Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(1) (2022) 27-30
DOI: 10.22060/mej.2021.19823.7125

Numerical Analysis of the Effect of Configurations of Double Rotating Cylinders on Heat Transfer Enhancement Hybrid Nanofluid Flow in a Vented Cavity

H. Moayedi*

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT: In this paper, the effect of configurations of rotating cylinders in a vented cavity with inlet and outlet port on the flow field and heat transfer enhancement of forced convection of Al2O3/Cu-water hybrid nanofluid flow in the laminar regime is numerically investigated. In this study, the influence of parameters as configurations of cylinders (A, B, C, and D), as well as the rotational velocity of cylinders (from -10 to +10), Reynolds number (from 100 to 500), and the volume fraction of nanoparticles (from 0.5% to 3%) on the flow field and heat transfer are studied. Results indicate that the average Nusselt number and the Performance Evaluation Index for configuration D are higher than other configurations. Also, it is obvious that by increasing the rotational velocity of cylinders, Reynolds number, and the volume fraction of nanoparticles, the Performance Evaluation Index increases. Also, by rotating the cylinders in the counterclockwise rotation direction with respect to the clockwise rotation direction, the η increases about 1.30. The results show that Al2O3/Cu-water hybrid nanofluid causes heat transfer enhancement compared to the Cu-water nanofluid and it increases the Performance Evaluation Index compared to the Al2O3-water nanofluid.

Review History:

Received: Apr. 06, 2021
Revised: Jun. 23, 2021
Accepted: Jun. 24, 2021
Available Online: Jul. 04, 2021

Keywords:

Numerical analysis
Vented cavity
Hybrid nanofluid
Rotating cylinders
Heat transfer

1- Introduction

Fluid flow and heat transfer in the vented cavity are implemented in a wide range of technological applications in various fields. Costa and Raimundo [1] numerically investigated the effect of rotating cylinders on the mixed convection heat transfer in a cavity. They revealed that increasing the rotational velocity of the cylinder increases the heat transfer rate. On the other hand, hybrid nanofluids are an efficient way to improve heat transfer and thermal performance. Even though numerous studies have been performed on proposing and investigating the cavities with inlet and outlet ports from the position of ports [2], and the number of ports [3] standpoints, less research has been dedicated to using simultaneous rotating cylinders in the cavities with inlet and outlet ports for heat transfer enhancement. One of particular relevance here is the work of Selimefendigil and Öztop [5], who conducted a numerical study on a 2D laminar forced convection heat transfer of hybrid nanofluid flow in a vented cavity with rotating cylinders. They investigated the effects of Reynolds number, nanoparticle volume fraction, rotational velocity, size, horizontal and vertical locations of cylinders on the hydrothermal performance. In this regard, the four novel configurations of rotating cylinders in a vented cavity in the presence of hybrid nanofluid are proposed and then analyzed from a heat transfer enhancement perspective, extending to helping the design of the thermal proposed systems.

2- Geometry

Fig. 1 represents a schematic view of the computational domain used for the present study.

The governing equations of the hybrid nanofluid flow, thermal, and species fields including continuity, momentum energy equations are as follows:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho_{hnf}}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\mu_{hnf}}{\rho_{hnf}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{2}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho_{hnf}}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\mu_{hnf}}{\rho_{hnf}}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{3}$$

*Corresponding author's email: hesam_moayedi@phd.guilan.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.

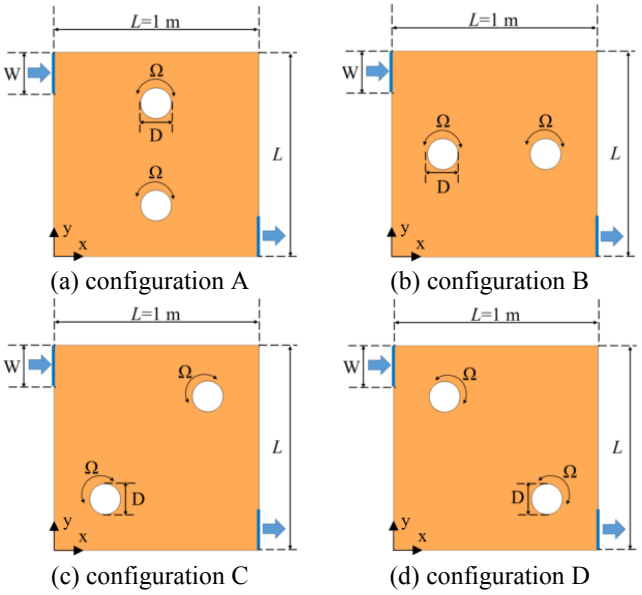


Fig. 1. Schematic view of the computational domain.

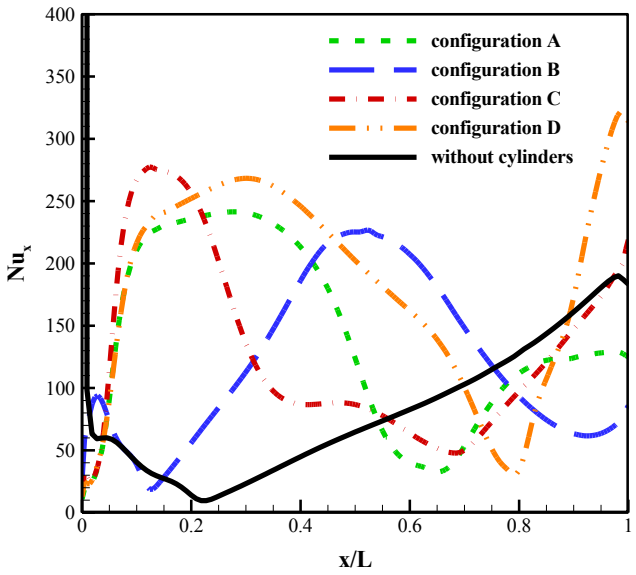


Fig. 2. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the bottom wall of cavity for different configurations (φhnf =0.01, Re=500, Ω=+5)

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{K_{hnf}}{\left(\rho c_P\right)_{hnf}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{4}$$

The thermo-physical properties of hybrid nanofluid are expressed as follows [4]:

$$\rho_{hnf}=\left(1-\varphi_{hnf}\right)\rho_f+\varphi_1\rho_{p1}+\varphi_2\rho_{p2} \tag{5}$$

$$\left(\rho c_P\right)_{hnf}=\left(1-\varphi_{hnf}\right)\left(\rho c_P\right)_f+\varphi_1\left(\rho c_P\right)_{p1}+\varphi_2\left(\rho c_P\right)_{p2} \tag{6}$$

$$\mu_{hnf}=\frac{\mu_f}{\left(1-\varphi_{hnf}\right)^{2.5}} \tag{7}$$

$$K_{hnf}=K_f\left[\frac{\left(\frac{\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2}}{\varphi_{hnf}}\right)+2K_f+2\left(\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2}\right)-2\varphi_{hnf}K_f}{\left(\frac{\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2}}{\varphi_{hnf}}\right)+2K_f-\left(\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2}\right)+\varphi_{hnf}K_f}\right] \tag{8}$$

This study employs the simpleFoam module in the OpenFOAM. Divergence, gradient, and laplacian terms in Eqs. (1) to (4) are discretized separately in OpenFOAM by using proper discretization schemes.

3- Results and Discussion

To express the effect of the configuration of rotating cylinders on the flow field and heat transfer enhancement in a vented cavity, the local Nusselt number for configurations A, B, C, and D are shown in Fig. 2 at φ_{hnf} =0.01, *Re*=500, and Ω=+5. It is clear that changing the configuration cause considerable heat transfer enhancement. Also, it is obvious that the peak value of the Nusselt number for configuration C is higher than others. Moreover, the ratio of the average Nusselt number on the bottom wall of the cavity and performance evaluation criteria for different configurations of rotating cylinders are tabulated in Table 1. According to this table, the results indicated that in presence of rotating cylinders, the η is higher than 1 for all cases, and it is clear that the presence of rotating cylinders is effective on the thermal efficiency of the cavity. It is clear that the average Nusselt number and the Performance Evaluation Index for configuration D are higher than other configurations.

Impacts of rotational velocity on the average Nusselt number and η of configuration D at φ_{hnf} =0.03 and *Re*=250 are also shown in Fig. 3. It can be argued that the behavior of Nu_m/Nu_{m0} and η are nearly the same at different rotational velocities. In addition, the minimum of both parameters occurs in the stationary cylinders cases. It is found that the rotation of the cylinders (clockwise (CW) and counterclockwise (CCW) direction) acts in a way to enhance the average Nusselt number and η. The results show that the CCW rotation direction of the cylinders must be more beneficial than the CW rotation direction.

Table 1. The ratio of average Nusselt number on the bottom wall of cavity and performance evaluation criteria for different configurations of rotating cylinders in the cavity (φhnf =0.01, Re=500, Ω=+5)

Configuration	Nu_m/Nu_{m0}	η
A	1.68	1.62
B	1.46	1.35
C	1.54	1.41
D	2.29	1.83

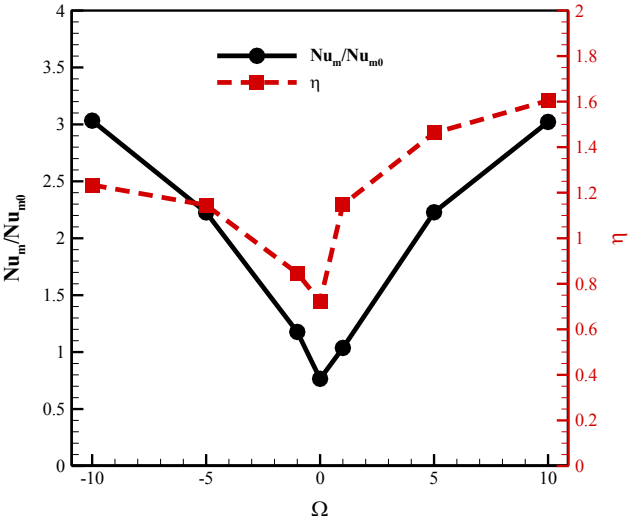


Fig. 3. The ratio of average Nusselt number on the bottom wall of cavity and performance evaluation criteria for the different rotational velocity of rotating cylinders for configuration D (φhnf =0.03, Re=250)

4- Conclusions

In this study, the effect of configurations of two rotating cylinders in a vented cavity in the presence of Al_2O_3/Cu-water hybrid nanofluid flow in a hydraulically laminar regime was numerically investigated. The effects of effectiveness parameters as Reynolds number, rotational velocity, configuration of rotating cylinder, and volume fraction of the nanofluid were studied for evaluation of the heat transfer enhancement. Results indicate that by increasing the rotational velocity of cylinders, Reynolds number, and the volume fraction of nanoparticles, the Performance Evaluation Index increases. Also, by rotating the cylinders in the counterclockwise rotation direction with respect to the clockwise rotation direction, the η increases about 1.30.

References

[1] V. Costa, A. Raimundo, Steady mixed convection in a differentially heated square enclosure with an active rotating circular cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(5-6) (2010) 1208-1219.

[2] L. Koufi, Z. Younsi, Y. Cherif, H. Naji, Numerical investigation of turbulent mixed convection in an open cavity: effect of inlet and outlet openings, International Journal of Thermal Sciences, 116 (2017) 103-117.

[3] S. Balaji, S. Lakshminarayanan, Improved design of microchannel plate geometry for uniform flow distribution, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 84(6) (2006) 715-721.

[4] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, Effects of a rotating tube bundle on the hydrothermal performance for forced convection in a vented cavity with Ag–MgO/water hybrid and CNT–water nanofluids, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2020) 1-18.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Moayedi, Numerical Analysis of the Effect of Configurations of Double Rotating Cylinders on Heat Transfer Enhancement Hybrid Nanofluid Flow in a Vented Cavity , Amirkabir J. Mech Eng., 54(1) (2022) 27-30.

DOI: 10.22060/mej.2021.19823.7125

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۱، سال ۱۴۰۱، صفحات ۱۴۵ تا ۱۶۸
DOI: 10.22060/mej.2021.19823.7125

تحلیل عددی تأثیر چیدمان دو استوانه چرخان بر افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال ترکیبی درون یک محفظه باز

حسام مؤیدی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

خلاصه: در مقاله حاضر، تأثیر چیدمان‌های مختلف دو استوانه چرخان درون یک محفظه باز دارای دریچه‌های ورودی و خروجی بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم–مس با پایه آب در محدوده رژیم آرام به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهایی از قبیل چیدمان استوانه‌ها (A، B، C و D)، و همچنین سرعت زاویه‌ای چرخش استوانه‌ها (۱۰– الی ۱۰+)، عدد رینولدز (۱۰۰ الی ۵۰۰) و کسر حجمی نانوذرات (۰/۵ الی ۳ درصد) بر الگوی جریان و انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که چیدمان D نسبت به سایر چیدمان‌ها، دارای بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت و شاخص ارزیابی عملکرد می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها، عدد رینولدز جریان ورودی به محفظه و کسر حجمی، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش می‌یابد. همچنین با چرخش استوانه‌ها در جهت پادساعتگرد نسبت به چرخش ساعتگرد، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش چشمگیری یافته و حدود ۱/۳۰ برابر می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم–مس با پایه آب، موجب افزایش عدد ناسلت متوسط نسبت به نانوسیال مس با پایه آب و همچنین افزایش شاخص ارزیابی عملکرد نسبت به نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۷
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳

کلمات کلیدی:
تحلیل عددی
محفظه باز
نانوسیال ترکیبی
استوانه‌های چرخان
انتقال حرارت

۱- مقدمه

جریان سیال و انتقال حرارت درون محفظه[1] در بسیاری از صنایع مختلف ازجمله تأسیسات تهویه مطبوع، حمل و نقل، خنک کننده‌های الکترونیکی[2]، انرژی خورشیدی[3]، سیستم‌های میکروالکتریکی[4]، مبدل‌های حرارتی[5]، هوافضا، انرژی هسته‌ای، نیروگاه‌ها، پتروشیمی و مواد غذایی کاربرد دارد [۱]. ازجمله روش‌های مؤثر برای افزایش انتقال حرارت درون محفظه‌ها، می‌توان به تغییر هندسه محفظه[۲]، استفاده از بافل [۳]، وجود دیواره متحرک [۴] و حضور اجسام ساکن [۵] یا چرخان [۶] درون محفظه، اشاره نمود. استفاده از اجسام آدیاباتیک به ویژه استوانه‌های ساکن یا چرخان درون محفظه‌ها به دلیل کاربردهای صنعتی گسترده ازجمله میله‌های سوخت راکتورهای هسته‌ای، حفر چاه‌های نفت، لوله‌های دوار مبدل‌های حرارتی و شافت‌های چرخان، مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۱–۷]. کاستا و رایموندو[۷] به بررسی تأثیر استوانه چرخان بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت درون یک محفظه به صورت عددی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از استوانه چرخان درون محفظه در مقایسه با محفظه بدون استوانه، موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که با افزایش سرعت دورانی استوانه، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش اندازه استوانه هنگامی که سرعت دورانی آن کم باشد، مقدار عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. خانافر و همکاران [۸] تأثیر دو استوانه چرخان درون یک محفظه بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت ترکیبی در رژیم جریان آرام درون یک محفظه را به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با توجه به جهت چرخش استوانه‌ها، انتقال حرارت می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. چمخا و همکاران [۹] تأثیر موقعیت عمودی استوانه چرخان بر الگوی جریان سیال و افزایش انتقال حرارت درون یک محفظه بسته را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که ضریب انتقال حرارت متوسط تقریباً

1 Cavity
2 Electronic cooling
3 Solar power
4 MEMs
5 Heat exchanger

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hesam.moayedi@phd.guilan.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.

رابطه‌ی خطی با سرعت دورانی استوانه دارد. پارک و همکاران [۱۰]، الگوی جریان و انتقال حرارت درون یک محفظه دوبعدی همراه با استوانه‌های ساکن سرد و گرم را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر موقعیت عمودی استوانه‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که با نزدیک شدن استوانه‌ها به دیواره‌های بالا و پایین محفظه، انتقال حرارت به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. حسین و حسین [۱۱] تأثیر سرعت زاویه‌ای و موقعیت عمودی استوانه چرخان بر الگوی جریان و انتقال حرارت سیال هوا درون یک محفظه بسته مربعی را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که تغییر موقعیت عمودی و سرعت زاویه‌ای استوانه چرخان، منجر به شکل‌گیری الگوهای متفاوت در جریان‌های چرخشی اطراف استوانه می‌گردد. همچنین دریافتند که افزایش عدد ریچاردسون و سرعت زاویه‌ای استوانه موجب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود.

از سوی دیگر، یکی از روش‌های غیرفعال افزایش انتقال حرارت، افزودن نانو ذرات به سیال پایه و تشکیل نانوسیالات[1] است. با توجه به هدایت حرارتی ضعیف ذاتی سیالات پایه متداول در انتقال حرارت (مانند آب، روغن‌ها و اتیلن گلیکول)، با اضافه کردن نانو ذرات جامد و تأثیر بر روی خواص ترموفیزیکی سیال پایه مانند هدایت حرارتی، ویسکوزیته، چگالی و گرمای ویژه، انتقال حرارت بهبود می‌یابد [۱۲]. بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیالات درون محفظه‌های بسته با حضور استوانه به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است که به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات انجام شده توسط الصابری و همکاران [۱۳]، سلیمفندیگیل و همکاران [۴۱]، رسلان و همکاران [۱۵] و همچنین کرباسی‌فر و همکاران [۱۶] اشاره کرد. الصابری و همکاران [۱۳] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب درون یک محفظه با دیواره‌های موجدار در حضور یک استوانه چرخان را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر عدد رایلی، سرعت چرخشی استوانه، هندسه دیواره‌های موجدار و کسر حجمی نانو ذرات را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که در اعداد رایلی پایین با افزایش سرعت چرخشی استوانه، انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین دریافتند که افزایش کسر حجمی نانو ذرات موجب افزایش عدد ناسلت می‌گردد. سلیمفندیگیل و همکاران [۱۴]، به صورت عددی به بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال درون یک محفظه مربعی همراه با ماده متخلخل و استوانه چرخان پرداختند. در این تحقیق، از نانوسیال اکسید مس با پایه آب استفاده شده بود. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که تأثیر استفاده از نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و سرعت چرخشی بیشتر بوده و موجب بهبود انتقال حرارت می‌گردد. همچنین مشاهده کردند که با تغییر عدد دارسی ماده متخلخل، تغییر محسوسی در انتقال حرارت رخ نمی‌دهد. رسلان و همکاران [۱۵] تأثیر انواع مختلف نانوسیالات بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت درون یک محفظه بسته همراه با یک استوانه چرخان را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها همچنین تأثیر شعاع استوانه، سرعت زاویه‌ای استوانه و کسر حجمی نانو ذرات را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که استفاده از نانوسیال در مقایسه با سیال پایه، سبب افزایش قابل توجه انتقال حرارت می‌شود. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که استفاده از نانوذرات Al_2O_3 و Cu در مقایسه با سایر نانوذرات (Ag و TiO_2) موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. کرباسی‌فر و همکاران [۱۶] انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب در یک محفظه بسته با دیواره متحرک که درون آن یک استوانه بیضوی داغ در مرکز قرار دارد را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر عدد ریچاردسون، زاویه قرارگیری محفظه برای تغییر در نیروی شناوری و کسر حجمی نانو ذرات را بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که افزایش عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانو ذرات موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود. همچنین آن‌ها مشاهده کردند که با افزایش زاویه محفظه نسبت به حالت عمودی، به دلیل کاهش نیروی شناوری، مقدار عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد.

اخیراً مبحث جدیدی از نانوسیالات به نام نانوسیالات ترکیبی[2]، به منظور ارتقای ویژگی‌های حرارتی نانوسیالات، توسط محققین معرفی شده است [۱۷]. با افزودن دو یا بیش از دو نانو ذرات غیرمشابه به سیال پایه، نانوسیالات ترکیبی تشکیل شده که در مقایسه با نانوسیالات معمولی، دارای ویژگی‌های حرارتی بالاتری می‌باشد [۱۸]. مهریان و همکاران [۱۹] تأثیر حرکت نوسانی عمودی یک استوانه درون یک محفظه بسته را بر الگوی جریان و انتقال حرارت نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم–مس با پایه آب را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که حرکت نوسانی عمودی استوانه در اعداد رایلی پایین، موجب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌گردد. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که به دلیل افزایش ویسکوزیته دینامیکی در نانوسیال ترکیبی نسبت به نانوسیال معمولی (اکسید آلومینیوم با پایه آب)، تأثیر نیروی شناوری کاهش یافته و افزایش انتقال حرارت در نانوسیال معمولی افزایش بیشتری نسبت به نانوسیال ترکیبی می‌یابد. قلمباز و همکاران [۲۰] به بررسی الگوی جریان و انتقال حرارت نانوسیال ترکیبی

1 Nanofluids

2 Hybrid nanofluids

درون یک محفظه بسته در حضور یک مانع مربعی گرم به صورت عددی پرداختند. آن‌ها تأثیر عدد رایلی و کسر حجمی نانو ذرات را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانو ذرات در نانوسیال ترکیبی، موجب بهبود انتقال حرارت می‌شود. قنایی و بسایج [۲۱] در یک تحلیل عددی سه‌بعدی به بررسی تأثیر پیکربندی هندسی یک مانع گرم بر الگوی جریان و انتقال حرارت ترکیبی نانوسیال ترکیبی درون یک محفظه بسته پرداختند. آن‌ها تأثیر سرعت حرکت دیواره بالای محفظه، عدد ریچاردسون، و همچنین کسر حجمی نانو ذرات را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها حاکی از آن است که با افزایش سرعت دیواره بالای محفظه و کسر حجمی نانو ذرات، مقدار عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.

علاوه بر این، یکی دیگر از روش‌های مؤثر برای افزایش انتقال حرارت در محفظه‌ها، استفاده از محفظه‌های دارای دریچه‌های ورودی و خروجی است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند. اگرچه مطالعات زیادی در زمینه بررسی محفظه‌های دارای دریچه‌های ورودی و خروجی[1] از منظر موقعیت دریچه‌ها [۲۲]، تعداد دریچه‌ها [۲۳] و جریان نوسانی در دریچه ورودی [۲۴] انجام شده است، اما هنوز تحقیقات اندکی در زمینه استفاده همزمان استوانه‌های چرخان درون محفظه‌های دارای دریچه‌های ورودی و خروجی برای افزایش انتقال حرارت انجام شده است. جاسیم و همکاران [۲۵] تأثیر حضور یک استوانه چرخان آدیاباتیک بر انتقال حرارت نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم–مس با پایه آب درون یک محفظه با دریچه ورودی و خروجی را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها همچنین تأثیر عدد رینولدز، کسر حجمی نانو ذرات، شعاع، سرعت زاویه‌ای و همچنین موقعیت مکانی استوانه را نیز بررسی کردند. سلیمفندیگیل و اوزتوپ [۲۶] افزایش انتقال حرارت جریان نانوسیال ترکیبی درون یک محفظه با دریچه ورودی و خروجی در حضور چهار استوانه چرخان را به صورت عددی بررسی نمودند. آن‌ها تأثیر عدد رینولدز جریان ورودی، کسر حجمی نانو ذرات، سرعت زاویه‌ای چرخش استوانه‌ها و همچنین موقعیت عمودی و افقی چهار استوانه درون محفظه را مورد ارزیابی قرار دادند.

علیرغم کاربردهای گسترده محفظه‌ها در تأسیسات حرارتی، مطالعات اندکی در زمینه جریان نانوسیال ترکیبی درون محفظه‌های دارای دریچه‌های ورودی و خروجی در حضور استوانه چرخان انجام شده است. بر اساس مطالعه دیگر محققان، لازم به ذکر است که هیچ توجهی بر عملکرد حرارتی چیدمان‌های مختلف دو استوانه چرخان درون محفظه دارای دریچه‌های ورودی و خروجی انجام نشده است. با توجه به عدم بررسی چیدمان دو استوانه چرخان و همچنین عدم بررسی شاخص ارزیابی عملکرد جهت تحلیل الگوی جریان و انتقال حرارت در شرایط مختلف جریان، نوآوری مطالعه حاضر بررسی جریان نانوسیال ترکیبی درون یک محفظه با دریچه ورودی و خروجی در حضور دو استوانه چرخان و ارزیابی همزمان تأثیر پارامترهای مؤثر بر افزایش انتقال حرارت از قبیل چیدمان استوانه‌ها، عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و همچنین سرعت زاویه‌ای چرخش استوانه‌ها در تغییر الگوی جریان و تأثیر آن بر افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد.

۲- هندسه مسئله

نمای شماتیکی از هندسه دو بعدی و دامنه محاسباتی مسئله مورد نظر، ابعاد به‌کار رفته، چیدمان استوانه‌ها و موقعیت دریچه‌های ورودی و خروجی در شکل ۱ نشان داده شده است. از ورودی سیال خنک با سرعت و دمای معین وارد شده و از دریچه خروجی خارج می‌شود. اندازه دریچه‌های ورودی و خروجی برابر $W = 0.2\ L$ می‌باشد. دیواره‌های محفظه به صورت دما ثابت و دارای شرط مرزی عدم لغزش می‌باشند. همچنین دیواره پایین به عنوان دیوار گرم در نظر گرفته شده‌اند. همچنین استوانه‌های چرخان با قطر $D = 0.15\ L$ به صورت عایق بوده و با سرعت زاویه‌ای مشخص (Ω) در جهت ساعتگرد و یا پادساعتگرد می‌چرخند. همچنین برای بررسی موقعیت استوانه‌های چرخان، ۴ چیدمان مختلف به ترتیب از (الف) تا (د) در نظر گرفته شده است.

نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم–مس با پایه آب به عنوان سیال عامل با سرعت ورودی مشخص از دریچه ورودی وارد محفظه می‌شود و از دریچه دیگر محفظه خارج می‌شود. خواص ترمودینامیکی آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم و مس در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- معادلات حاکم

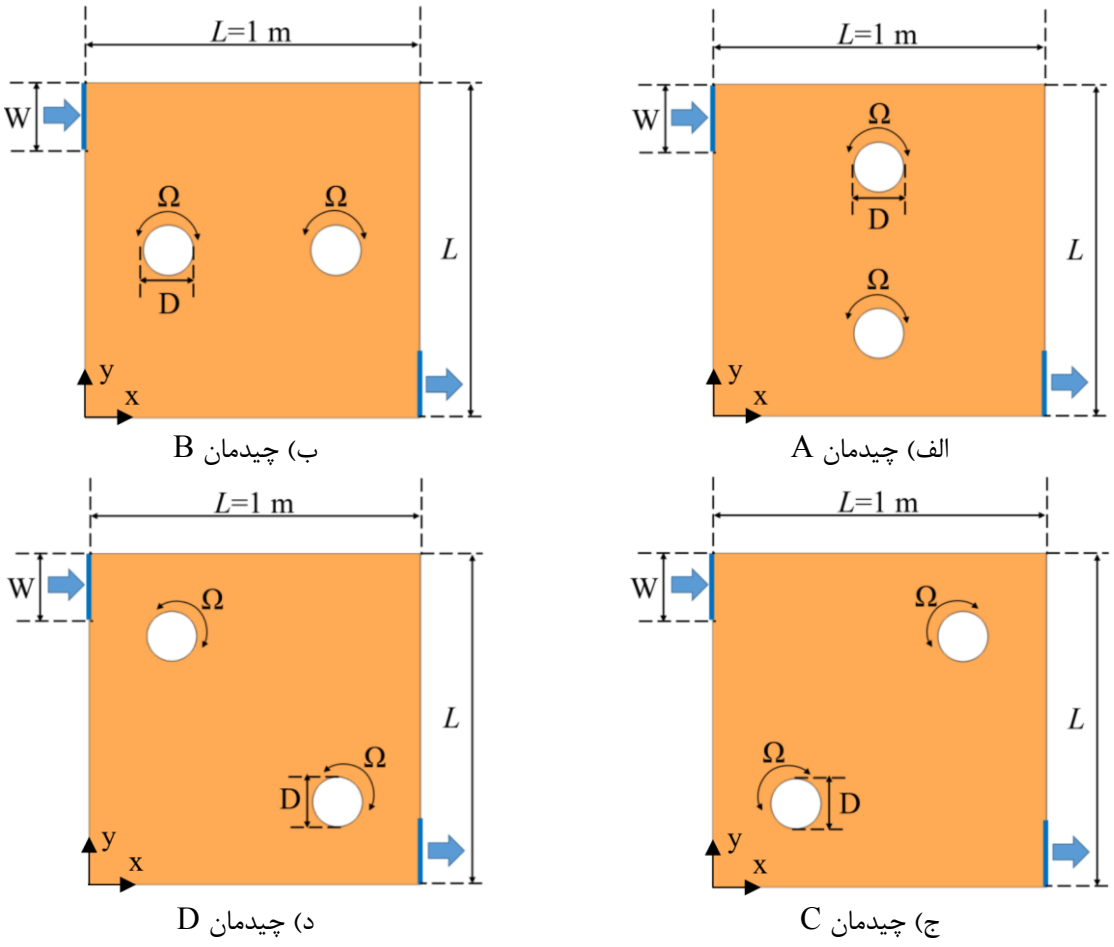
۳- ۱- معادلات میدان جریان

معادلات حاکم بر جریان نانوسیال با فرض تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد، تراکم‌ناپذیر، دو بعدی و آرام، شامل پیوستگی، مومنتم و انرژی بوده که به صورت زیر بیان می‌شوند [۸–۲۰]:

پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0 \qquad (۱)$$

1 Cavity with inlet and outlet ports



شکل ۱. نمایی شماتیک از دامنه محاسباتی

Fig. 1. Schematic view of the computational domain

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی]۲۷[

Table 1. Thermophysical properties [27]

پارامتر	آب	اکسید آلومینیوم	مس
چگالی (ρ)	۹۹۷٫۱	۳۹۷۰	۸۹۳۳
ضریب هدایت حرارتی (K)	۰٫۶۱۳	۴۰	۴۰۰
ظرفیت گرمای ویژه (c_p)	۴۱۷۹	۷۶۵	۳۸۵
ویسکوزیته دینامیکی (μ)	۰٫۰۰۱	-	-

مومنتم:

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{1}{\rho_{hnf}}\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{\mu_{hnf}}{\rho_{hnf}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \quad (۲)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{1}{\rho_{hnf}}\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{\mu_{hnf}}{\rho_{hnf}}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \quad (۳)$$

انرژی:

$$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\frac{K_{hnf}}{(\rho c_P)_{hnf}}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \quad (۴)$$

شایان ذکر است که جاذبه عمود بر راستای بررسی می‌باشد و بنابراین از اثرات جاذبه چشم‌پوشی می‌شود. همچنین در معادله انرژی از اثرات اتلاف ویسکوز چشم‌پوشی شده است. همان‌گونه که از روابط (۱) تا (۴) مشخص است، به منظور حل معادلات حاکم، نیاز به تعیین خواص ترمودینامیکی نانوسیال می‌باشد.

۳- ۲- روابط مربوط به خواص نانوسیال ترکیبی

خواص ترموفیزیکی نانوسیال ترکیبی به کمک خواص سیال پایه (آب) و نانوذرات (اکسید آلومینیوم و مس) محاسبه می‌شوند. چگالی و ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال ترکیبی به صورت زیر تعیین می‌گردد [۱۷-۲۰]:

$$\rho_{hnf}=(1-\varphi_{hnf})\rho_f+\varphi_1\rho_{p1}+\varphi_2\rho_{p2} \quad (۵)$$

$$(\rho c_P)_{hnf}=(1-\varphi_{hnf})(\rho c_P)_f+\varphi_1(\rho c_P)_{p1}+\varphi_2(\rho c_P)_{p2} \quad (۶)$$

همچنین ویسکوزیته نانوسیال ترکیبی براساس رابطه بریکمن به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$\mu_{hnf}=\frac{\mu_f}{(1-\varphi_{hnf})^{2.5}} \quad (۷)$$

ضریب هدایت حرارتی نانوسیال ترکیبی مطابق رابطه (۸) تعیین می‌گردد [۲۶]:

$$K_{hnf}=K_f\left[\frac{\left(\frac{\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2}}{\varphi_{hnf}}\right)+2K_f+2(\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2})-2\varphi_{hnf}K_f}{\left(\frac{\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2}}{\varphi_{hnf}}\right)+2K_f-(\varphi_1K_{p1}+\varphi_2K_{p2})+\varphi_{hnf}K_f}\right] \quad (۸)$$

در روابط بالا اندیس‌های hnf، f، $P1$ و $P2$ به ترتیب نشان‌دهنده نانوسیال ترکیبی، سیال پایه، نانوذرات اکسید آلومینیوم و مس می‌باشند. همچنین کسر حجمی نانوسیال ترکیبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\varphi_{hnf}=\varphi_1+\varphi_2 \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، φ_1 و φ_2 به ترتیب کسر حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم و مس می‌باشند. لازم به ذکر است که در نانوسیال ترکیبی، کسر حجمی اکسید آلومینیوم و مس برابر ($\varphi_1=\varphi_2$) می‌باشند.

۳- ۳- شرایط مرزی

نانوسیال ترکیبی اکسید آلومینیوم-مس با پایه آب به عنوان سیال عامل و با سرعت یکنواخت و دمای مشخص در دریچه ورودی در نظر گرفته شده است. همچنین شرط توسعه‌یافتگی در دریچه خروجی در نظر گرفته شده است [۲۶-۲۴]. استوانه‌های چرخان به صورت متقارن در چهار چیدمان مختلف درون محفظه قرار گرفته و با سرعت زاویه‌ای یکسان می‌چرخند. همچنین استوانه‌ها به صورت عایق حرارتی در نظر گرفته می‌شوند. دیواره‌ی پایین محفظه در دمای ثابت به عنوان دیواره گرم می‌باشد. سایر دیواره‌های محفظه در دمای ثابت به عنوان دیواره‌های سرد و همه مرزهای جامد دارای شرط عدم لغزش می‌باشند. شرایط مرزی دما و سرعت، در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. شرایط مرزی

Table 2. Boundary conditions

مرز	دما	جریان
دریچه ورودی	T_0=۳۰۰ K	$u=u_0,\ v=0$
دریچه خروجی	$\partial(T-T_m)/\partial x=0$	$\partial u/\partial x=\partial v/\partial x=0$
استوانه‌ها	$q''=0$	$u=-\Omega(y-y_c),\ v=\Omega(x-x_c)$
دیواره پایین محفظه	T_0=۳۵۰ K	$u=0,\ v=0$
دیواره راست محفظه	T_0=۳۰۰ K	$u=0,\ v=0$
دیواره چپ محفظه	T_0=۳۰۰ K	$u=0,\ v=0$
دیواره بالا محفظه	T_0=۳۰۰ K	$u=0,\ v=0$

۳- ۴- تحلیل داده‌ها

عدد رینولدز بر اساس دریچه ورودی محفظه به صورت زیر تعریف می‌گردد [۷]:

$$\mathrm{Re}=\frac{\rho_{hnf}u_0W}{\mu_{hnf}} \qquad (۱۰)$$

در این رابطه u_0 سرعت جریان در ورودی می‌باشد. همچنین سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\Omega=\frac{\omega D}{2u_0} \qquad (۱۱)$$

در رابطه‌ی (۱۱)، ω سرعت زاویه‌ای استوانه‌های چرخان است. همچنین لازم به ذکر است که در این تحقیق، جهت چرخش پادساعتگرد جهت مثبت و جهت چرخش ساعتگرد، منفی در نظر گرفته می‌شود.

به منظور ارزیابی تأثیر استوانه‌های چرخان و چیدمان آن‌ها بر جریان نانوسیال و انتقال حرارت، از عدد ناسلت محلی روی دیواره گرم (دیواره پایین محفظه) و عدد ناسلت متوسط به ترتیب مطابق روابط (۱۲) و (۱۳) بهره گرفته شده است [۲۱]:

$$Nu_x=\frac{h_x x}{K_{hnf}}=x\left(\frac{\left.\frac{\partial(T_S-T)}{\partial y}\right|_{y=0}}{T_S-T_{in}}\right) \qquad (۱۲)$$

$$Nu_m=\frac{1}{L}\int_0^L Nu_x dx \qquad (۱۳)$$

در رابطه (۱۲)، T_Sاختلاف دما بین دیواره پایین و سیال موضعی و T_{in} دمای سیال دریچه ورودی می‌باشد.

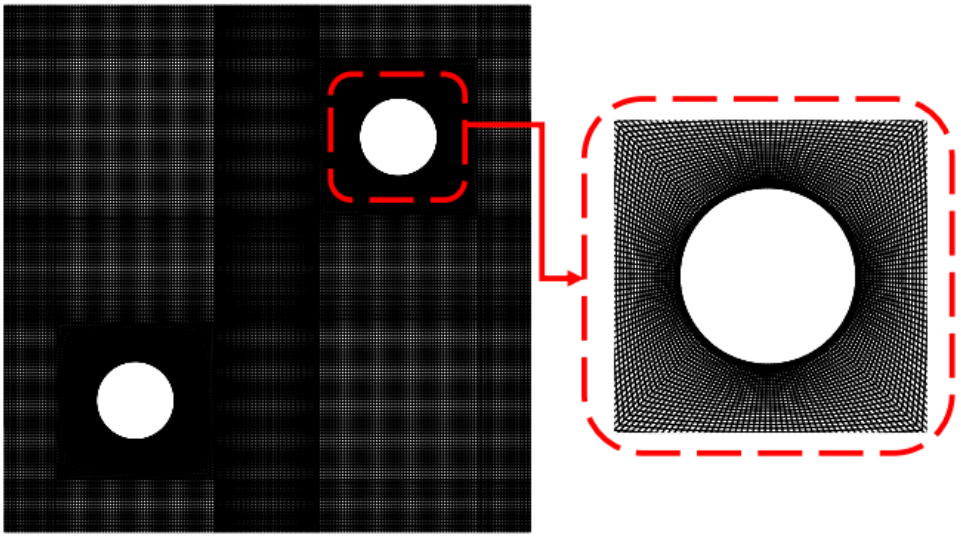
همچنین افت فشار از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$\Delta P=P_{inlet}-P_{outlet} \qquad (۱۴)$$

در رابطه (۱۴)، P_{inlet} و P_{outlet} به ترتیب فشار کل متوسط در مقاطع ورودی و خروجی هستند.

همچنین به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور استوانه‌های چرخان، شاخص ارزیابی عملکرد[1] مطابق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود [۲۸]:

1 Performance evaluation criteria



شکل ۲. نمایی از شبکه محاسباتی برای چیدمان C با تعداد ٥٦٤٢٠ شبکه

Fig. 2. The view of domain grid distribution for configuration C with 56420 cells

$$\eta = \frac{\left(Nu_m / Nu_{m0}\right)}{\left(\Delta P / \Delta P_0\right)^{(1/3)}} \qquad (۱۵)$$

در این رابطه، Nu_m و ΔP به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان درون محفظه در حضور استوانه‌های چرخان می‌باشد. همچنین، Nu_{m0} و ΔP_0 نیز به ترتیب عدد ناسلت متوسط و افت فشار جریان آب درون محفظه بدون استوانه‌های چرخان می‌باشد.

۴- استقلال از شبکه و روند حل عددی

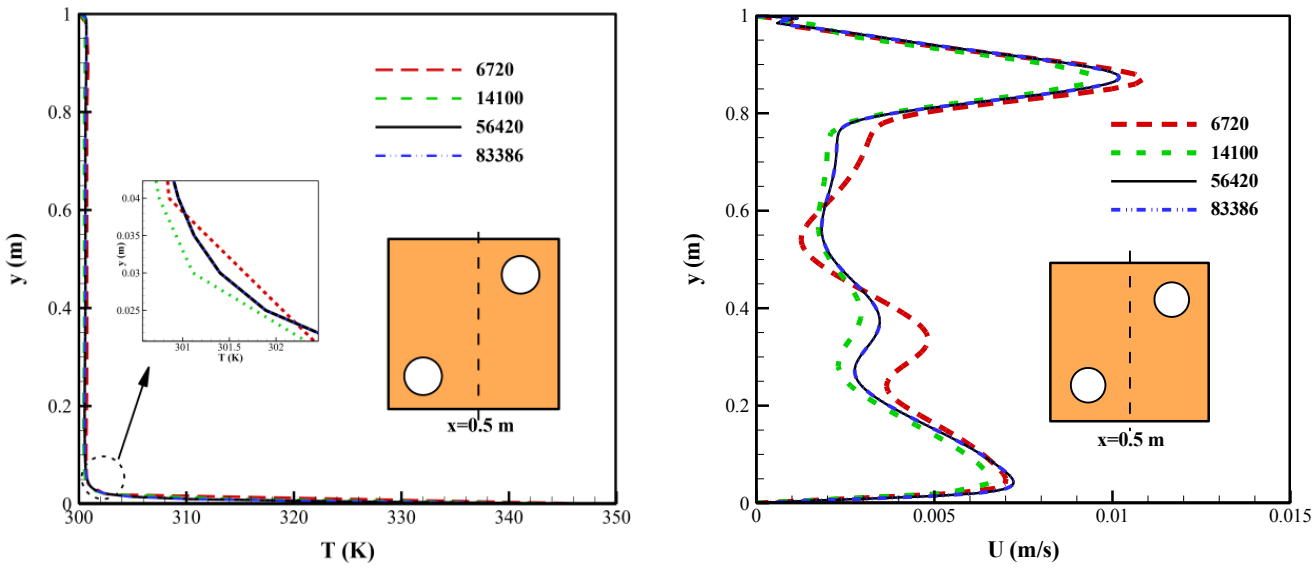
برای حل معادلات حاکم ابتدا هندسه موردنظر توسط نرم افزار تجاری گمبیت۲٫۴[1] به صورت سازمان‌یافته و غیریکنواخت شبکه‌بندی شده است تا حل عددی در این شبکه‌ها ایجاد شود. به‌منظور افزایش دقت محاسباتی در مکان‌های نزدیک دیواره‌ها و استوانه‌ها که گرادیان‌های شدید وجود دارد، از شبکه‌بندی با تراکم بیشتری استفاده شده است و کوچکترین سایز سلول محاسباتی حدود ۰٫۰۲ میلیمتر می‌باشد. در شکل ۲ نمایی از شبکه محاسباتی و شبکه‌بندی ایجاد شده در اطراف استوانه‌ها برای چیدمان C با تعداد ۵۶۴۲۰ شبکه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که تعداد شبکه محاسباتی برای چیدمان‌های مختلف، متفاوت است.

به منظور دسترسی به اندازه و تعداد شبکه محاسباتی مناسب، آزمون استقلال از شبکه برای دامنه محاسباتی انجام شده است. هدف از استقلال از شبکه، بررسی عدم وابستگی نتایج حل عددی به شبکه محاسباتی و همچنین کاهش هزینه محاسباتی است. در شکل ۳ توزیع سرعت و توزیع دما در موقعیت طولی ۰٫۵ متر و در امتداد ارتفاع محفظه به‌عنوان پارامتر استقلال از شبکه انتخاب شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، از چهار شبکه‌بندی مختلف در عدد رینولدز ۵۰۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد ۵ در جهت پادساعتگرد برای استوانه‌ها و کسر حجمی ۰٫۰۱ برای نانوسیال ترکیبی برای چیدمان C استفاده شده است. با توجه به شکل ۳ واضح است که توزیع سرعت و توزیع دما در دو شبکه ۵۶۴۲۰ و ۸۳۳۸۶ سلول، تغییر چندانی ندارد. بنابراین شبکه با تعداد ۵۶۴۲۰ به لحاظ داشتن دقت و زمان محاسباتی مناسب، به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب می‌شود. لازم به ذکر است که استقلال حل عددی از شبکه برای دیگر شرایط نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

برای حل عددی معادلات حاکم، از کد متن‌باز اپن‌فوم[2] استفاده شده است. معادلات حاکم در اپن‌فوم بر اساس روش حجم محدود گسسته‌سازی

1 Gambit2.4

2 OpenFoam4.0



(ب) توزیع دما (الف) توزیع سرعت

شکل ۳. استقلال از شبکه برای (الف) توزیع سرعت، (ب) توزیع دما در x= ۰/۵ در امتداد ارتفاع محفظه با چیدمان C برای شبکه‌های مختلف (Re=۵۰۰, φhnf=۰/۰۱, Ω=۵)

Fig. 3. Grid independence test for (a) velocity profile, (b) temperature profile at x=0.5 m for configuration C (Re=500, φhnf=0.01, Ω=5)

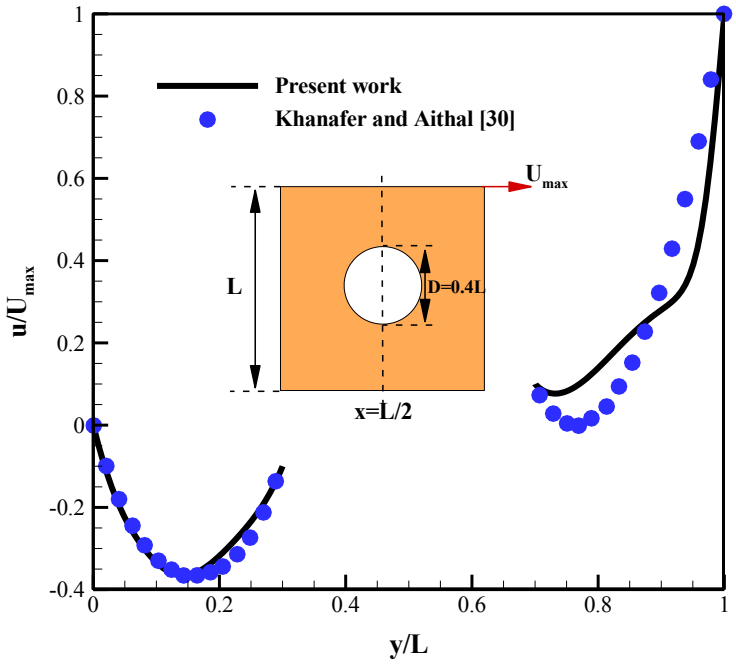
شده است. الگوریتم سیمپل[1] به منظور بر طرف کردن کوپلینگ میان سرعت و فشار مورد استفاده قرار گرفته است. جهت گسسته‌سازی ترم فشار و سایر ترم‌های معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب مرتبه دوم، ترم‌های شامل گرادیان به روش گرادیان حداقل مربعات[2] گسسته شده است. معیار پایایی و همگرایی حل نیز در نظر گرفتن باقیمانده کلیه ترم‌ها برابر 10^{-7} می‌باشد. همچنین مقادیر حدس اولیه حل عددی برای دما ۳۰۰ K و برای مؤلفه‌های سرعت در راستای x و y و فشار ۰ می‌باشد.

۵- اعتبارسنجی نتایج

در پژوهش‌های اخیر [۲۸ و ۲۹] توسط نویسنده مقاله کنونی، از صحت نتایج حلگر توسعه‌یافته در کد متن‌باز اپن‌فوم برای جریان نانوسیال اطمینان حاصل شد. همچنین در پژوهش حاضر، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج توزیع سرعت افقی در خط مرکز در امتداد ارتفاع برای یک محفظه با یک استوانه چرخان در مرکز آن، به ازای عدد رینولدز ۱۰۰ و سرعت‌زاویه‌ای استوانه چرخان ۰٫۵، با نتایج خانافر و آیدال [۳۰] در شکل ۴ مقایسه شده است. لازم به ذکر است که ناحیه محاسباتی شامل یک محفظه مربعی است که استوانه چرخان با قطر ۰٫۴L در مرکز آن به صورت ساعتگرد می‌چرخد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود نتایج عددی مطالعه حاضر و نتایج تجربی آن‌ها با دقت قابل قبولی مطابقت دارند.

همچنین به منظور صحت‌سنجی نتایج اسکالر، نتایج حاصل از تحلیل عددی عدد ناسلت متوسط برای جریان نانوسیال مس با پایه آب برای یک استوانه چرخان با قطر ۰٫۲L درون یک محفظه مربعی با نتایج عددی روسلان و همکاران [۱۵] به ازای سرعت زاویه‌ای ۵۰۰ و کسر حجمی‌های مختلف نانوسیال در جدول ۳ مقایسه شده است. براساس جدول ۳، نتایج تحلیل عددی تحقیق حاضر، با بیشینه خطای ۱٫۴۳٪، تطابق مطلوبی با نتایج روسلان و همکاران [۱۵] دارد.

1 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-linked Equations)
2 Least-squares gradient



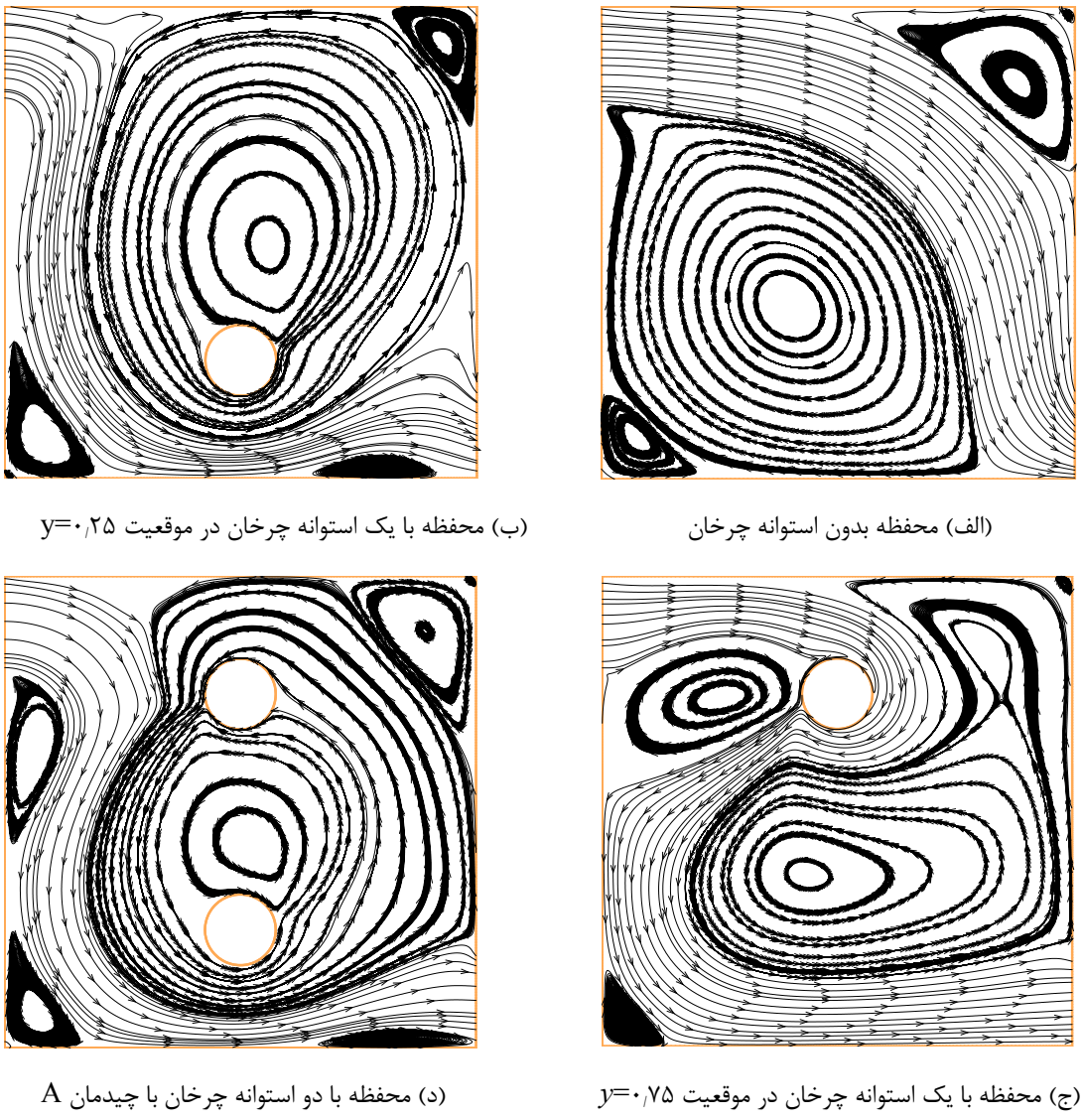
شکل ۳. مقایسه توزیع سرعت افقی با نتایج خانافر و آیدال [۳۰] به ازای Re=۱۰۰ و ω=-۰/۵ در مقطع x/L=۰/۵

Fig. 3. Comparison of the horzintal velocity profiles with results of Khanafer and Aithal [30] for Re=100 and ω=-0.5 at x/L=0.5

جدول ۳. مقایسه عدد ناسلت متوسط یک استوانه چرخان برای D =۰/۲L و ω = +۵۰۰

Table 3. Comparison of average Nusselt number of a rotating cylinder for D = 0.2L and ω = +500

φ	Nu_m		درصد اختلاف (%)
	تحقیق حاضر	روسلان و همکاران [۱۵]	
۰	۴/۷۸	۴/۷۳	۱/۰۶
۰/۰۱	۴/۸۵	۴/۷۹	۱/۲۵
۰/۰۳	۴/۹۶	۴/۸۹	۱/۴۳



(الف) محفظه بدون استوانه چرخان

(ب) محفظه با یک استوانه چرخان در موقعیت y=۰٫۲۵

(ج) محفظه با یک استوانه چرخان در موقعیت y=۰٫۷۵

(د) محفظه با دو استوانه چرخان با چیدمان A

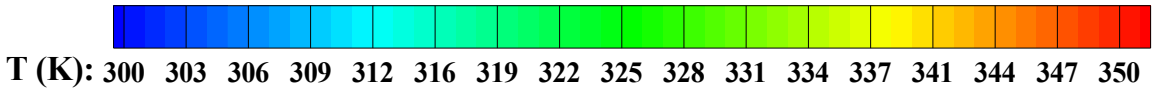
شکل ۵. خطوط جریان (φhnf =۰/۰۲, Re=۲۵۰, Ω=+۵)

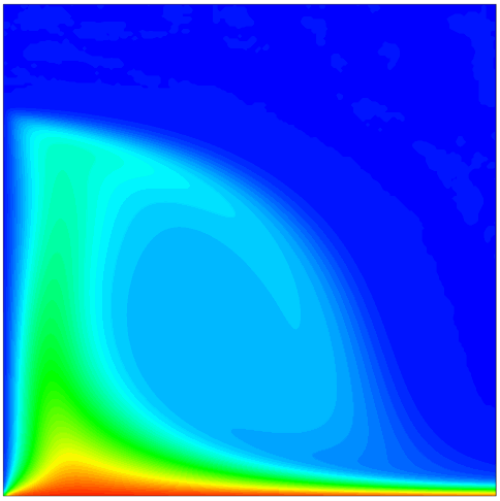
Fig. 5. Streamlines (φhnf =0.02, Re=250, Ω=+5)

۶- نتایج

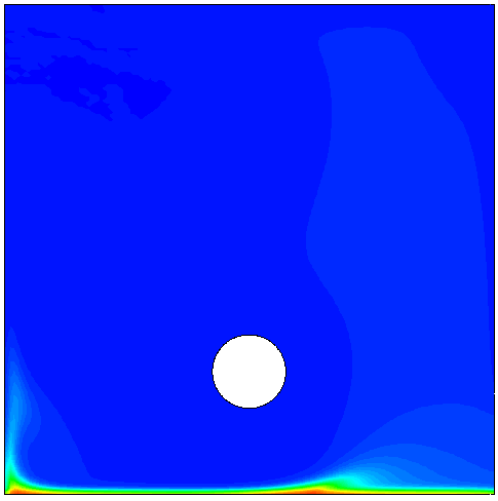
۶- ۱- تأثیر حضور استوانه‌های چرخان درون محفظه

در این بخش، تأثیر حضور استوانه‌های چرخان درون محفظه بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطوط جریان به ازای محفظه بدون استوانه چرخان و با یک و دو استوانه چرخان در عدد رینولدز ۲۵۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان ۵+ و به ازای کسر حجمی ۰٫۰۲ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با حضور استوانه چرخان درون محفظه، الگوی جریان و همچنین اندازه و تعداد گردابه‌های درون محفظه تغییر می‌کند. نتایج حاکی از آن است که وجود استوانه‌های چرخان درون محفظه موجب انحراف جریان دریچه ورودی به سمت دیواره گرم محفظه (دیواره پایین) می‌گردد که موجب بهبود انتقال حرارت می‌گردد. همچنین به منظور بررسی تأثیر حضور استوانه‌های چرخان درون محفظه بر انتقال حرارت، توزیع دما به ازای محفظه بدون استوانه چرخان و با یک و دو استوانه چرخان در عدد رینولدز ۲۵۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان ۵+ و به ازای کسر حجمی ۰٫۰۲ در شکل ۶ نشان داده شده است. براساس نتایج حاصل از این شکل، وجود

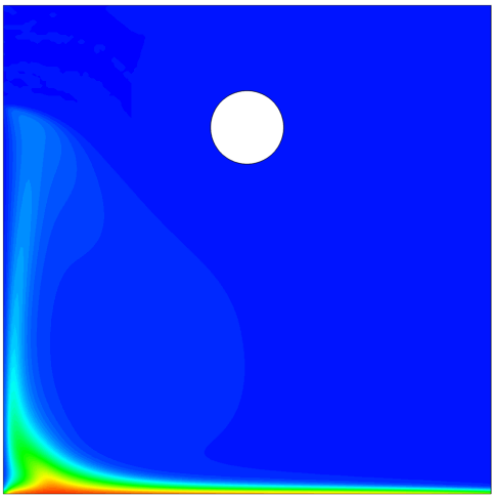




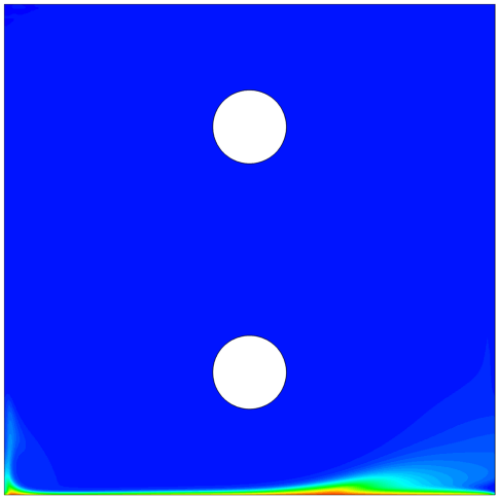
(الف) محفظه بدون استوانه چرخان



(ب) محفظه با یک استوانه چرخان در موقعیت y=۰٫۲۵



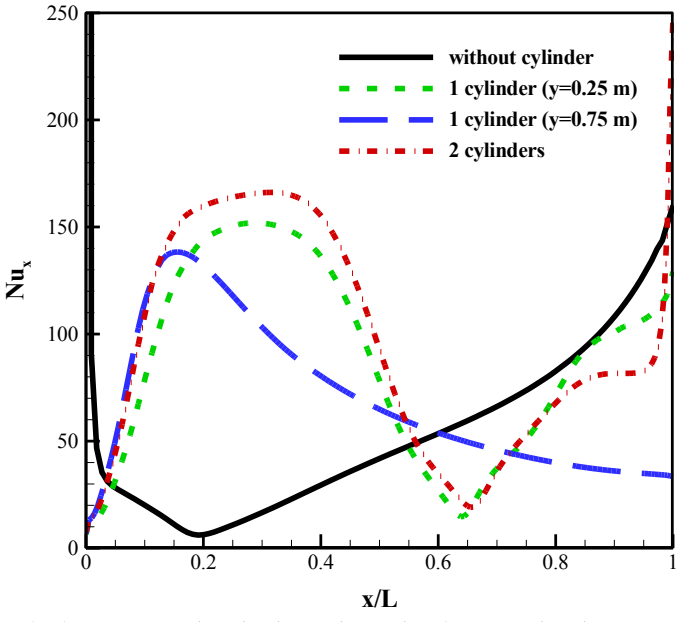
(ج) محفظه با یک استوانه چرخان در موقعیت y=۰٫۷۵



(د) محفظه با دو استوانه چرخان با چیدمان A

شکل ۶. توزیع دما (φhnf =۰٫۰۲, Re=۲۵۰, Ω=+۵)

Fig. 6. Temperature distribution (φhnf =0.02, Re=250, Ω=+5)



شکل ۷. توزیع عدد ناسلت روی دیواره پایین محفظه برای تعداد مختلف استوانه درون محفظه (φhnf =۰/۰۲, Re=۲۵۰, Ω=+۵)

Fig. 7. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the bottom wall of cavity for different number of cylinders (φhnf =0.02, Re=250, Ω=+5)

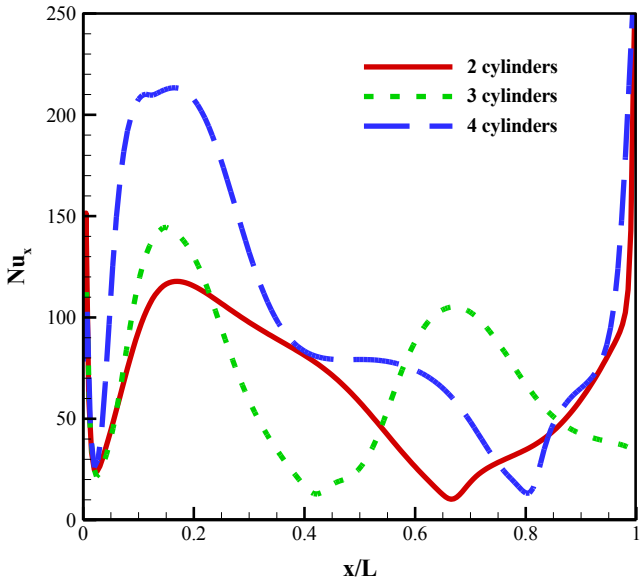
استوانه‌های چرخان درون محفظه موجب تغییر چشمگیری در توزیع دما درون محفظه می‌گردد. به منظور ارزیابی حضور استوانه‌های چرخان بر افزایش انتقال حرارت، توزیع طولی عدد ناسلت روی دیواره گرم محفظه (دیواره پایین) در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با حضور استوانه‌های چرخان درون محفظه، عدد ناسلت افزایش چشمگیری یافته است. نتایج حاکی از آن است که با نزدیک شدن استوانه چرخان به دیواره گرم، عدد ناسلت افزایش می‌یابد، زیرا در این ناحیه لایه مرزی توسط جریان ناشی از چرخش استوانه در این ناحیه حذف شده است. همچنین مشخص است که با افزایش تعداد استوانه‌های درون محفظه از یک استوانه به دو استوانه، توزیع عدد ناسلت و بویژه مقدار بیشینه آن به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. به منظور ارزیابی تأثیر تعداد استوانه‌ها بر افزایش انتقال حرارت، نسبت عدد ناسلت متوسط برای ۳ حالت حضور یک استوانه چرخان در موقعیت y=۰٫۲۵ m، در موقعیت y=۰٫۲۵ m و ۲ استوانه چرخان در چیدمان A در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج این جدول مشاهده می‌شود در یک عدد رینولدز، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان و کسر حجمی نانوذرات ثابت، با افزایش تعداد استوانه‌ها از ۱ به ۲، عدد ناسلت متوسط به‌طور چشمگیری افزایش یافته و حدود ۱٫۰۹ برابر می‌شود. از سوی دیگر، حضور استوانه به عنوان مانعی در مقابل جریان نانوسیال، همواره باعث افزایش افت فشار می‌گردد. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور استوانه، شاخص ارزیابی عملکرد (η) در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، در حضور استوانه چرخان، نسبت نرخ افزایش انتقال حرارت به افزایش افت فشار در تمامی حالات بیشتر بوده و شاخص ارزیابی عملکرد همواره بزرگ‌تر از ۱ است. از طرف دیگر، همان‌گونه که از این نتایج مشاهده می‌شود، هنگامی که دو استوانه چرخان درون محفظه قرار دارند، نسبت به محفظه با یک استوانه، شاخص ارزیابی عملکرد حدود ٪۸۵٫۲۷ افزایش یافته است. به عبارت دیگر، انحراف سیال به دلیل وجود دو استوانه چرخان درون محفظه، باعث تولید جریان با مومنتم قوی‌تر در مجاورت دیواره پایین محفظه می‌شود.

همچنین به منظور بررسی تأثیر تعداد استوانه‌ها چرخان درون محفظه، ۳ چیدمان به ترتیب با تعداد دو، سه و چهار استوانه در نظر گرفته شده است. به منظور ارزیابی حضور استوانه‌های چرخان بر افزایش انتقال حرارت، توزیع طولی عدد ناسلت روی دیواره گرم محفظه (دیواره پایین) در عدد رینولدز ۱۰۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان ۵+ و به ازای کسر حجمی ۰/۰۳ در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با

جدول ۴. نسبت عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین محفظه و شاخص ارزیابی عملکرد برای تعداد مختلف استوانه درون محفظه (φhnf =۰/۰۲, Re=۲۵۰, Ω=+۵)

Table 4. Ratio of average Nusselt number on the bottom wall of cavity and performance evaluation criteria for different number of cylinders (φhnf =0.02, Re=250, Ω=+5)

تعداد استوانه‌های چرخان درون محفظه	$Nu_m / Nu_{m.}$	η
۱ استوانه در موقعیت y=۰٫۲۵ m	۱٫۶۴	۱٫۴۰
۱ استوانه در موقعیت y=۰٫۷۵ m	۱٫۲۸	۱٫۳۸
۲ استوانه	۱٫۸۰	۱٫۷۹



شکل ۸. توزیع عدد ناسلت روی دیواره پایین محفظه برای تعداد ۲ الی ٤ استوانه درون محفظه (φhnf =۰/۰۳, Re=۱۰۰, Ω=+۵)

Fig. 8. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the bottom wall of cavity for 2 to 4 number of cylinders (φhnf =0.03, Re=100, Ω=+5)

افزایش تعداد استوانه‌های درون محفظه از دو استوانه تا چهار استوانه، توزیع عدد ناسلت به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر کرده و همچنین مقدار بیشینه آن افزایش چشمگیری یافته است. همچنین به منظور ارزیابی تأثیر تعداد استوانه‌ها بر افزایش انتقال حرارت، نسبت عدد ناسلت متوسط بر حسب تعداد استوانه‌های چرخان درون محفظه در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که از نتایج این جدول مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد استوانه‌های چرخان، عدد ناسلت متوسط به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. از سوی دیگر، حضور استوانه به عنوان مانعی در مقابل جریان نانوسیال، همواره باعث افزایش افت فشار می‌گردد. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور استوانه‌ها، شاخص ارزیابی عملکرد (η) نیز در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش تعداد استوانه‌های چرخان از دو استوانه به سه یا چهار استوانه، شاخص ارزیابی عملکرد کاهش می‌یابد.

جدول ۵. نسبت عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین محفظه و شاخص ارزیابی عملکرد برای تعداد ۲ الی ٤ استوانه درون محفظه (φhnf =۰/۰۳, Re=۱۰۰, Ω=+۵)

Table 5. Ratio of average Nusselt number on the bottom wall of cavity and performance evaluation criteria for 2 to 4 number of cylinders (φhnf =0.03, Re=100, Ω=+5)

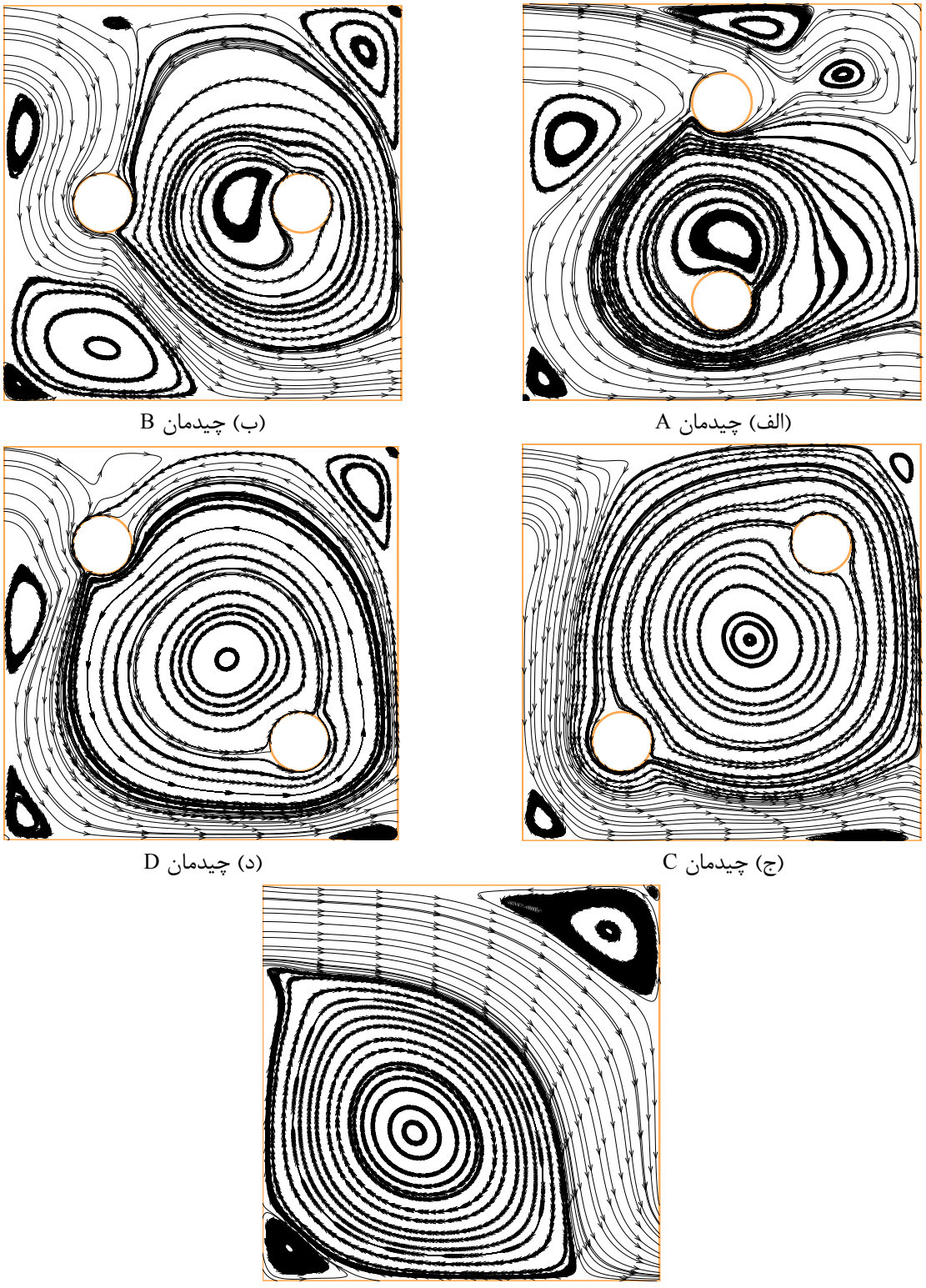
تعداد استوانه‌های چرخان درون محفظه	$Nu_m / Nu_{m.}$	η
۲ استوانه	۲٫۳۹	۱٫۲۵
۳ استوانه	۲٫۵۵	۱٫۲۳
۴ استوانه	۳٫۶۵	۱٫۱۲

بنابراین با توجه به این نتایج، و همچنین به‌منظور بررسی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار، استفاده از دو استوانه نسبت به تعداد سه و چهار استوانه مورد قبول‌تر و دارای راندمان حرارتی بالاتری می‌باشد.

۶- ۲- تأثیر چیدمان استوانه‌های چرخان

در این بخش، تأثیر چیدمان دو استوانه چرخان درون محفظه بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطوط جریان نانوسیال ترکیبی درون محفظه در عدد رینولدز ۵۰۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان ۵+ و به ازای کسر حجمی ۰٫۰۱ برای چیدمان‌های مختلف استوانه‌ها و همچنین محفظه بدون حضور استوانه در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با تغییر چیدمان استوانه‌های چرخان، الگوی جریان و اندازه گردابه‌های ناشی از حضور استوانه‌ها نیز تغییر می‌کند. همچنین نتایج حاکی از آن است که برای چیدمان‌های (الف) و (ب) اندازه گردابه اصلی درون محفظه کاهش یافته، در حالی که تعداد گردابه‌ها افزایش یافته است. براساس شکل ۹ مشخص است که در حضور استوانه‌های چرخان، اندازه گردابه گوشه سمت راست–بالا، نسبت به محفظه بدون استوانه، کاهش می‌یابد. همچنین به منظور بررسی تأثیر چیدمان‌های مختلف استوانه‌های چرخان درون محفظه بر انتقال حرارت، توزیع دما به ازای محفظه بدون استوانه چرخان و با یک و دو استوانه چرخان در عدد رینولدز ۵۰۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان ۵+ و به ازای کسر حجمی ۰٫۰۱ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، با تغییر چیدمان استوانه‌های چرخان، تغییر چشمگیری در توزیع دما درون محفظه ایجاد می‌گردد. به منظور ارزیابی افزایش انتقال حرارت به ازای چیدمان‌های مختلف، توزیع طولی عدد ناسلت روی دیواره گرم محفظه (دیواره پایین) در عدد رینولدز ۵۰۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان ۵+ و کسر حجمی نانوذرات ۰٫۰۱ در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در حضور استوانه‌های چرخان درون محفظه، به دلیل تغییر در الگوی جریان و گردابه‌های درون محفظه، توزیع ناسلت دارای یک مقدار بیشینه می‌گردد. مشخص است که با تغییر چیدمان استوانه‌های چرخان درون محفظه، توزیع عدد ناسلت و بویژه مقدار بیشینه آن به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند. همچنین، مقدار بیشینه عدد ناسلت برای چیدمان C نسبت به سایر چیدمان‌ها بیش‌تر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در چیدمان C استوانه چرخان پایینی، نزدیک به ابتدای دیواره گرم محفظه می‌باشد و با توجه به جهت چرخش استوانه‌ها که در این حالت به صورت پادساعتگرد است، جریان سیال در این ناحیه با سرعت بیشتری به دریچه خروجی هدایت می‌شود. از سوی دیگر، واضح است که با توجه به فاصله بیشتر استوانه‌های چرخان نسبت به دیواره گرم محفظه در چیدمان B، مقدار بیشینه عدد ناسلت نسبت به سایر حالت‌ها، مقدار کمتری دارد.

با توجه به اینکه چیدمان استوانه‌های چرخان جز پارامترهای طراحی محفظه و تأثیرگذار بر جریان و انتقال حرارت می‌باشد، لازم است تأثیر آن بر افزایش انتقال حرارت متوسط نیز بررسی گردد. به عنوان معیار مناسبی از افزایش انتقال حرارت، نسبت عدد ناسلت متوسط با حضور استوانه‌های چرخان به عدد ناسلت متوسط بدون استوانه‌های چرخان بر حسب چیدمان‌های



(الف) چیدمان A

(ب) چیدمان B

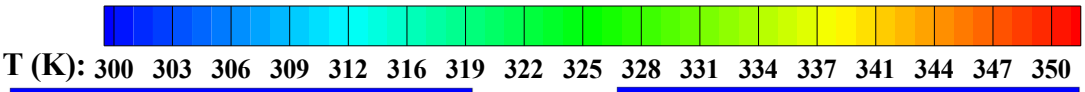
(ج) چیدمان C

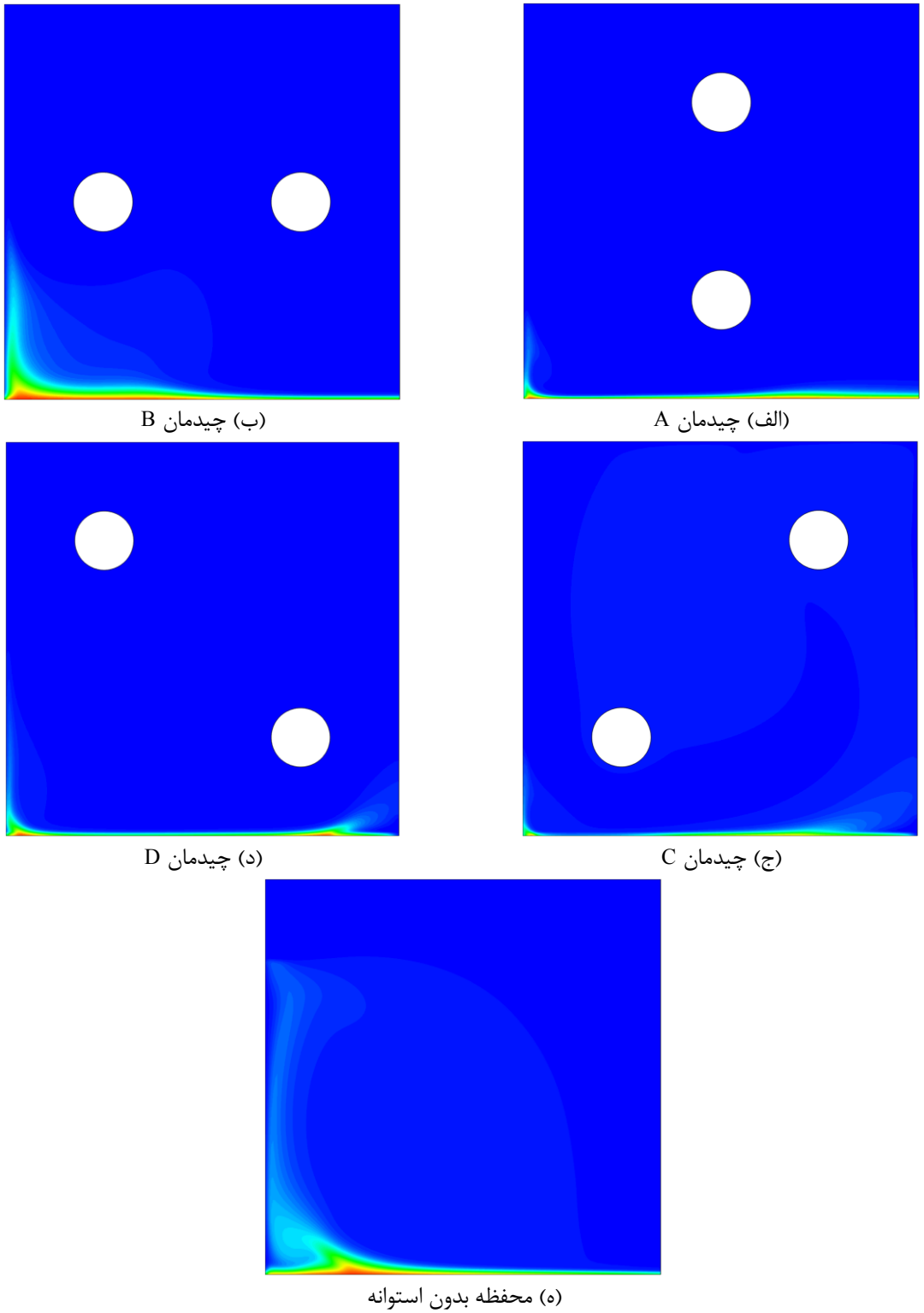
(د) چیدمان D

(ه) محفظه بدون استوانه

شکل ۹. خطوط جریان (φhnf =۰/۰۱, Re=۵۰۰, Ω=+۵)

Fig. 9. Streamlines (φhnf =0.01, Re=500, Ω=+5)





(الف) چیدمان A

(ب) چیدمان B

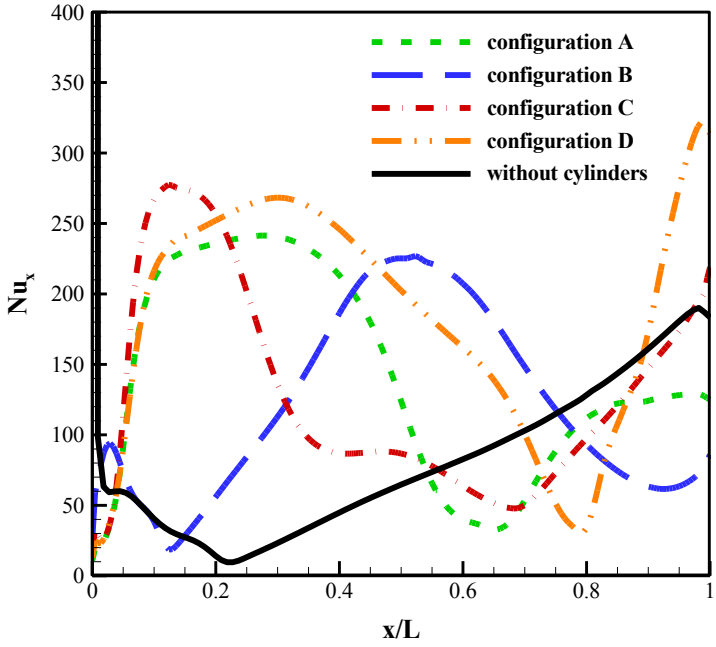
(ج) چیدمان C

(د) چیدمان D

(ه) محفظه بدون استوانه

شکل ۱۰. توزیع دما (φhnf =۰/۰۱, Re=۵۰۰, Ω=+۵)

Fig. 10. Temperature distribution (φhnf =0.01, Re=500, Ω=+5)



شکل ۱۱. توزیع عدد ناسلت روی دیواره پایین محفظه برای چیدمان‌های مختلف (φhnf =۰/۰۱, Re=۵۰۰, Ω=+۵)

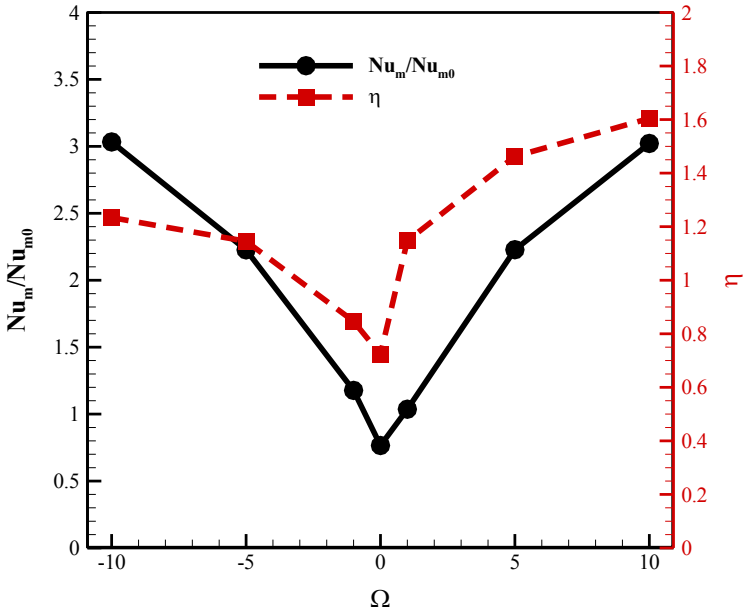
Fig. 11. Longitudinal evolution of the Nusselt number on the bottom wall of cavity for different configurations (φhnf =0.01, Re=500, Ω=+5)

جدول ۶. نسبت عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین محفظه و شاخص ارزیابی عملکرد برای چیدمان‌های مختلف استوانه‌های چرخان درون محفظه (φhnf =۰/۰۱, Re=۵۰۰, Ω=+۵)

Table 6. Ratio of average Nusselt number on the bottom wall of cavity and performance evaluation criteria for different configurations of rotating cylinders in cavity (φhnf =0.01, Re=500, Ω=+5)

تعداد استوانه‌های چرخان درون محفظه	$Nu_m / Nu_{m.}$	η
۲ استوانه	۲٫۳۹	۱٫۲۵
۳ استوانه	۲٫۵۵	۱٫۲۳
۴ استوانه	۳٫۶۵	۱٫۱۲

مختلف عدد رینولدز ۵۰۰، سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان ۵+ و به ازای کسر حجمی ۰٫۰۱ در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است، در تمامی حالت‌ها مقدار نسبت افزایش عدد ناسلت متوسط در حضور استوانه‌های چرخان بزرگتر از ۱ می‌باشد که نشان‌دهنده مؤثر بودن حضور استوانه‌های چرخان بر افزایش انتقال حرارت درون محفظه می‌باشد. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به ازای چیدمان D، مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط حدود ۱۲۹٪ می‌باشد. از سوی دیگر، با توجه به تغییر در الگوی جریان و اندازه گردابه‌های درون محفظه به دلیل حضور استوانه‌های چرخان، افت فشار نیز دچار تغییر می‌شود. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور استوانه‌ها، شاخص ارزیابی عملکرد (η) برای چیدمان‌های مختلف نیز در جدول ۶ ارائه شده است. براساس این جدول، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط مقداری



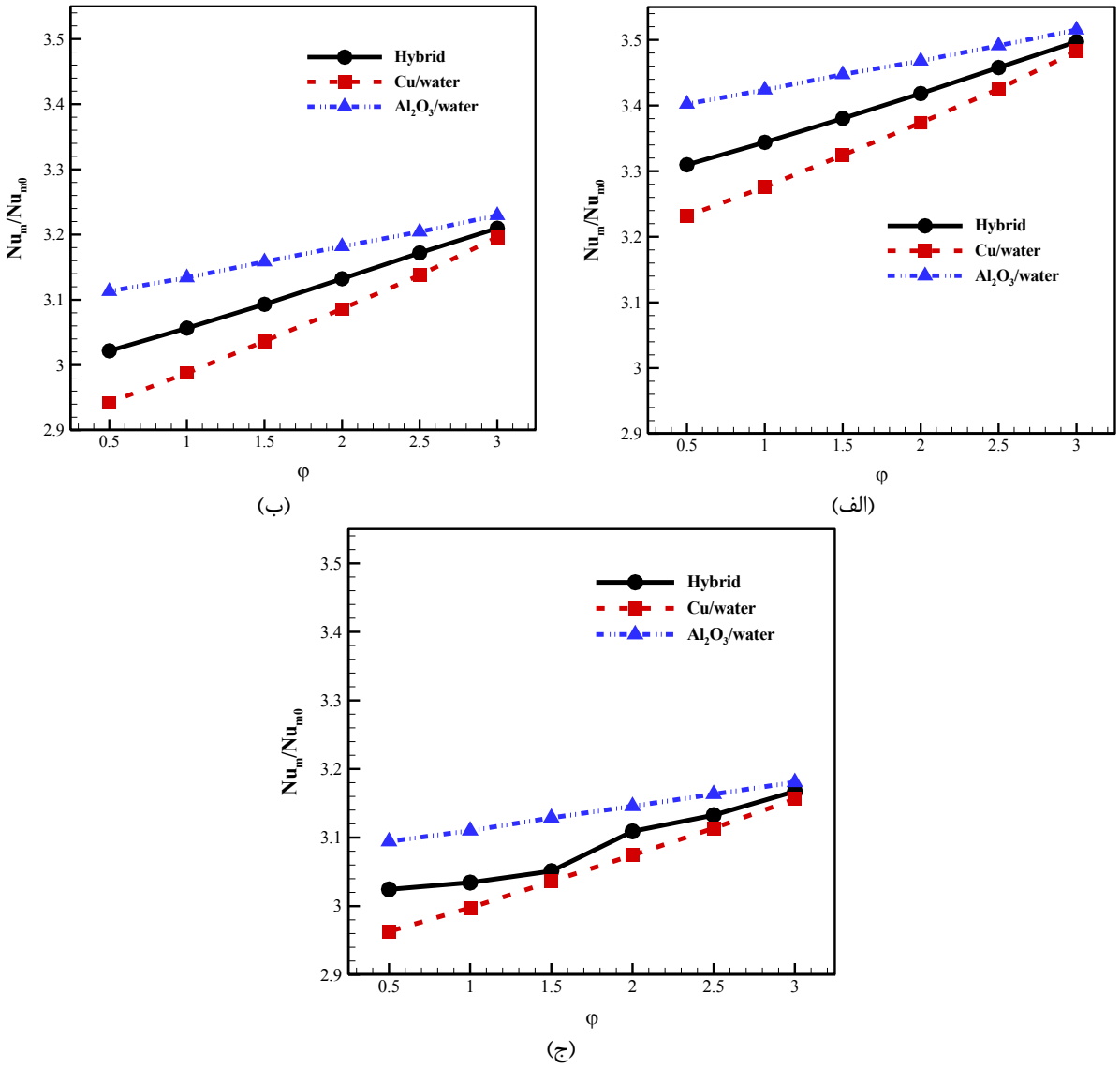
شکل ۱۲. نسبت عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین محفظه و شاخص ارزیابی عملکرد برای سرعت چرخشی متفاوت استوانه‌های چرخان برای چیدمان D (φhnf =۰/۰۳, Re=۲۵۰)

Fig. 12. Ratio of average Nusselt number on the bottom wall of cavity and performance evaluation criteria for different rotational velocity of of rotating cylinders for configuration D (φhnf =0.03, Re=250)

بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن حضور استوانه‌های چرخان بر راندمان حرارتی می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، چیدمان D دارای بیشترین مقدار شاخص ارزیابی عملکرد می‌باشد. با توجه به اینکه چیدمان D نسبت به سایر چیدمان‌ها، افزایش انتقال حرارت و همچنین شاخص ارزیابی عملکرد بیشتری دارد، در بخش‌های بعدی به عنوان چیدمان بهینه برای ارزیابی سایر پارامترهای تأثیرگذار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۶- ۳- تأثیر سرعت زاویه‌ای استوانه‌های چرخان

در این بخش، تأثیر سرعت زاویه‌ای استوانه‌های چرخان بر انتقال حرارت نانوسیال ترکیبی و همچنین تأثیر آن بر شاخص ارزیابی عملکرد مورد بررسی قرار گرفته شده است. در شکل ۱۲ نسبت عدد ناسلت متوسط برای چیدمان D ب عدد ناسلت متوسط محفظه بدون استوانه چرخان و شاخص ارزیابی عملکرد بر حسب سرعت زاویه‌ای بی‌بعد استوانه‌های چرخان در عدد رینولدز ۲۵۰ و کسر حجمی نانوذرات ۰/۰۳ نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که با چرخش استوانه‌ها و افزایش Ω، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها، با انتقال سیال سرد به سمت دیواره گرم محفظه و همچنین ایجاد تغییر در لایه مرزی حرارتی، سبب افزایش عدد ناسلت می‌گردد. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در محفظه با چیدمان D، هنگامی که استوانه‌ها ساکن می‌باشند (Ω =۰)، عدد ناسلت متوسط و همچنین شاخص ارزیابی عملکرد نسبت به محفظه بدون استوانه، کاهش یافته و مقداری کمتر از ۱ دارد. براساس نتایج حاصل از این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد در هنگامی که استوانه‌های درون محفظه می‌چرخند، مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن حضور استوانه‌های چرخان و افزایش سرعت زاویه‌ای آن‌ها بر راندمان حرارتی می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با چرخش استوانه‌ها در جهت پادساعتگرد نسبت به چرخش ساعتگرد، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش چشمگیری یافته و حدود ۱٫۰۰۲ الی ۱٫۳۰۱ برابر می‌شود. به عبارت دیگر، اگرچه حضور استوانه‌ها درون محفظه موجب افت فشار بیشتر می‌گردد، اما چرخش استوانه‌ها در جهت پادساعتگرد، موجب هدایت جریان از دریچه ورودی به سمت دیواره خروجی می‌شود. در صورتی که چرخش استوانه‌ها در جهت ساعتگرد، موجب ایجاد جریان سیال مخالف با دریچه خروجی می‌شود و باعث افزایش افت فشار می‌گردد. به دلیل افزایش افت فشار در هنگام چرخش ساعتگرد، مقدار η نسبت به چرخش پادساعتگرد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳. نسبت عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین محفظه برای چیدمان D بر حسب کسر حجمی در اعداد رینولدز مختلف(Ω=+۱۰)، الف) Re=100 ب) Re=۲۵۰ ج) Re=۵۰۰

Fig. 13. Ratio of average Nusselt number on the bottom wall of cavity for configuration D based on the nanoparticles volume fraction for varios Reynolds number (Ω=+10), (a) Re=100, (b) Re=250, (c) Re=500

۶- ۴- تأثیر عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات

در این بخش، تأثیر استفاده از نانوسیالات ترکیبی، مس با پایه آب و اکسید آلومینیوم با پایه آب بر انتقال حرارت و شاخص ارزیابی عملکرد برای اعداد رینولدز و کسر حجمی در چیدمان D برای سرعت چرخشی بیشینه (Ω =+ ۱۰)، بررسی شده است. به عنوان معیار مناسبی از افزایش انتقال حرارت، نسبت عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین محفظه در حضور استوانه‌های چرخان به عدد ناسلت متوسط روی دیواره پایین محفظه بدون استوانه‌های چرخان برای سیال آب برای اعداد رینولدز و کسر حجمی مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در تمامی حالت‌ها مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب نسبت به سایر نانوسیالات (ترکیبی و مس با پایه آب)، دارای مقدار بیشینه می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه

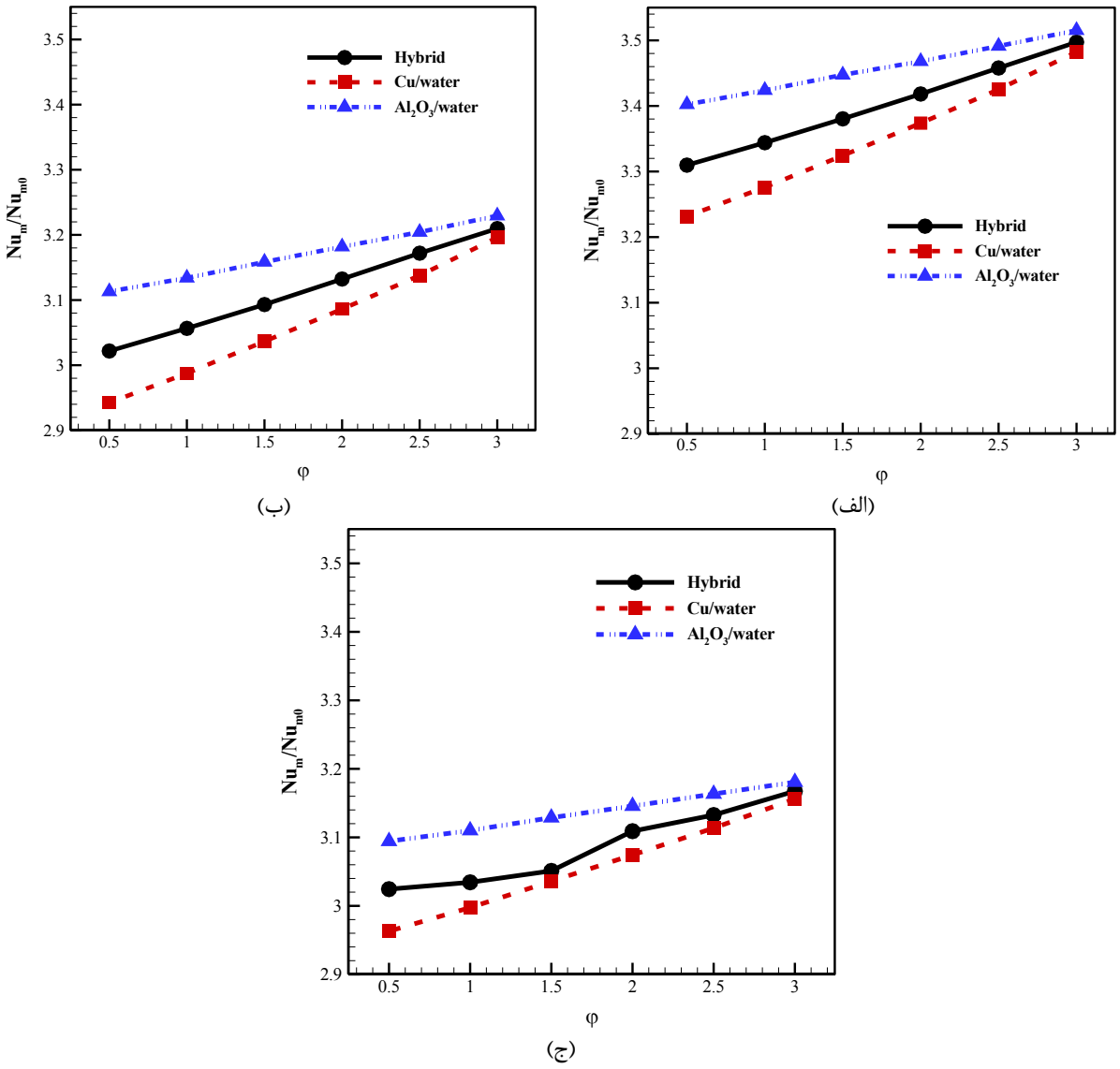
نمود که نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب به دلیل ظرفیت گرمایی ویژه بیشتر و چگالی کمتر نسبت به نانوسیال مس با پایه آب، بویژه در کسر حجمی پایین، موجب بهبود نرخ انتقال حرارت می‌گردد. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد با افزایش کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه، هدایت حرارتی سیال افزایش می‌یابد. به این ترتیب مشاهده می‌شود، نسبت عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد، به طوری که مقدار بیشینه $Nu_m / Nu_{m.}$ به ازای عدد رینولدز ۱۰۰ در کسر حجمی ۰٫۰۱، ۰٫۰۲ و ۰٫۰۳ برای نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب به ترتیب حدود ۳٫۴۲، ۳٫۴۷ و ۳٫۵۲ می‌باشد. همچنین واضح است که با افزایش کسر حجمی نانوذرات (φ=۰٫۰۳)، در اعداد رینولدز مختلف، مقدار $Nu_m / Nu_{m.}$ برای تمامی نانوسیالات تقریباً یکسان می‌شود. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، در تمامی حالت‌ها مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط برای عدد رینولدز ۱۰۰ نسبت به سایر مقادیر عدد رینولدز، دارای مقدار بیشینه می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که در اعداد رینولدز پایین، تأثیر چرخش استوانه‌ها بر افزایش انتقال حرارت بیشتر بوده و موجب افزایش چشمگیر نسبت $Nu_m / Nu_{m.}$ می‌گردد. نتایج حاکی از آن است که در تمامی مقادیر کسر حجمی نانوذرات، نسبت $Nu_m / Nu_{m.}$ برای نانوسیال ترکیبی در بازه بین مقادیر $Nu_m / Nu_{m.}$ برای نانو سیالات مس با پایه آب و اکسید آلومینیوم با پایه آب می‌باشد. همانگونه که مشاده می‌گردد، به دلیل داشتن خواص ترموفیزیکی میانگین نانوسیال ترکیبی از نانوذرات مس و اکسید آلومینیوم، مقدار افزایش عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال ترکیبی از نانوسیال مس با پایه آب بیشتر می‌باشد.

به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از افزایش کسر حجمی نانوذرات و حضور استوانه‌های چرخان درون محفظه، نتایج حاصل از شاخص ارزیابی عملکرد (η) برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات در شکل ۱۴ آمده است. براساس نتایج حاصل از این شکل، شاخص ارزیابی عملکرد در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن حضور استوانه‌های چرخان و افزایش کسر حجمی نانوذرات بر راندمان حرارتی می‌باشد. همان‌گونه که در این شکل مشخص است، با افزایش عدد رینولدز، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش می‌یابد به نحوی که مقدار بیشینه η برای نانوسیال ترکیبی و به ازای کسر حجمی ۰٫۰۳ در اعداد رینولدز ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ به ترتیب حدود ۱٫۶۰، ۱٫۷۰ و ۱٫۷۷ می‌باشد. همچنین همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تا کسر حجمی ۰٫۰۲، η برای نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب نسبت به نانوسیال ترکیبی و نانوسیال مس با پایه آب مقدار بیشتری دارد، اما با افزایش کسر حجمی، η بطور چشمگیری برای نانوسیال ترکیبی و نانوسیال مس با پایه آب افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۳ واضح است که افزایش کسر حجمی موجب افزایش انتقال حرارت می‌گردد، بنابراین به منظور افزایش نرخ انتقال حرارت و نسبت عدد ناسلت متوسط، استفاده از نانوسیال با کسر حجمی ۰٫۰۳ بهینه به نظر می‌رسد. براساس شکل‌های ۱۳ و ۱۴، اگرچه استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب موجب افزایش انتقال حرارت بیشتری می‌گردد، اما به دلیل افزایش افت فشار ناشی از اضافه شدن نانو ذرات لزوماً موجب افزایش شاخص ارزیابی عملکرد نسبت به سایر نانوسیالات نمی‌شود. مشخص است که استفاده از نانوسیال ترکیبی نسبت به نانوسیالات اکسید آلومینیوم با پایه آب و مس با پایه آب، موجب ایجاد حالت بهینه از نظر عدد ناسلت متوسط و شاخص ارزیابی عملکرد می‌گردد.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تأثیر چیدمان‌های مختلف دو استوانه چرخان درون محفظه دارای دریچه‌های ورودی و خروجی بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال ترکیبی در محدوده رژیم آرام به صورت عددی ارزیابی شده است. هدف اصلی این مطالعه، بررسی جریان نانوسیال ترکیبی درون یک محفظه با دریچه ورودی و خروجی در حضور دو استوانه چرخان و ارزیابی همزمان تأثیر پارامترهای مؤثر بر افزایش انتقال حرارت از قبیل چیدمان استوانه‌ها، عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و همچنین سرعت زاویه‌ای چرخش استوانه‌ها است. به منظور ارزیابی همزمان افزایش انتقال حرارت و افت فشار ناشی از حضور استوانه‌ها و افزایش کسر حجمی نانوذرات، شاخص ارزیابی عملکرد معرفی شده است. به‌منظور ارزیابی تأثیر موقعیت استوانه‌های چرخان بر الگوی جریان و افزایش انتقال حرارت، ۴ چیدمان مختلف (A، B، C و D) در نظر گرفته شده است. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق عبارتند از:

- نتایج حاکی از آن است که وجود استوانه‌های چرخان درون محفظه موجب انحراف جریان دریچه ورودی به سمت دیواره گرم محفظه (دیواره پایین) می‌گردد که موجب بهبود انتقال حرارت می‌گردد.
- با افزایش تعداد استوانه‌های درون محفظه از یک استوانه به دو استوانه، عدد ناسلت متوسط ۱٫۰۹ برابر شده و شاخص ارزیابی عملکرد حدود ۸۵٫۲۷٪ افزایش می‌یابد.
- نتایج حاکی از آن است که چیدمان D نسبت به سایر چیدمان‌ها، دارای بیشترین مقدار افزایش انتقال حرارت و شاخص ارزیابی عملکرد



شکل ۱۴. شاخص ارزیابی عملکرد برای چیدمان D بر حسب کسر حجمی در اعداد رینولدز مختلف (Ω=+۱۰)، الف) Re=100 ب) Re=۲۵۰ ج) Re=۵۰۰

Fig. 14. Performance Evaluation Index for configuration D based on the nanoparticles volume fraction for varios Reynolds number (Ω=+10), (a) Re=100, (b) Re=250, (c) Re=500

می‌باشد. همچنین شاخص ارزیابی عملکرد در حضور استوانه‌های چرخان در تمامی شرایط مقداری بزرگتر از ۱ دارد که نشان‌دهنده مؤثر بودن حضور استوانه‌های چرخان درون محفظه بر راندمان حرارتی می‌باشد.

- با افزایش سرعت زاویه‌ای استوانه‌ها، عدد رینولدز جریان ورودی به محفظه و کسر حجمی، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش می‌یابد.
- نتایج نشان می‌دهد که با چرخش استوانه‌ها در جهت پادساعتگرد نسبت به چرخش ساعتگرد، شاخص ارزیابی عملکرد افزایش چشمگیری یافته و حدود ۱٫۳۰ برابر می‌شود.
- با افزایش کسر حجمی نانوذرات به ۰٫۰۳، در اعداد رینولدز مختلف، مقدار $Nu_m / Nu_{m.}$ برای تمامی نانوسیالات تقریباً یکسان می‌شود، که نشان‌دهنده لزوم مقایسه شاخص ارزیابی عملکرد برای نانوسیالات مختلف می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که نانوسیال ترکیبی به دلیل داشتن خواص ترموفیزیکی میانگین نانوسیال ترکیبی از نانوذرات مس و اکسید آلومینیوم، موجب افزایش عدد ناسلت متوسط نسبت به نانوسیال مس با پایه آب و همچنین افزایش شاخص ارزیابی عملکرد نسبت به نانوسیال اکسید آلومینیوم با پایه آب می‌شود.

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)
D	قطر استوانه‌های چرخان (m)
K	ضریب هدایت حرارتی (W/m K)
L	طول محفظه (m)
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (N/m^2)
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
u	مؤلفه افقی سرعت (m/s)
U	سرعت متوسط (m/s)
v	مؤلفه عمودی سرعت (m/s)
W	طول دریچه ورودی و خروجی محفظه (m)
x_c	مختصات طولی مرکز استوانه‌های چرخان (m)
y_c	مختصات عرضی مرکز استوانه‌های چرخان (m)

علائم یونانی

Ω	سرعت زاویه‌ای بی‌بعد
η	شاخص ارزیابی عملکرد
μ	لزجت دینامیکی (kg/m s)
ρ	چگالی (kg/m^3)
φ	کسر حجمی نانوذرات
ω	سرعت زاویه‌ای ($1/s$)

زیرنویس

f	سیال پایه
in	سیال ورودی
m	متوسط
hnf	نانوسیال
$P1$	نانوذرات اکسید آلومینیوم
$P2$	نانوذرات مس
S	سطح دیواره گرم محفظه
0	مقدار اولیه

منابع

[1] G.A. Sheikhzadeh, M. Sepehrnia, M. Rezaie, M. Mollamahdi, Natural Convection of Turbulent Al2O3-Water Nanofluid with Variable Properties in a Cavity with a Heat Source and Heat Sink on Vertical Walls, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 50(6) (2019) 1237-1250. (in Persian).

[2] M. Bashir, S. Jafarmadar, S. Yekani Motlagh, S. Khalilarya, Numerical Simulation of Flow, Natural Convection and Distribution of Nano Particles Inside Trapezoidal Cavity using Buongiorno's Two-Phase Model, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 52(9) (2019) 2537-2550. (in Persian).

[3] M. Moradzadeh, B. Ghasemi, A. Raisi, Nanofluid mixed-convection heat transfer in a ventilated cavity with a baffle, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 48(3) (2016) 257-266. (in Persian).

[4] N.S. Gibanov, M.A. Sheremet, H.F. Oztop, N. Abu-Hamdeh, Mixed convection with entropy generation of nanofluid in a lid-driven cavity under the effects of a heat-conducting solid wall and vertical temperature gradient, European Journal of Mechanics-B/Fluids, 70 (2018) 148-159.

[5] B. Sharma, B. Kumar, R.N. Barman, Numerical investigation of Cu-water nanofluid in a differentially heated square cavity with conducting solid square cylinder at center, International Journal of Heat and Technology, 36(2) (2018) 714-722.

[6] R. Hassanzadeh, R. Rahimi, A. Khosravipour, S. Mostafavi, H. Pekel, Analysis of natural convection in a square cavity in the presence of a rotating cylinder with a specific number of roughness components, International Communications in Heat and Mass Transfer, 116 (2020) 104708.

[7] V. Costa, A. Raimundo, Steady mixed convection in a differentially heated square enclosure with an active rotating circular cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, 53(5-6) (2010) 1208-1219.

[8] K. Khanafer, S. Aithal, K. Vafai, Mixed convection heat

[17] A. Moghadassi, E. Ghomi, F. Parvizian, A numerical study of water based Al2O3 and Al2O3–Cu hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer, International Journal of Thermal Sciences, 92 (2015) 50-57.

[18] M.N. Labib, M.J. Nine, H. Afrianto, H. Chung, H. Jeong, Numerical investigation on effect of base fluids and hybrid nanofluid in forced convective heat transfer, International Journal of Thermal Sciences, 71 (2013) 163-171.

[19] 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.

[20] M. Ghalambaz, A. Doostani, E. Izadpanahi, A.J. Chamkha, Conjugate natural convection flow of Ag–MgO/water hybrid nanofluid in a square cavity, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 139(3) (2020) 2321-2336.

[21] A. Ghennai, R. Bessaïh, Heat transfer enhancement in a cubical cavity filled with a hybrid nanofluid, Heat Transfer, 50(2) (2021) 1658-1678.

[22] L. Koufi, Z. Younsi, Y. Cherif, H. Naji, Numerical investigation of turbulent mixed convection in an open cavity: effect of inlet and outlet openings, International Journal of Thermal Sciences, 116 (2017) 103-117.

[23] S. Balaji, S. Lakshminarayanan, Improved design of microchannel plate geometry for uniform flow distribution, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 84(6) (2006) 715-721.

[24] E. Sourtiji, S. Hosseinizadeh, M. Gorji-Bandpy, D. Ganji, Heat transfer enhancement of mixed convection in a square cavity with inlet and outlet ports due to oscillation of incoming flow, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(6) (2011) 806-814.

[25] L.M. Jasim, H. Hamzah, C. Canpolat, B. Sahin, Mixed convection flow of hybrid nanofluid through a vented enclosure with an inner rotating cylinder, International Communications in Heat and Mass Transfer, 121 (2021) transfer in a differentially heated cavity with two rotating cylinders, International Journal of Thermal Sciences, 135 (2019) 117-132.

[9] A.J. Chamkha, F. Selimefendigil, M.A. Ismael, Mixed convection in a partially layered porous cavity with an inner rotating cylinder, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 69(6) (2016) 659-675.

[10] Y.G. Park, H.S. Yoon, M.Y. Ha, Natural convection in square enclosure with hot and cold cylinders at different vertical locations, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(25-26) (2012) 7911-7925.

[11] S.H. Hussain, A.K. Hussein, Mixed convection heat transfer in a differentially heated square enclosure with a conductive rotating circular cylinder at different vertical locations, International Communications in Heat and Mass Transfer, 38(2) (2011) 263-274.

[12] M. Nazari, S. Maleki-Delarestaghi, A. Shakeri, Experimental Investigation of the Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in Curved Tubes, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 50(2) (2018) 347-358. (in Persian).

[13] A.I. Alsabery, M.A. Ismael, A.J. Chamkha, I. Hashim, Numerical investigation of mixed convection and entropy generation in a wavy-walled cavity filled with nanofluid and involving a rotating cylinder, Entropy, 20(9) (2018) 664.

[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. 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.

[16] B. Karbasifar, M. Akbari, D. Toghraie, Mixed convection of Water-Aluminum oxide nanofluid in an inclined lid-driven cavity containing a hot elliptical centric cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer, 116 (2018) 1237-1249.

105086.

[26] F. Selimefendigil, H.F. Öztop, Effects of a rotating tube bundle on the hydrothermal performance for forced convection in a vented cavity with Ag–MgO/water hybrid and CNT–water nanofluids, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, (2020) 1-18.

[27] N.A. Zainal, R. Nazar, K. Naganthran, I. Pop, Unsteady MHD stagnation point flow induced by exponentially permeable stretching/shrinking sheet of hybrid nanofluid, Engineering Science and Technology, an International Journal, (2021).

[28] H. Moayedi, Numerical analysis of the effect of baffle on heat transfer enhancement nanofluid flow over a backward facing step: A correlation for the average Nusslet number, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2020). (in Persian).

[29] H. Moayedi, Numerical investigation of the effect of oscillating injection nanofluid flow on forced convection heat transfer enhancement over a backward-facing step, The European Physical Journal Plus, 135(11) (2020) 1-19.

[30] K. Khanafer, S. Aithal, Mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity with a rotating circular cylinder, International Communications in Heat and Mass Transfer, 86 (2017) 131-142

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Moayedi, Numerical Analysis of the Effect of Configurations of Double Rotating Cylinders on Heat Transfer Enhancement Hybrid Nanofluid Flow in a Vented Cavity, Amirkabir J. Mech Eng., 54(1) (2022) 145-168.

DOI: 10.22060/mej.2021.19823.7125