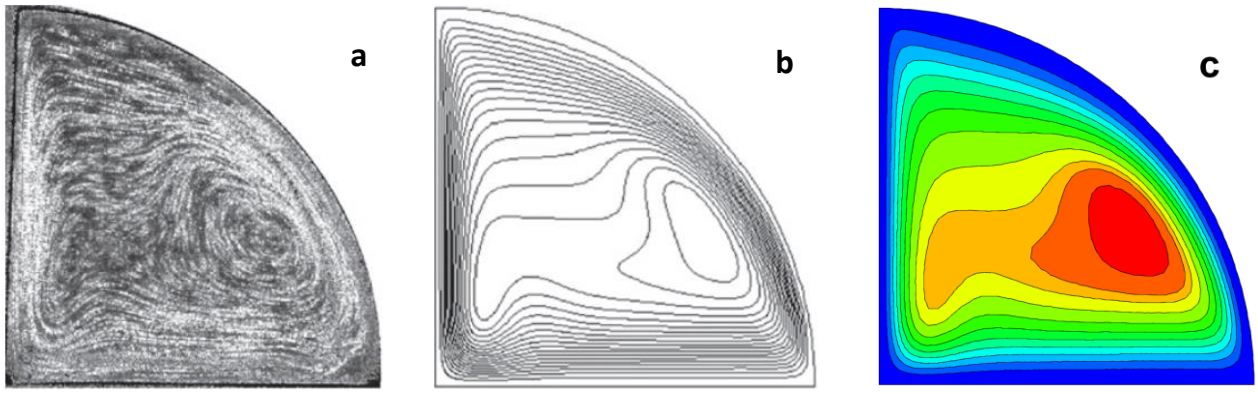
۳-۱- استقلال نتایج از مش

در این مسئله برای تایید صحت شبیه‌سازی انجام‌شده، ابتدا عدم وابستگی این تحلیل به اندازه‌ی مش بررسی شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مسئله در شش اندازه‌ی المان مختلف و در شرایط کاملاً یکسان بررسی شده است که مطابق آن، اختلاف عدد ناسلت میانگین محاسبه‌شده با ۱۵۳۶۰ المان و ۲۸۹۰۰ مش تنها در حدود ۰/۰۳% می‌باشد. بنابراین با ۱۵۳۶۰ المان عدم وابستگی نتایج شبیه‌سازی به اندازه‌ی المان‌ها بدست می‌آید. به منظور صرفه‌جویی در زمان محاسبات و همینطور رسیدن به دقت قابل قبول در نتایج، این تعداد المان در تمامی نتایج این مقاله در نظر گرفته شده است.

۳-۲- اعتبارسنجی نتایج

به منظور بررسی صحت محاسبات انجام‌گرفته در این کار، عملکرد حرارتی و سیالاتی سیال داخل یک حفره‌ی مربعی و حفره‌ی قطاعی شبیه‌سازی شده و با نتایج دیگران مقایسه و مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا مسئله‌ی بکرمن و همکاران [۳۸] که یک حفره‌ی مربعی بوده و نصف آن محیط متخلخل می‌باشد، شبیه‌سازی شده است. نتایج با فرض $Da=۷/۳۵۴$، $Pr=۶/۹۷$ ، $Ra=۰/۰۲۸\times۱۰^{۷}$ و $\varepsilon=۰/۳۶$ استخراج شده و مقایسه‌ی دمای بی‌بعد در ارتفاع‌های بی‌بعد مختلف حاصل از کد حاضر با نتایج تجربی و عددی در شکل ۳ ارائه گردیده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که اختلاف مابین نتایج محاسبه‌شده از طریق کد حاضر و نتایج ارائه‌شده توسط بکرمن و همکاران حداکثر ۲٪ بوده که نشان‌دهنده‌ی تطابق بسیار خوبی بین نتایج عددی حاضر و نتایج تجربی و عددی بکرمن و همکاران می‌باشد.

همچنین صحت نتایج شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی در قطاع دایروی به کمک نتایج میرعابدیان و فرهادی [۲۹] بررسی شده است. شبیه‌سازی مطالعه‌ی صورت‌گرفته توسط میرعابدیان و فرهادی، در قطاع با زاویه‌ی مرکزی ۹۰ درجه و در اعداد رایلی مختلف



شکل ۷: مقایسه‌ی خطوط درصد حجمی ثابت نانوذرات مابین نتایج عددی کد حاضر(سمت راست) و نتایج ارائه شده توسط طهماسبی و همکاران [۴۰] (سمت چپ) با شرایط:
Pr=5 and Nb=6-10 ،Nt=1e-6،Ra=1e4 ،Da=1e-3 Le=1000,

Fig. 7. Comparison of nanoparticle iso-concentration lines between the present numerical results (right side) and the results provided by Tahmasebi et al. [40[(left side) with the assumptions of
Pr=5 and Nb=6-10 ،Nt=1e-6،Ra=1e4 ،Da=1e-3 Le=1000,

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آهن

Table 1. Thermo-physical properties of water and iron oxide

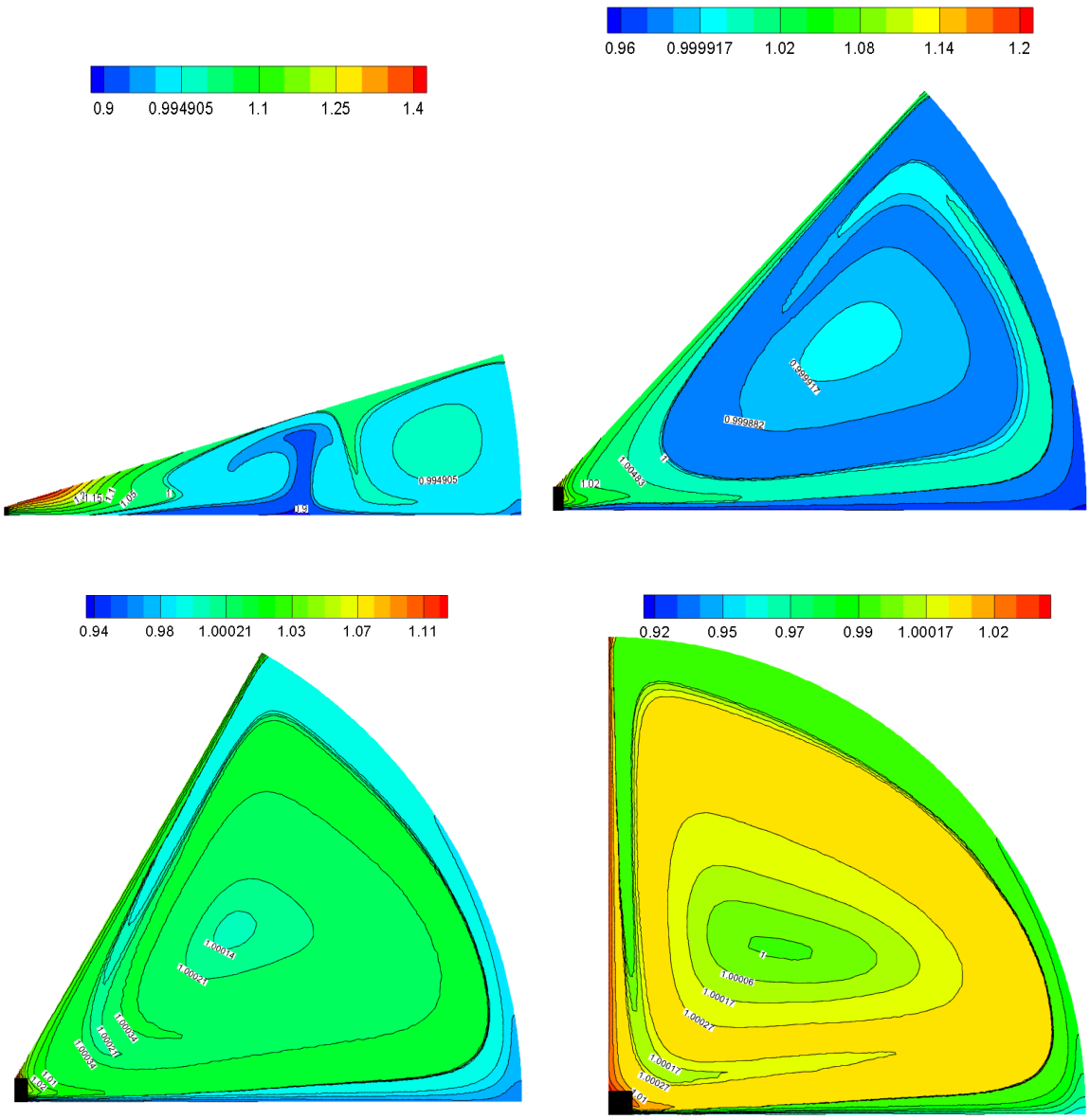
	σ $(\Omega.m)^{-1}$	d_p (nm)	k (W/m.K)	C_p (J/kg.K)	ρ (kg/m^3)
آب خالص	۰/۰۵	_	۰/۶۱۳	۴۱۷۹	۹۹۷/۱
Fe_3O_4	۲۵۰۰۰	۱۰	۶	۶۷۰	۵۲۰۰

در شکل ۴ نمایش داده شده است و طبق این شکل و با توجه به اینکه حداکثر اختلاف مابین نتایج ۸% می‌باشد، تطابق مابین نتایج به وضوح تایید می‌شود.

به منظور مقایسه‌ی آشکارتر نتایج شبیه‌سازی و نتایج پیشین، کانتورهای سرعت جریان جابجایی آزاد بدست‌آمده توسط کد حاضر در قطاع با زوایای مختلف با نتایج بدست‌آمده از مطالعات میرعابدیان و فرهادی [۲۹] در شرایط ذکرشده در شکل ۵ مقایسه گردیده است. طبق این شکل، هماهنگی محل تشکیل سرعت‌های حداکثر و ساختار جریان در هر دو شبیه‌سازی مشاهده می‌گردد.

از طرف دیگر، خطوط جریان بدست‌آمده از مطالعات آزمایشگاهی (a) و تحلیل عددی (b) انجام‌گرفته توسط آیدین و یسیلوز [۳۹] و مطالعه‌ی حاضر در شرایط یکسان شبیه‌سازی، در شکل ۶ ارائه گردیده است. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، این مقایسه نیز صحت نتایج شبیه‌سازی کد مورد استفاده در تحلیل جریان جابجایی آزاد را تایید می‌کند.

در نهایت به منظور بررسی صحت نتایج مدل‌سازی توزیع نانوذرات در دامنه‌ی محاسباتی توسط کد حاضر، مسئله‌ی ارائه‌شده توسط طهماسبی و همکاران [۴۰] با استفاده از کد حاضر شبیه‌سازی شده و مقایسه‌ای ما بین نتایج توزیع نانوذرات انجام گرفته است. انتقال حرارت و جریان سیال نانوسیال داخل یک حفره‌ی مربعی در مسئله‌ی طهماسبی و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره‌ی سمت چپ حفره در دمای گرم و دیواره‌ی سمت راست در دمای سرد ثابت نگه داشته شده و در نزدیکی دیواره‌ی گرم یک لایه‌ی جامد و در همسایگی آن یک لایه‌ی متخلخل قرار گرفته است. شکل ۷ مقایسه‌ی



شکل ۸: توزیع نانوذرات در داخل محفظه بر حسب زاویه‌ی قطاع. با شرایط: Ha=30, Ra=5E6, Da=5E-5, =10, Le=100

Fig. 8. Distribution of nanoparticles inside the cavity according to the angle of enclosure considering Ha=30, Ra=5E6, Da=5E-5, =10, Le=100

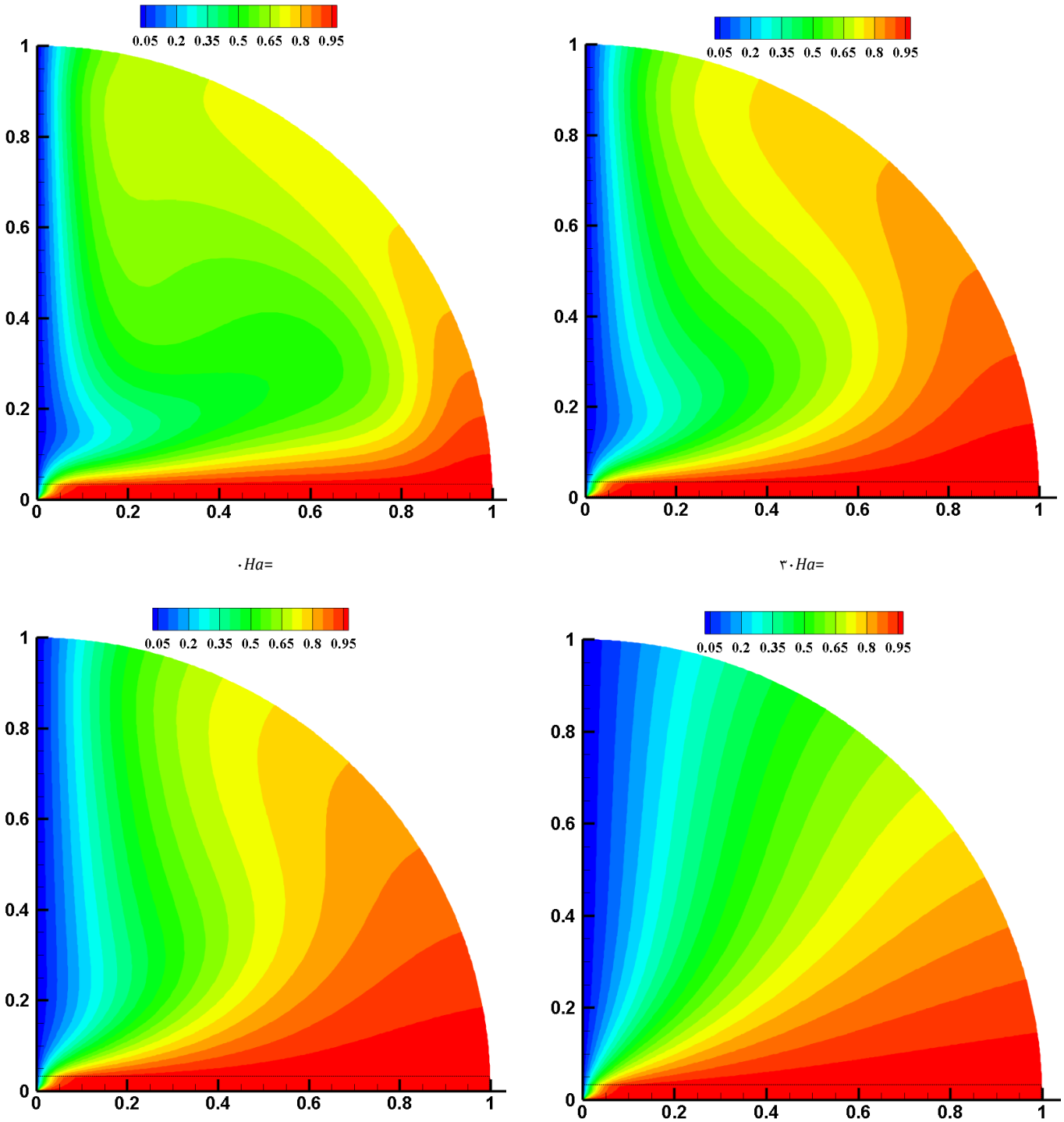
مابین نتایج را نشان می‌دهد و همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، تطابق بسیار خوبی مابین نتایج توزیع نانوذرات داخل حفره وجود دارد.

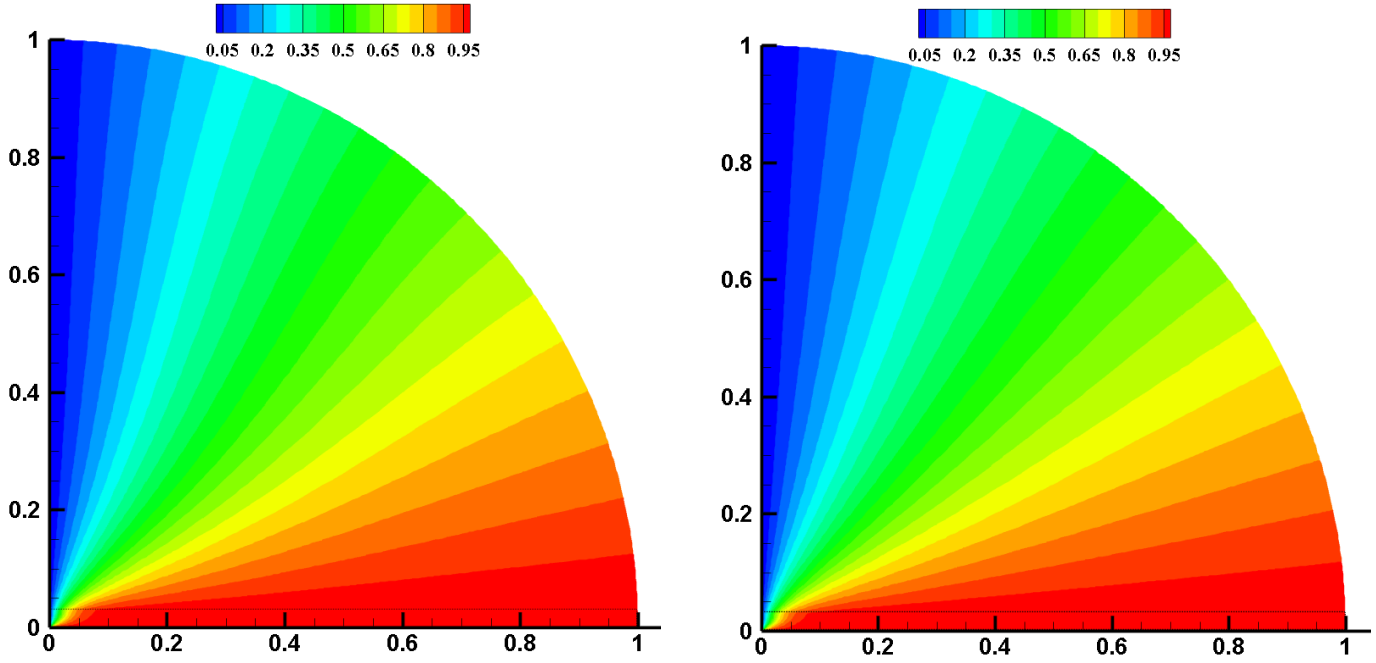
۴- نتایج و بحث

هدف این مقاله، بررسی جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال داخل قطاع دایروی تحت تاثیر نیروی لورنتس (نیروی مگنتوهیدرودینامیک) به صورت دوفازی می‌باشد. داخل قطاع پر از نانوسیال آب Fe_3O_4 می‌باشد. خواص مورد استفاده آب و اکسید آهن در جدول ۱ ارائه گردیده است. عمق محفظه‌ی مورد نظر به حدی بزرگ در نظر گرفته شده که بتوان نتایج را به صورت دو بعدی بررسی نمود. پارامترهای کنترلی درنظرگرفته‌شده در این مسئله شامل عدد دارسی، عدد هارتمن، عدد رایلی، زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی، ضریب هدایت حرارتی لایه‌ی متخلخل، ضخامت آن و

زاویه‌ی مرکزی محفظه می‌باشد. در تمامی شبیه‌سازی‌ها، عدد پرانتل و درصد حجمی نانوذرات ثابت درنظرگرفته‌شده و از روش بونجیورنو برای تحلیل توزیع نانوذرات در داخل محفظه استفاده شده است. لازم بذکر می‌باشد که تمامی شبیه‌سازی‌های این با شرایط: k_{eff} =۱۰، Ha=۳۰، Ra=۵×۱۰^۶، Da=۵×۱۰^۵، Le=۱۰۰، Nb=۱۰^-۶ و Nt=۲/۵×۱۰^-۴ انجام گرفته، مگر آنکه خلاف آن ذکر شده باشد.

توزیع نانوذرات داخل محفظه در شکل ۸ ارائه گردیده است. به منظور بررسی تاثیر زاویه‌ی قطاع بر توزیع نانوذرات، زوایای ۱۵-۹۰ درجه قطاع در نظر گرفته شده است. تمامی نتایج نشانگر آن است که در اثر خاصیت ترموفورسیس، درصد حجمی نانوذرات در نزدیکی





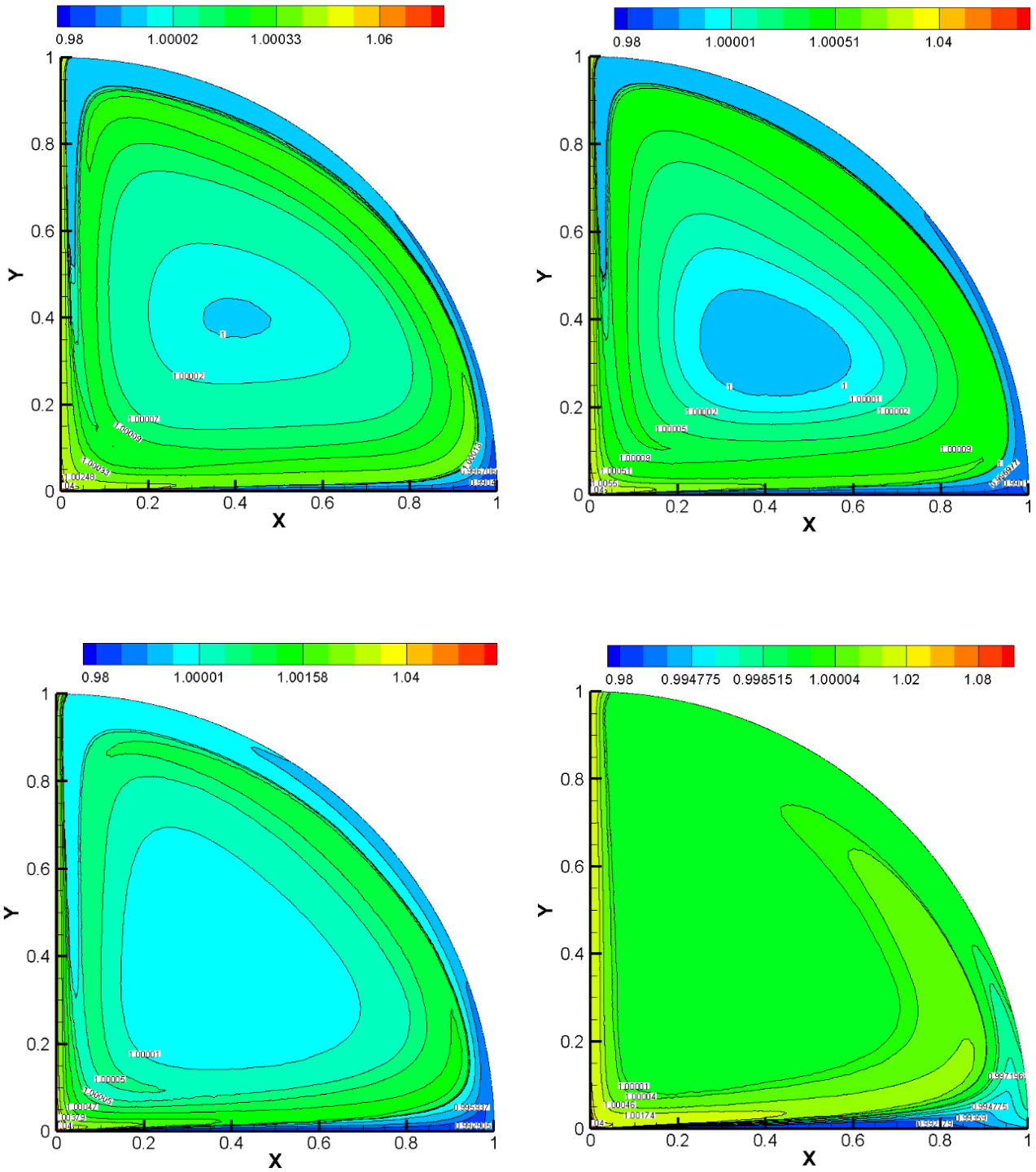
شکل ۹: کانتورهای هم‌دما داخل محفظه بر حسب Ha. با شرایط:Ra=1E5, Da=5E-5,γ=30 keff=10

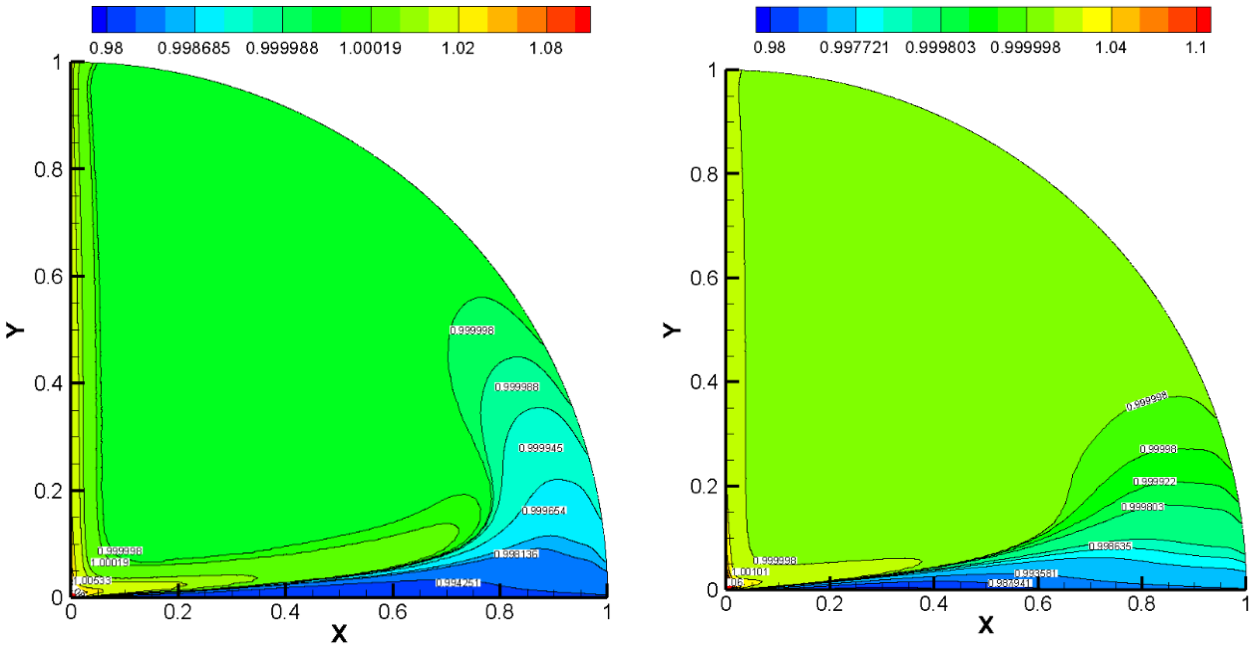
Fig. 9. Isothermal contours in the cavity according to Hartmann number with conditions of Ra=1E5, Da=5E-5,γ=30 keff=10

سطوح گرم دارای کمترین مقدار می‌باشد. از طرف دیگر در نزدیکی سطوح سرد تجمع نانوذرات قابل مشاهده می‌باشد. طبق خطوط درصد حجمی ثابت، لایه‌ی مرزی غلظتیِ نازکی با گرادیان شدید غلظت در نزدیکی دیواره‌ی گرم و دیواره‌ی سرد تشکیل می‌گردد. حال آنکه توزیع نانوذرات در مرکز حفره تقریبا یکنواخت است. دلیل تشکیل یک لایه‌ی مرزی غلظتیِ نازک، بزرگ‌بودن عدد لوئیس (نسبت پخش حرارتی به ضریب پخش براونی) می‌باشد. ضریب پخش براونی نانوذرات در مقایسه با ضریب پخش حرارتی بسیار کوچک می‌باشد که منجربه بزرگ‌بودن عدد لوئیس می‌گردد. با توجه به پخش حرارتی و پخش نانوذرات، دو نوع لایه‌ی مرزی در نزدیکی دیواره تشکیل می‌گردد که پخش حرارتی معیاری از ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی و پخش نانوذرات معیاری از ضخامت لایه‌ی مرزی غلظتی می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان عدد لوئیس را نسبت ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی به غلظتی دانست. از آنجائیکه لایه‌ی مرزی حرارتی تقریبا ثابت بوده و تابعی از لایه‌ی مرزی هیدرولیکی و نیروی شناوری می‌باشد، به علت بزرگ‌بودن عدد لوئیس، ضخامت لایه‌ی مرزی غلظتی بسیار کمتر خواهد بود. با توجه به اینکه اندازه کمیت پخش نانوذرات در مرکز محفظه (دور از سطوح گرم و سرد) دارای کمترین مقدار است، مقدار درصد حجمی بی‌بعد (در زوایای قطاع بزرگ) در مرکز برابر یک می‌باشد. با این وجود، در زاویه‌ی قطاع کوچک (۱۵ درجه)، به علت گردایان دمایی بالاتر، تغییرات توزیع نانوذرات قابل ملاحظه می‌باشد. خاطرنشان می‌شود که در اثر جابجایی سیال داخل محفظه، نانوذرات نیز در جهت خطوط جریان در داخل محفظه توزیع می‌یابند. علاوه بر این طبق این شکل، خطوط درصد حجمی ثابت نانوذرت در قطاع‌های بزرگتر بر روی خطوط جریان گردابه‌ی اصلی گسترش یافته با این وجود در زاویه‌ی ۱۵ درجه، بر روی دو گردابه‌ی قدرتمند ایجادشده تجمع می‌کنند.

تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر روی خطوط هم‌دما بر حسب اعداد هارتمن مختلف $۰\leq Ha\leq ۲۰۰$ در شکل ۹ ارائه گردیده است. مطابق این شکل، با افزایش عدد هارتمن، مومنتوم جریان سیال کاهش می‌یابد که موجب کاهش ترم پخش حرارتی در محفظه

می‌گردد. در اعداد هارتمن پایین، خطوط هم‌دما شکل منحنی داشته و نشان‌دهنده‌ی پخش حرارتی در اثر جابجایی المان‌های سیال می‌باشد. در این شرایط سهم ترم جابجایی در مقابل هدایت حرارتی چشمگیر می‌باشد. با این وجود، در اثر نیروی لورنتس بیشتر (اعداد هارتمن بزرگتر) انحنای خطوط هم‌دما کاهش یافته و خطوط مستقیم شعاعی مشاهده می‌شود. تغییر انحنای خطوط هم‌دما در اثر تضعیف گردابه‌های داخل حفره می‌باشد که با اعمال اثر مگنتوهیدرودینامیک به وجود می‌آید. با تضعیف این گردابه‌ها، ضخامت لایه‌ی مرزی حرارتی بر روی دیواره‌ها افزایش یافته و موجب غلبه‌ی هدایت حرارتی بر ترم جابجایی می‌شود. چراکه اعمال نیروی لورنتس موجب کاهش



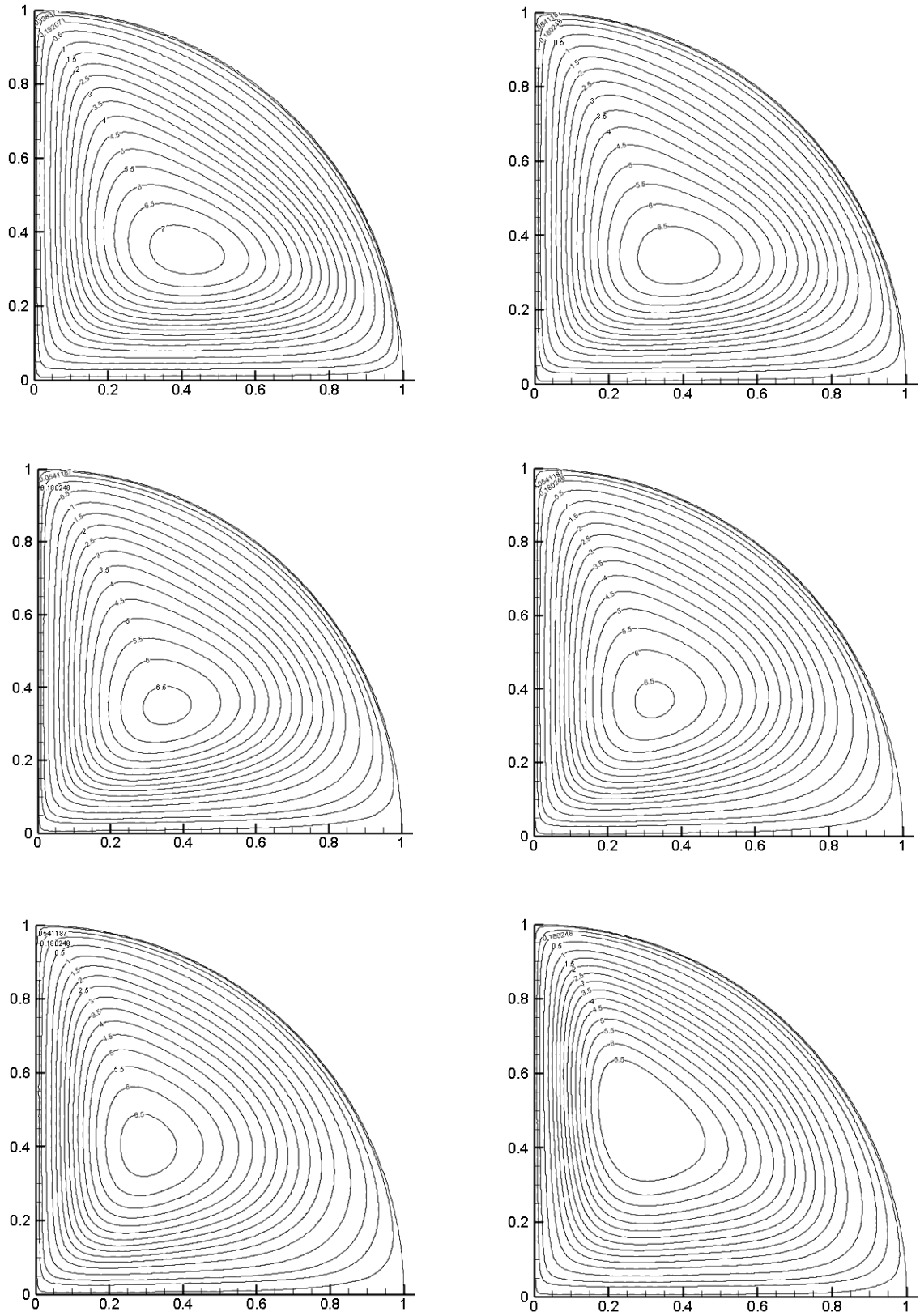


شکل ۱۰: توزیع نانوذرات در داخل محفظه بر حسب عدد هارتمن با شرایط: Ra=1E5, Da=5E-5, =10, Le=100

Fig. 10. Distribution of nanoparticles inside the cavity according to Hartmann number with conditions of Ra=1E5, Da=5E-5, =10, Le=100

مومنتوم المان‌های سیال شده و جابجایی حرارتی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب اعمال نیروی لورنتس بالاتر، موجب کاهش در عدد ناسلت بر روی دیواره‌ی گرم می‌گردد. لازم به ذکر است که بزرگی اثر ترموفورسیس در جریان‌هایی که مکانیزم هدایت حرارتی در آن غالب است، چشمگیر می‌باشد. بنابراین در اعداد هارتمن بزرگتر که گردابه‌ها تضعیف شده و تاثیر هدایت حرارتی افزایش می‌یابد، گرادیان غلظت نانوذرات در نزدیکی دیواره‌ها افزایش می‌یابد.

با توجه به اینکه توزیع نانوذرات مغناطیسی (با توجه به معادلات (۵) و (۱۰)) تحت تاثیر پارامترهایی مانند حرکت براونی، ترموفورسیس و ترم جابجایی است. اعمال نیروی لورنتس بر میدان سیال منجر به کاهش مومنتوم المان‌های سیال شده و نرخ ترم جابجایی میدان را در جهت اعمال نیرو تضعیف می‌کند. از طرف دیگر، تحت تاثیر اثر مگنتوهیدرودینامیک میزان جابجایی حرارتی در میدان سیال کاهش یافته و موجب غالب‌بودن مکانیزم هدایت در انتقال حرارت می‌شود. بنابراین با افزایش عدد هارتمن تمرکز بیشتر نانوذرات درناحیه‌ی سرد و کاهش غلظت بر روی دیواره‌ی گرم رخ می‌دهد. بایستی توجه کرد که تغییر کسر حجمی نانوذرات در یک ناحیه از میدان نانو سیال موجب تغییر خواص ترموفیزیکی شامل چگالی، لزجت، ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه می‌شود (طبق معادلات ۱۲). بدین ترتیب رفتار هیدرولیکی و حرارتی نانوسیال تابعی از کسر حجمی نانوذرات می‌باشد، چراکه اگر لزجت در نزدیکی دیواره کاهش یابد، موجب کاهش ضخامت لایه‌ی مرزی هیدرولیکی خواهد شد و همینطور در صورت افزایش ضریب هدایت حرارتی در نزدیکی دیواره، میزان شار حرارتی افزایش می‌یابد. توزیع نانوذرات داخل حفره‌ی ۹۰ درجه بر حسب اعداد هارتمن مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، در صورتی که میدان مغناطیسی به سیال اعمال نشود Ha=۰ ، توزیع نانوذرات تقریبا در تمامی نقاط هندسی حفره انجام می‌گیرد و نانوذرات انتقال‌یافته از نزدیکی دیواره‌ی گرم، در کل میدان پخش می‌شود. با افزایش عدد هارتمن به ۳۰، به علت کاهش ترم جابجایی و همینطور کاهش انحنای خطوط هم‌دما، توزیع نانوذرات در بخش‌های مرکزی حفره کاهش می‌یابد. طبق این شکل، تمرکز نانوذرات در نزدیکی سطح سرد در اعداد هارتمن بیشتر، شدیدتر می‌شود بگونه‌ای که در Ha=۲۰۰ تقریبا تمامی نقاط مرکزی حفره دارای درصد حجمی بی بعد ۱ بوده و درصد حجمی بزرگی



شکل ۱۱: خطوط جریان داخل محفظه بر حسب زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی. با شرایط:

Ha=30, Ra=1E5, Da=5E-5, A) γ=0 B) γ=15 C) γ=30 D) γ=45 E) γ=60 D) γ=90

Fig. 11. The stream lines inside the cavity according to the angle of application of the magnetic field with conditions

Ha=30, Ra=1E5, Da=5E-5, A) γ=0 B) γ=15 C) γ=30 D) γ=45 E) γ=60 D) γ=90

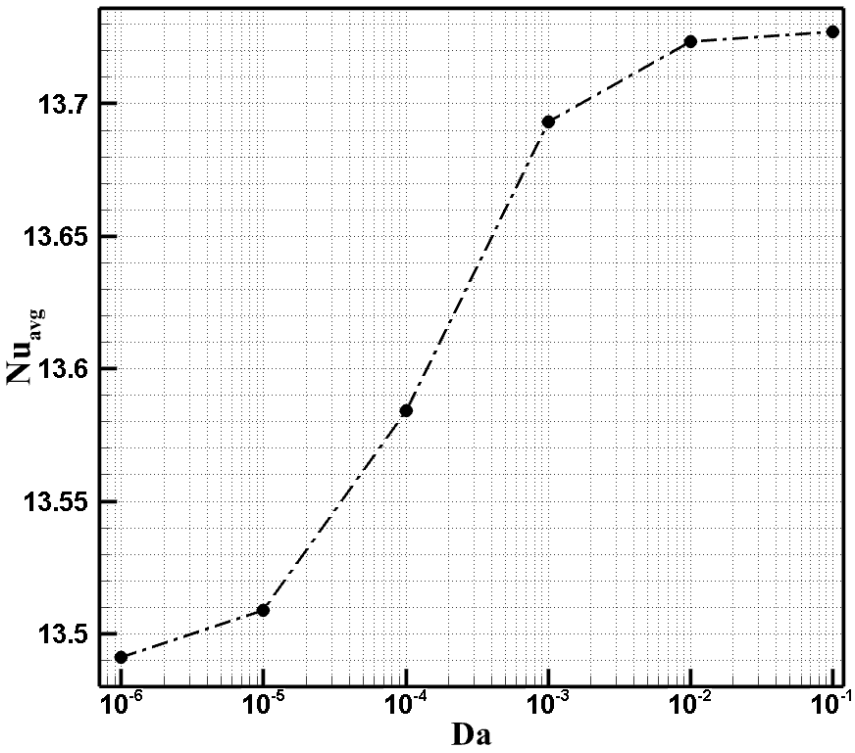
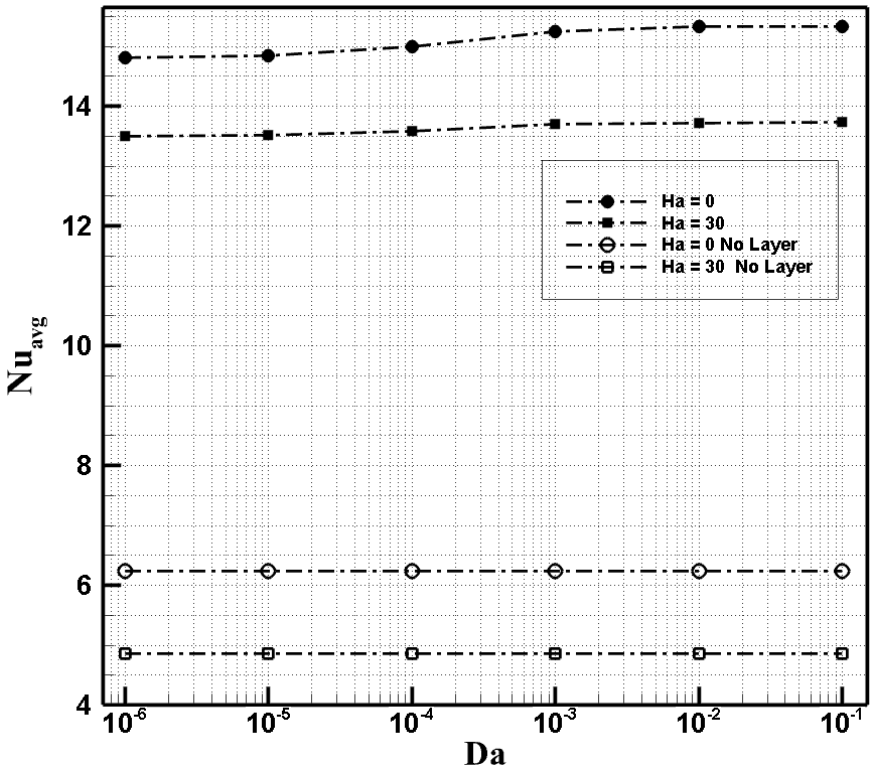


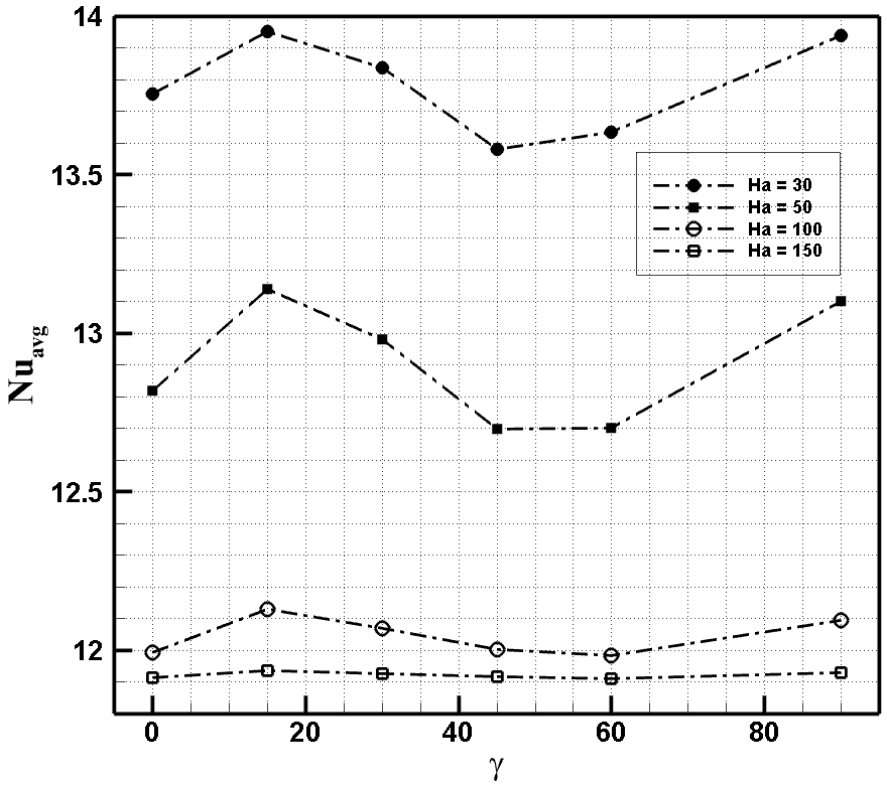
Fig. 12. Variations in the average Nusselt number by Darcy number considering Ra=1E5, Ha=30, γ=45, keff=10

شکل ۱۲: تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد دارسی و با فرضیات: Ra=1E5, Ha=30, γ=45, keff=10



شکل ۱۳: تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد دارسی در اعداد هارتمن مختلف و بررسی اثر وجود لایه متخلخل و با فرضیات: Ra=1E5, γ=45, keff=10

Fig. 13.Variations in the Nusselt number according to the Darcy number in different Hartmann numbers and investigation the effect of porous layer presence considering Ra=1E5, γ=45, keff=10



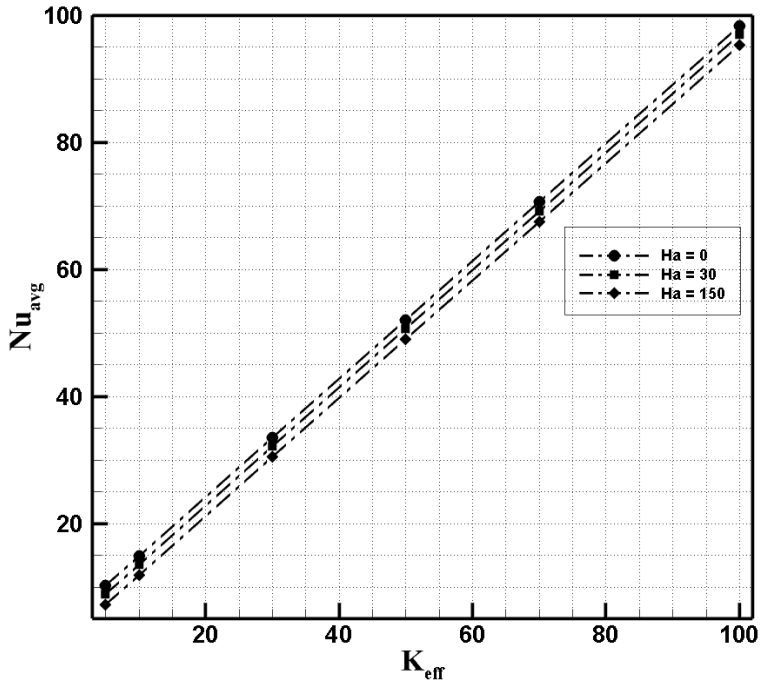
شکل ۱۴: تغییرات عدد ناسلت بر حسب زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی و با فرضیات: Ra=1E5, Da=5E-5, keff=10

Fig. 14. Variations in the Nusselt number according to the magnetic field applying angle and Ra=1E5, Da=5E-5, keff=10

از نانوذرات منتقل‌شده از دیواره‌ی گرم، بر روی دیواره‌ی سرد قرار گرفته‌اند. لازم بذکر است در صورتی که میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت درنظرگرفته‌نشود، بایستی اثرات گرادیان میدان مغناطیسی در شار جرمی، به صورت ترم مگنتوفورسیس، در معادلات (۵) و (۱۰) اعمال گردد.

به منظور بررسی دقیق‌تر تاثیر نیروی لورنتس و زاویه‌ی اعمال آن بر جابجایی المان‌های سیال، خطوط جریان داخل محفظه بر حسب زاویه‌ی اعمال نیروی مغناطیسی در شکل ۱۱ ارائه شده است. طبق معادلات ارائه‌شده، نیروی لورنتس در جهت عمود بر میدان مغناطیسی و در جهت خلاف حرکت المان‌های سیال وارد می‌شود بگونه‌ای که موجب کاهش مومنتوم حرکتی المان‌ها می‌گردد. در شکل ۱۱ نشان داده شده است که در صورت اعمال میدان مغناطیسی در جهت محور x، نیروی لورنتس در جهت y به المان‌های سیال نیروی کاهنده‌ی سرعت وارد می‌کند که موجب تضعیف گردابه‌های کشیده‌شده در جهت y می‌شود. بنابراین در این حالت گردابه‌های کشیده‌شده در جهت x دارای توان بیشتری خواهند بود (شکل A). با تغییر زاویه‌ی γ از صفر به سمت ۹۰ درجه، جهت نیروی لورنتس وارده بر المان‌های سیال نیز تغییر کرده و از جهت y به جهت x تغییر می‌یابد. بدین ترتیب، گردابه‌های ایجادشده داخل محفظه در جهت x تضعیف شده و کشیدگی آن‌ها در جهت y خواهد بود. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در حالت γ=۰ گسترش گردابه‌ها در جهت x و در حالت γ=۹۰ گسترش آن‌ها در جهت y می‌باشد. علاوه براینکه بیشترین مقدار تابع جریان در زاویه‌ی اعمال ۱۵ درجه شکل می‌گیرد.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد دارسی در شکل ۱۲ ارائه شده است. مقدار افت فشار و نتیجتاً کاهش مومنتوم المان‌های سیال در عدد دارسی پایین که موجب نفوذپذیری کم محیط متخلخل می‌شود، موجب کاهش جابجایی المان‌های سیال و در نتیجه عدد ناسلت متوسط نیز می‌گردد. لازم بذکر است که قدرت جریان چرخشی داخل حفره با کاهش عدد دارسی تضعیف می‌گردد. این رفتار به این دلیل است که مقاومت هیدرولیکی ناحیه‌ی متخلخل افزایش یافته و افت فشار بیشتری به میدان سیال اعمال می‌شود. همانطور که در نمودار نشان داده شده است با افزایش عدد دارسی و در نتیجه افزایش نفوذپذیری محیط متخلخل و نزدیک‌شدن رفتار آن به میدان سیال، مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. بایستی توجه کرد که وجود لایه‌ی



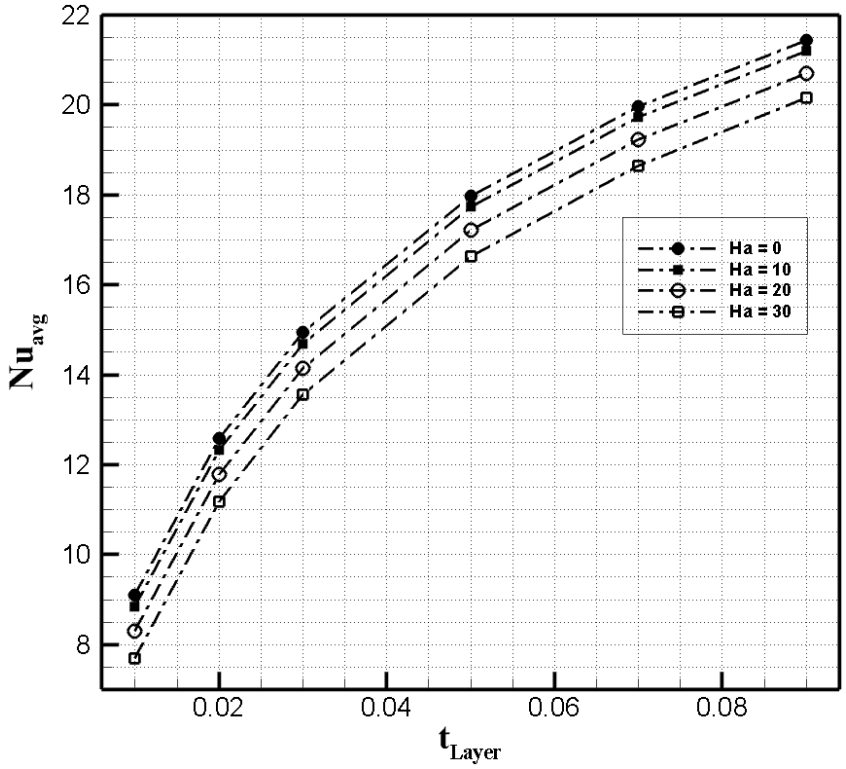
شکل ۱۵: تغییرات عدد ناسلت بر حسب ضریب هدایت حرارتی فین متخلخل در اعداد هارتمن مختلف و با فرضیات Ra=1E5, Da=5E-5, γ=45

Fig. 15. Variations in the Nusselt number according to the porous fin conduction heat transfer in different Hartmann numbers considering: Ra=1E5, Da=5E-5, γ=45

متخلخل در شرایطی موجب بهبود عملکرد حرارتی جریان سیال می‌گردد که مومنتوم جریان پایین بوده و وجود ناحیه‌ی متخلخل با ضریب هدایت حرارتی بالاتر، انتقال حرارت به صورت هدایت را افزایش دهد. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده در اعداد دارسی مختلف در شرایط ذکرشده نشان می‌دهد که با تغییر عدد دارسی از $Da=10^{-6}$ تا $Da=10^{-1}$ تغییر عدد ناسلت متوسط چشمگیر می‌باشد. با این وجود در اعداد دارسی بسیار پایین، ناسلت متوسط تقریبا مستقل از میزان نفوذپذیری لایه‌ی متخلخل می‌باشد.

علاوه‌بر وجود ناحیه‌ی متخلخل، اعمال نیروی لورنتس نیز موجب تغییر در الگوی جریان و انتقال حرارت داخل محفظه می‌گردد. در شکل ۱۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد دارسی در اعداد هارتمن مختلف ارائه شده و همچنین اثر وجود یا عدم وجود فین بر افزایش انتقال حرارت به صورت تابعی از عدد دارسی و عدد هارتمن بررسی شده است. در صورت عدم وجود لایه‌ی متخلخل و همینطور با فرض Ha=۰ عدد ناسلت متوسط در حدود ۶/۳۵ می‌باشد که در صورت اعمال میدان مغناطیسی و فرض Ha=۳۰، این عدد به حدود ۴/۸۱ کاهش می‌یابد. این مقایسه، کاهش انتقال حرارت در اثر ترم جابجایی را در داخل محفظه آشکار می‌کند. نتایج بدست‌آمده از تحقیقات پیشین نظیر مطالعات انجام‌گرفته توسط کاکرانتاس و همکاران [۳۰] ، روادیا و همکاران [۳۲] و اوزتوپ و همکاران [۳۳] نیز موید این موضوع می‌باشند. از طرف دیگر، در اثر استفاده از لایه‌ی متخلخل و با فرض Ha=۰ عدد ناسلت متوسط افزایش محسوسی داشته و بیشترین مقدار آن در $Da=10^{-1}$ مشاهده می‌شود. مقایسه‌ی عدد ناسلت متوسط با و بدون لایه‌ی متخلخل نشان‌دهنده‌ی افزایش بیش از دوبرابری انتقال حرارت می‌باشد. طبق این شکل، تاثیر جاگذاری لایه‌ی متخلخل در افزایش انتقال حرارت به وضوح آشکار می‌شود. در حالت Ha=۳۰ با لایه‌ی متخلخل نیز، عدد ناسلت رشد بیش از سه برابری با فرض Da=۰/۱ خواهد داشت. این نتیجه علاوه بر این که نقش لایه‌ی متخلخل را در بهبود عملکرد حرارتی نشان می‌دهد، تایید می‌کند که نواحی متخلخل در مومنتوم‌های پایین سیال نقش پررنگتری داشته و عملکرد حرارتی را به مراتب بهبود می‌دهند.

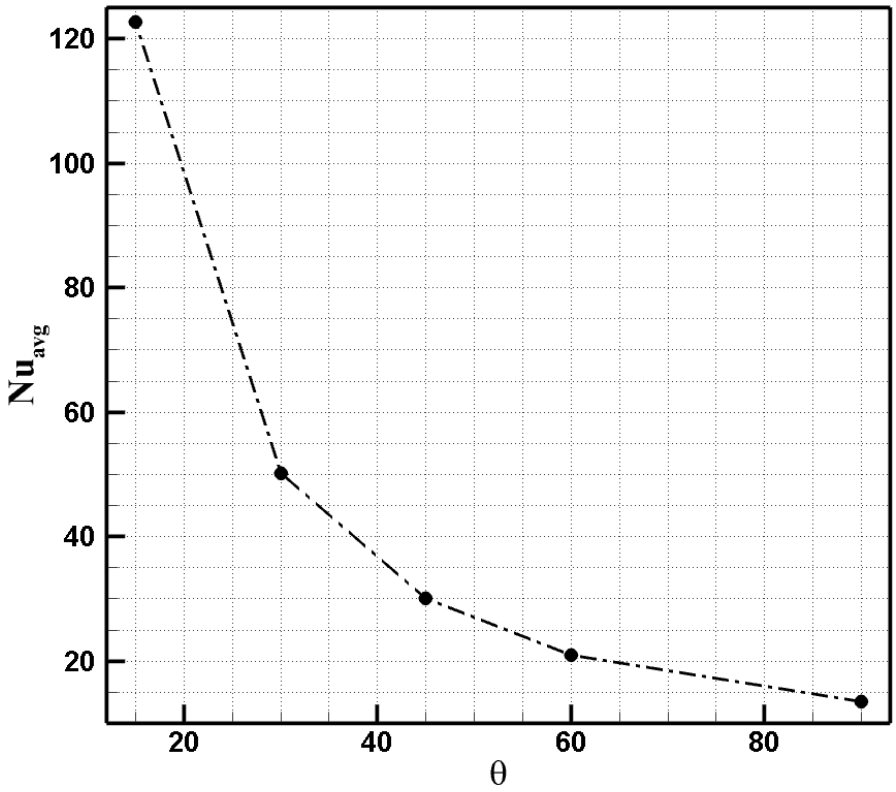
علاوه بر شدت میدان مغناطیسی، زاویه‌ی اعمال میدان γ نیز پارامتر تاثیرگذاری بر رفتار حرارتی- سیالاتی نانوسیال می‌باشد. زاویه‌ی گاما برابر صفر نشان‌دهنده‌ی در راستای x بودنِ میدان



شکل ۱۶: تغییرات عدد ناسلت بر حسب ضخامت فین متخلخل در اعداد هارتمن مختلف و با فرضیات:
γ=45, Da=5e5, Ra=1e5 and keff=10
Fig. 16. Variations in Nusselt number according to the porous fin thickness in different Hartmann numbers considering
γ=45, Da=5e5, Ra=1e5 and keff=10

مغناطیسی و زاویه‌ی ۹۰ به مفهوم در راستای محور y بودنِ میدان است. تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی γ و همچنین تاثیر کاهشی عدد هارتمن بر روی انتقال حرارت در شکل ۱۴ ارائه شده است. در صورتی که زاویه‌ی گاما صفر درجه باشد، نیروی لورنتس در جهت y (عمود بر آن) اعمال خواهد شد که موجب تضعیف گردابه‌های توسعه‌یافته در آن جهت می‌گردد ولی تاثیری بر گردابه‌های گسترش‌یافته در جهت x نخواهد داشت. به عبارت دیگر، زاویه‌ی صفر گاما باعث کاهش مومنتوم المان‌های سیال در جهت y می‌شود. از آنجاییکه نیروی شناوری در جهت y اعمال شده و نیروی حجمی وارده بر سیال در این جهت می‌باشد، تقریبا بیشترین عدد ناسلت متوسط در تمامی موارد (مستقل از Ha) در حالت γ=۹۰ اتفاق می‌افتد. چراکه نقشی در تضعیف مومنتوم در جهت y نخواهد داشت. همینطور کمترین مقدار عدد ناسلت متوسط نیز در حدود γ=۴۵ اتفاق می‌افتد. به این دلیل که موجب کاهش تکانه‌ی المان‌های سیال در هر دو جهت x و y می‌گردد. مطابق این شکل بار دیگر، تاثیر نیروی لورنتس بر کاهش عملکرد حرارتی نانوسیال قابل مشاهده است. علاوه بر آن، عملکرد حرارتی در شدت میدان‌های بزرگتر مستقل از زاویه‌ی اعمال میدان عمل کرده و باعث تضعیف شدید گردابه‌ها می‌شود.

مزیت اصلی به‌کاربردن محیط متخلخل بالاتربودن ضریب هدایت حرارتی نسبت به سیال و در نتیجه افزایش انتقال حرارت هدایتی به علت بالارفتن ضریب هدایت حرارتی کل سیستم می‌باشد. بنابراین ضریب هدایت حرارتی لایه‌ی متخلخل تاثیر بسزایی در انتقال حرارت نانوسیال خواهد داشت. در شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب ضریب هدایت حرارت لایه‌ی متخلخل بر روی انتقال حرارت ارائه شده است. در این شکل، تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر ضریب هدایت لایه‌ی متخلخل از ۱۰ به ۱۰۰ در سه عدد هارتمن Ha=۰ (بدون نیروی لورنتس)، Ha=۳۰ و Ha =۱۵۰ بررسی شده است و مشاهده می‌شود که با افزایش ضریب هدایت حرارتی لایه، عدد ناسلت متوسط به طور پیوسته افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود



شکل ۱۷: تغییرات عدد ناسلت بر حسب زاویه‌ی مرکزی حفره و با فرضیات:
Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30,γ=45, γ =10
Fig. 17. Variations in the Nusselt number according to the central angle of cavity considering
Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30,γ=45, γ =10

که در اعداد هارتمن بالاتر و با افزایش نیروی لورنتس، تغییرات عدد ناسلت کمتر می‌شود بگونه‌ای که می‌توان گفت در اعداد هارتمن بالا نتایج به طور تقریبی بر هم منطبق می‌شوند.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب ضخامت لایه‌ی متخلخل در اعداد هارتمن مختلف در شکل ۱۶ ارائه شده است. همانطور که اشاره شد، استفاده از محیط متخلخل منجر به افزایش انتقال حرارت هدایتی می‌گردد. با وجود اینکه افزایش ضخامت لایه‌ی متخلخل موجب افزایش تلفات لزجی می‌شود ولی همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد، با افزایش ضخامت بی‌بعد لایه‌ی متخلخل از ۰/۰۱ تا ۰/۰۹، عدد ناسلت متوسط بطور پیوسته افزایش می‌یابد که این امر با توجه به افزایش کسر حجمی ناحیه‌ی متخلخل در میدان و بالا رفتن ضریب انتقال حرارت هدایتی مجموعه قابل توجیه می‌باشد. ضخامت بالاتر ناحیه‌ی متخلخل موجب ارتباط حرارتی گسترده مابین دامنه‌ی جامد متخلخل و میدان نانوسیال می‌گردد. بنابراین دمای نانوسیال افزایش یافته و اختلاف دمای بین نانوسیال و دیواره‌ی گرم کاهش می‌یابد. این امر موجب کاهش عدد ناسلت متوسط در ضخامت‌های بالاتر ناحیه‌ی متخلخل خواهد شد. از طرف دیگر، در ضخامت‌های بالاتر ناحیه‌ی متخلخل، تضعیف گردابه‌ها در اثر افزایش افت فشار داخل حفره نیز موجب کاهش انتقال حرارت جابجایی خواهد شد. کاهش عدد ناسلت با افزایش عدد هارتمن نیز در این شکل ارائه شده و همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت بدون نیروی لورنتس Ha=0 بیشترین عدد ناسلت رخ می‌دهد.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب زاویه‌ی مرکزی محفظه در شکل ۱۷ ارائه شده است. زاویه‌ی θ برابر ۹۰ درجه نشان‌دهنده‌ی یک ربع دایره است. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود با کاهش زاویه‌ی مرکزی محفظه در اعداد رایلی ثابت، عدد ناسلت متوسط مرتباً افزایش می‌یابد که این امر به واسطه‌ی ایجاد گردابه‌ها با توان بالاتر در زوایای کوچکتر است. تغییر زاویه‌ی قطاع موجب نزدیک و یا دورشدن سطوح گرم و سرد به یکدیگر و همچنین تغییر در فضای تشکیل گردابه‌ها می‌شود. بدیهی است که اگر گردابه‌ای با توان ثابت در فضایی کوچکتر عمل کند باعث ایجاد خطوط جریان با مقدار تابع جریان (مومنتوم) بالاتر خواهد بود. از طرف دیگر با کاهش زاویه‌ی

جدول ۲: بررسی عدد ناسلت متوسط و در سه حالت مختلف بدون فین، فین متخلخل و کاملاً متخلخل و فرضیات: Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30, γ=45 and keff=10

Table 2. Investigation of average and maximum values of Nusselt number in three different cases of: without fin, with porous fin and completely porous considering Ra=1E5, Da=5E-5, Ha=30, γ=45 and keff=10

حالت مورد بررسی	Nu_{avg}	$\lvert\psi\rvert_{max}$
بدون فین	۴/۸۶۳۸	۶/۶۴۹۰
فین‌دار	۱۳/۵۵۳	۶/۶۰۵۰
کاملاً متخلخل	۳۲/۰۱۶	۰/۱۸۴۴۳

مرکزی حفره، تعداد سلول‌های رایلی- بنارد افزایش پیدا کرده و این سلول‌ها می‌تواند موجب افزایش گردش سیال داخل حفره شود. بنابراین لایه‌های سرد و گرم سیال به خوبی با یکدیگر در تماس قرار می‌گیرند. این گردش پیوسته‌ی لایه‌های سیال در نقاطی از حفره که فضای کافی برای گردش گردابه‌ها وجود ندارد، موجب افزایش انتقال حرارت داخل حفره در رایلی ثابت می‌شود.

در جدول ۲ عدد ناسلت متوسط در شرایط یکسان و برای سه حالت بدون فین، فین‌دار و کاملاً متخلخل به دست آمده است و همانطور که مشاهده می‌شود وجود فین متخلخل عامل اثرگذار مثبت در انتقال حرارت بوده و موجب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. همچنین با متخلخل‌کردن محفظه به طور کامل نیز عدد ناسلت متوسط به طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته و از بین سه حالت فوق بیشترین میزان عدد ناسلت را دارا می‌باشد. با این وجود، با متخلخل‌کردن تمام هندسه‌ی مسئله، مومنتوم جریان سیال به شدت کاهش می‌یابد که افت شدید مقدار ψ در محفظه حاکی از آن است.

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله‌ی حاضر جریان سیال و انتقال حرارت نانوسیال داخل یک قطاع با لایه‌ی متخلخل به روش دوفازی تحلیل شده است. علاوه بر آن میدان مغناطیسی یکنواختی با زاویه‌ی متغیر بر میدان سیال اعمال گردیده که موجب ایجاد تاثیرات مگنتوهیدرودینامیک شده است. با بررسی شبیه‌سازی‌های مختلف می‌توان پارامترهای تاثیرگذار در این مسئله را بدست آورد که شامل: زاویه‌ی قطاع (در اعداد هارتمن کوچک)، عدد هارتمن، زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی، ضخامت بی‌بعد لایه‌ی متخلخل و عدد دارسی (در اعداد هارتمن کوچک) و ضریب هدایت حرارتی ناحیه‌ی متخلخل می‌باشند. بررسی نتایج نشان می‌دهد که:

- افزودن نانوذرات به سیال پایه موجب افزایش میزان انتقال حرارت در حفره می‌شود.
- توزیع نانوذرات در نزدیکی دیواره‌ی گرم کاهش و در نزدیکی دیواره‌ی سرد افزایش دارد.
- با کاهش زاویه‌ی قطاع، گردابه‌های قدرتمندی تشکیل می‌شود که باعث ایجاد گرادیان‌های توزیع نانوذرات در داخل محفظه شده و از طرف دیگر انتقال حرارت را افزایش می‌دهد.
- افزایش عدد هارتمن موجب کاهش مومنتوم المان‌های سیال شده و در نتیجه میزان انتقال حرارت را بطور محسوسی کاهش می‌دهد.
- با تغییر زاویه‌ی اعمال میدان مغناطیسی از صفر تا ۹۰ درجه، اثر ترمزی نیروی لورنتس نیز از محور y به محور x تغییر یافته و جهت گسترش گردابه‌های ایجادشده داخل محفظه نیز به صورت معکوس تغییر می‌کند.
- میزان انتقال حرارت تابعی از مقدار عدد دارسی بوده، بگونه ای که با افزایش عدد دارسی از مقدار مشخصی، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد.
- در صورت اعمال نیروی لورنتس، مکانیزم اصلی انتقال حرارت به صورت هدایت خواهد بود.
- در محفظه‌های با سطح مقطع کوچک، وجود سطوح متخلخل میزان انتقال حرارت را کاهش می‌دهد.

فهرست علائم

B	میدان مغناطیسی
B_x, B_y	مولفه‌های میدان مغناطیسی

c_p	گرمای ویژه در فشار ثابت
c	درصد حجمی نانوذرات
Da	عدد دارسی
D_B	ضریب پخش براونی، $\frac{k_B T}{3\pi\mu d_p}$
D_T	ضریب پخش ترموفورسیس، $0.26\frac{k}{2k+k_p}\frac{\mu}{\rho}\phi$
H	ارتفاع حفره
Ha	عدد هارتمن
k	ضریب رسانایی حرارتی
K	نفوذپذیری
t_{Layer}	ضخامت فین متخلخل
Le	عدد لوئیس، $\frac{\alpha_{nf}}{D_B}$
Nu	عدد ناسلت
N_b	فرم بی بعد ترم براونی، $\frac{D_B c_0}{\alpha_f}$
N_t	فرم بی بعد ترم ترموفورسیس، $\frac{D_T \Delta T}{\alpha_{nf} T_c}$
n	راستای عمود بر سطح
P	فشار
Pr	عدد پرانتل
Ra	عدد رایلی
T	دما
U ,V	مولفه‌های بدون بعد سرعت
X ,Y	مولفه‌های بی‌بعد مکان

علائم یونانی

α	نفوذپذیری حرارتی
β	ضریب انبساط حرارتی
γ	زاویه میدان مغناطیسی با افق
ε	تخلخل
θ	دمای بدون بعد
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ν	ویسکوزیته سینماتیکی
ρ	چگالی

زیرنویس‌ها

σ	رسانایی الکتریکی
ϕ	کسر حجمی
ψ	تابع جریان
ave	میانگین
eff	موثر
f	سیال
nf	نانوسیال
s	جامد

مراجع

[1] M. Sheikholeslami, & Rashidi, M. M. , Effect of space dependent magnetic field on free convection of Fe3O4–water nanofluid, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 15-6 (2015) 56.

[2] M.M. Rashidi, Momoniat, E., Ferdows, M., & Basiriparsa, A. , Lie group solution for free convective flow of a nanofluid past a chemically reacting horizontal plate in a porous media, Mathematical Problems in Engineering, , (2014).

[3] F. Garoosi, Jahanshaloo, L., Rashidi, M. M., Badakhsh, A., & Ali, M. E. , Numerical simulation of natural convection of the nanofluid in heat exchangers using a Buongiorno model, Applied Mathematics and Computation, 254 203-183 (2015).

[4] R. Loni, Asli-Areh, E. A., Ghobadian, B., Kasaeian, A. B., Gorjian, S., Najafi, G., & Bellos, E.). Research and review study of solar dish concentrators with different nanofluids and different shapes of cavity receiver: Experimental tests, Renewable Energy, 804-783 (2020) 145.

[5] G. de Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution, International Journal for numerical methods in fluids, 264-249 (1983) 3.

[6] S.O. Giwa, Sharifpur, M., & Meyer, J. P. , Experimental study of thermo-convection performance of hybrid nanofluids of Al2O-3MWCNT/water in a differentially

heated square cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 119072 (2020) 148.

[7] A. Baïri, Zarco-Pernia, E., & De María, J. M. G. , A review on natural convection in enclosures for engineering applications. The particular case of the parallelogrammic diode cavity, Applied Thermal Engineering, (2014) (1)63 322-304.

[8] W. Wu, & Ching, C. Y. , Laminar natural convection in an air-filled square cavity with partitions on the top wall, Heat Transfer Summer Conference collocated with the InterPACK09 and 3rd Energy Sustainability Conferences, (2009, January) 414-399.

[9] X. Shi, & Khodadadi, J. M. , Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated square cavity due to a thin fin on the hot wall, Journal of Heat Transfer, (4)125 634-624 (2003).

[10] S. Sivasankaran, & Kandaswamy, P. K. , Double diffusive convection of water in a rectangular partitioned enclosure with temperature dependent species diffusivity, International Journal of Fluid Mechanics Research, (4)33 2006)).

[11] H.K. Park, Ha, M. Y., Yoon, H. S., Park, Y. G., & Son, C. , A numerical study on natural convection in an inclined square enclosure with a circular cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, 314-295 (2013) 66.

[12] Y.G. Park, Ha, M. Y., & Park, J. , Natural convection in a square enclosure with four circular cylinders positioned at different rectangular locations, International Journal of Heat and Mass Transfer, 511-490 (2015) 81.

[13] Y.G. Park, Ha, M. Y., Choi, C., & Park, J. , Natural convection in a square enclosure with two inner circular cylinders positioned at different vertical locations, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2014) 77 518-501.

[14] Q.X. Wang, Lei, H. Y., Wang, S. X., & Dai, C. S., Natural convection around a pair of hot and cold horizontal microtubes at low Rayleigh numbers, Applied Thermal Engineering, , 119-114 (2014) (1)72.

[15] Y.G. Park, Yoon, H. S., & Ha, M. Y. , Natural convection in square enclosure with hot and cold cylinders at different vertical locations, International Journal of Heat and Mass Transfer, 122-115 (2012) 95.

[16] C.S. Dai, Li, M., Lei, H. Y., & Wang, S. X. , Numerical simulation of natural convection between hot and cold microtubes in a cylinder enclosure, International Journal of Thermal Sciences,, 122-115 (2015) 95.

[17] C. Choi, Jeong, S., Ha, M. Y., & Yoon, H. S. , Effect of a circular cylinder's location on natural convection in a rhombus enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 73-60 (2014) 77.

[18] S.M. Vanaki, Ganesan, P., & Mohammed, H. A. , Numerical study of convective heat transfer of nanofluids: a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54 1239-1212 (2016).

[19] K.H. Solangi, Kazi, S. N., Luhur, M. R., Badarudin, A., Amiri, A., Sadri, R. & Teng, K. H. , A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids, Energy, 1086-1065 (2015) 89.

[20] L.P. Aoki, Schulz, H. E., & Maunsell, M. G. , An MHD Study of the Behavior of an Electrolyte Solution using3D Numerical Simulation and Experimental results, Comsol Conference (2013).

[21] M. Afrand, Karimipour, A., Nadooshan, A. A., & Akbari, M. , The variations of heat transfer and slip velocity of FMWNT-water nano-fluid along the micro-channel in the lack and presence of a magnetic field, Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, -474 (2016) 84 481.

[22] K.M. Isaac, Sen, D., Leventis, N., & Fritsch, I. , Simulation of electrochemical MHD induced flow in a microfluidic cell without channels, 6th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference, (3392 (2011.

[23] A. Karimipour, Nezhad, A. H., D'Orazio, A., Esfe, M. H., Safaei, M. R., & Shirani, E. , Simulation of copper–water nanofluid in a microchannel in slip flow regime using the lattice Boltzmann method, European Journal of Mechanics-B/Fluids, 99-89 (2015) 49.

[24] S.K. Das, Choi, S. U., Yu, W., & Pradeep, T. , Nanofluids: science and technology

John Wiley & Sons, 2007.

natural convection in an enclosure from two semi-circular heaters on the bottom wall., International Journal of Heat and Mass Transfer, 1854-1844 (2012) ,(8-7)55.

[34] F. Selimefendigil, & Öztop, H. F. , Effects of conductive curved partition and magnetic field on natural convection and entropy generation in an inclined cavity filled with nanofluid, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,, 123004 (2020) 540.

[35] D.A. Nield, & Kuznetsov, A. V. , The Cheng–Minkowycz problem for natural convective boundary-layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid., International Journal of Heat and Mass Transfer, -5792 (2009) (26-25)52 5795.

[36] H. Zargartalebi, Noghrehabadi, A., Ghalambaz, M., & Pop, I., Natural convection boundary layer flow over a horizontal plate embedded in a porous medium saturated with a nanofluid: case of variable thermophysical properties, Transport in Porous Media, -153 (2015) (1)107 170.

[37] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids, Journal of heat transfer, 250-240 (2006) (3)128.

[38] C. Beckermann, Ramadhyani, S., & Viskanta, R. , Natural convection flow and heat transfer between a fluid layer and a porous layer inside a rectangular enclosure, Journal of heat transfer, 370-363 (1987) (2)109.

[39] G. Yesiloz, & Aydin, O. (). . , , . Natural convection in an inclined quadrantal cavity heated and cooled on adjacent walls, Experimental Thermal and Fluid Science, 6-35 1176-1169 (2011).

[40] A. Tahmasebi, Mahdavi, M., & Ghalambaz, M., Local thermal nonequilibrium conjugate natural convection heat transfer of nanofluids in a cavity partially filled with porous media using Buongiorno's model, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 276-254 (2018) 4-73.

[25] E.I.J.o.H.a.M.T. Bilgen, Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall., 3505-3493 (2005) 48.

[26] A. Ben-Nakhi, and Ali J. Chamkha. "." International journal of thermal sciences Conjugate natural convection in a square enclosure with inclined thin fin of arbitrary length, 478-467 (2007) 46.

[27] K. Khanafer, AlAmiri, A., & Bull, J., Laminar natural convection heat transfer in a differentially heated cavity with a thin porous fin attached to the hot wall, International Journal of Heat and Mass Transfer, 70-59 (2015) 87.

[28] G.R. Kefayati, Simulation of heat transfer and entropy generation of MHD natural convection of non-Newtonian nanofluid in an enclosure., International Journal of Heat and Mass Transfer, 1089-1066 (2016) 92.

[29] S.M. Mirabedin, & Farhadi, F., Natural convection in circular enclosures heated from below for various central angles, Case Studies in Thermal Engineering, (2016) 8 329-322.

[30] S.C. Kakarantzas, Sarris, I. E., Grecos, A. P., & Vlachos, N. S., Magnetohydrodynamic natural convection in a vertical cylindrical cavity with sinusoidal upper wall temperature, International Journal of Heat and Mass Transfer,, (2-1)52 259-250 (2009).

[31] H.R. Ashorynejad, Mohamad, A. A., & Sheikholeslami, M. , Magnetic field effects on natural convection flow of a nanofluid in a horizontal cylindrical annulus using Lattice Boltzmann method, International Journal of Thermal Sciences, 250-240 (2013) 64.

[32] N. Rudraiah, Barron, R. M., Venkatachalappa, M., & Subbaraya, C. K., Effect of a magnetic field on free convection in a rectangular enclosure, International Journal of Engineering Science, 1084-1075 (1995) (8)33.

[33] H.F. Öztop, Rahman, M. M., Ahsan, A., Hasanuzzaman, M., Saidur, R., Al-Salem, K., & Rahim, N. A. , MHD

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Mobadersani1, F. Tavakkol. Numerical analysis of flow and natural convection heat transfer in a circular enclosure heated from bottom utilizing porous layer. Amirkabir J. Mech Eng., 53(special issue 3) (2021). 1937-1962.

DOI: 10.22060/mej.2020.17242.6546

این صفحه عمداً خالی است