Investigation of Mixed Convection Flow in a Lid-driven Cavity Filled with Micropolar Nanofluid

ARTICLE INFO

Article Type Original Research

Authors Hadizade A.¹ MSc, Haghighi Poshtiri A.*1 PhD, Bahrami A.¹ MSc

How to cite this article

Hadizade A, Haghighi Poshtiri A, Bahrami A. Investigation of Mixed Convection Flow in a Lid-driven Cavity Filled with Micropolar Nanofluid. Modares Mechanical Engineering.2019;19(6):1483-1494.

ABSTRACT

In order to evaluate the ability of micropolar fluid model to simulate nanofluids, mixed convective heat transfer of a micropolar nanofluid in a square lid-driven cavity has been numerically studied. The governing equations were solved by finite volume method, using SIMPLE algorithm. In this paper, the effect of parameters like the Grashof number, the volume fraction of nanoparticles, and micropolarity ratio on the heat transfer of Al2O3-Water nanofluid have been investigated. Also, to calculate fluid viscosity and thermal conductivity coefficient of the nanofluid, the temperature-depended variable model was used, considering the Brownian motion of the particle. The results showed that the increase in Grashof number amplifies the buoyancy force and enhances the Nusselt number as well as heat transfer rate. Also, the increases in micropolar viscosity at low Grashof numbers intensifies the forced convection and increases the Nusselt number over the hot wall. However, at Gr=105, the increase in micropolar viscosity up to K=1 leads to the decrease in the amount of heat transfer, but its further increase entails the increase in heat transfer. Although the addition of nanoparticles to the fluid improves heat transfer rate, the extent of improvement at micropolar nanofluid is lower than that in the Newtonian nanofluid.

Keywords Micropolar; Mixed Convecection; Nanofluid

CITATION LINKS

¹Mechanical Engineering Department, University of Guilan, Rasht, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, University of Guilan, Rasht, Iran Phone: -Fax: haghighi_p@guilan.ac.ir

Article History Received: June 14, 2018 Accepted: October 11, 2018 ePublished: June 01, 2019 [1] Theory of microfluids [2] Simple microfluids [3] Modeling the natural convective flow of micropolar nanofluids [4] MHD natural convection of a micropolar nanofluid flowing inside a radiative porous medium under LTNE condition with an elliptical heat source [5] Finite element study of mixed convection micropolar flow in a vertical circular pipe with variable surface conditions [6] Two-layered micropolar fluid flow through stenosed artery: Effect of peripheral layer thickness [7] Natural convection from a discrete heater in enclosures filled with a micropolar fluid [8] Natural convection in a differentially heated enclosure filled with a micropolar fluid [9] Mixed convection of micropolar fluids in a cavity [10] Natural convection flow of micropolar fluid in a rectangular cavity heated from below with cold sidewalls [11] Mixed convection from a discrete heat source in enclosures with two adjacent moving walls and filled with micropolar nanofluids [12] A treatise on electricity and magnetism [13] Mixed convection of variable properties Al2O3-EG-Water nanofluid in a two-dimensional lid-driven enclosure [14] Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids [15] Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations [16] Numerical heat transfer and fluid flow [17] Natural convection of micropolar fluid in an enclosure with boundary element method [18] Numerical simulation of unsteady mixed convection in a driven cavity using an externally excited sliding lid [19] Mixed convective heat transfer in rectangular enclosures driven by a continuously moving horizontal plate [20] Mixed convection flow in a lid-driven inclined square enclosure filled with a nanofluid

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱۴۸۴ امین هادیزاده و همکاران ــ

مطالعه جریان جابهجایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی در حفره با دیواره متحرک

امین هادیزاده MSc گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران **آرش بهرامی MSc** گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیدہ

بهمنظور بررسی قابلیت مدل سیال ریزقطبی در شبیهسازی رفتار نانوسیالها، انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی در یک محفظه مربعی بسته با دریوش متحرک مورد بررسی عددی قرار گرفته است. بدین منظور معادلات حاکم به روش حجم محدود و توسط الگوریتم سیمپل حل شدهاند. در این مقاله اثر پارامترهایی چون عدد گراشف، نسبت حجمی نانوذرات و نسبت میکروپولاریته روی انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب بررسی شده است. همچنین برای محاسبه خواص ویسکوزیته و ضریب رسانش نانوسیال از مدل خواص متغیر با دما استفاده شده است که در واقع حرکت براونی ذرات را نیز در نظر میگیرد. نتایج نشان میدهد که افزایش گراشف موجب تقویت نیروی شناوری، افزایش عدد ناسلت و میزان انتقال حرارت می شود. همچنین افزایش ویسکوزیته چرخشی در اعداد گراشف پایین منجر به تقویت جابهجایی اجباری می شود و عدد ناسلت روی دیواره پایین را افزایش میدهد، اما در عدد گراشف ۱۰۵ افزایش ویسکوزیته چرخشی تا k=۱ باعث کاهش انتقال حرارت و افزایش آن به مقداری بزرگتر، موجب افزایش انتقال حرارت می شود. افزودن نانوذرات به سیال منجر به افزایش میزان انتقال حرارت می شود، هر چند میزان افزایش انتقال حرارت در kهای غیرصفر کمتر از حالت نیوتونی است. **کلیدواژهها:** ریزقطبی، جابهجایی ترکیبی، نانوسیال

> تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۹ *نویسنده مسئول: haghighi_p@guilan.ac.ir

۱– مقدمه

در دهههای اخیر با پیشرفت تکنولوژی در زمینههای گوناگون از جمله ابزارهای الکترونیکی و کوچکترشدن ابعاد آنها به استفاده از روشهای موثرتری در انتقال حرارت نیاز میشد که منجر به تحقیقات بیشتری در این زمینه شده است. انتقال حرارت در شرایطی که علاوه بر نیروی شناوری حاصل از تغییرات چگالی، یک عامل ایجادکننده سرعت نیز در سیستم وجود داشته باشد، انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی نامیده میشود. سیالاتی مانند روغن که برای انتقال حرارت به ویژه خنکسازی استفاده میشوند، همچنین افزودن نانوذرات به سیالات پایه بهمنظور افزایش انتقال حرارت، بهطوری که استفاده از معادلات کلاسیک ناویر – استوکس برای شبیهسازی آنها از کارآیی کافی برخوردار نیست که به این گونه از سیالات غیرنیوتونی، سیال ریزقطبی گفته میشود^[1].

روانکارهای غیرنیوتنی از قبیل روانکاریهایی با ذرات افزودنی یا ذرات معلق و جامد شناور در سیال، سیال نیوتنی محسوب نمیشوند. بررسیها نشان دادهاند که تنش برشی در یک روانکار غیرنیوتنی همواره متناسب با نرخ کرنش برشی بهخصوص در نرخهای برشی بالا باقی نمیماند. از این رو برای مدل کردن این دسته از سیالات، با توجه به گستره وسیع آنها، فرمولاسیونهای مختلفی ارایه شده است^[2]. بهعنوان تحقیقی در این زمینه میتوان به پژوهش *بورانتاس* و *لوکوپولوس*^[3] در زمینه کاربرد نظریه سیال میکروپولار در توجیه رفتار غیرنیوتونی نانوسیالات اشاره نمود. آنها

جریان آرام انتقال حرارت طبیعی سیال ریزقطبی شامل ذرات نانو را درون یک محفظه مربعی بهصورت عددی مورد بررسی قرار دادند و همچنین اثر استفاده از چهار نوع ذرات نانو در نسبت حجمی و ویسکوزیته چرخشی متفاوت را بر میزان انتقال حرارت مطالعه کردند. نتایج نشاندهنده این واقعیت بود که درنظرگرفتن میکروچرخش ذرات نانو باعث مطابقت هرچه بیشتر نتایج عددی و آزمایشگاهی میشود. با افزودهشدن نانوذرات به سیال پایه، خواص فیزیکی آن تغییر میکند. از این رو برای پیشبینی خواص ترموفیزیک نانوسیال از روشهای نوینی استفاده میشود که یکی از کارآمدترین آنها درنظرگرفتن حرکات براونی نانوذرات است[4]. با توجه به کاربرد بسیار زیاد نانوسیالها برای خنکسازی در سیالات یایهای که گاهی با اضافهشدن نانوذرات، رفتار نیوتونی ندارند (مانند روغن)، نظریه سیال میکروپولار میتواند جانشین مناسبی برای توجیه این گونه رفتارها باشد. از طرفی در این پژوهش سعی شده است تا علاوه بر استفاده از نظریه سیال میکرویولار برای انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی، اثر حرکت براونی نانوذرات نیز در نظر گرفته و اثر هر دو آنها بررسی شود.

۱–۱– مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه نظریه ریزقطبی

مطالعات روی سیالاتی با ساختار میکرو توسط *جفری* آغاز شد. او مساله حرکت سیال نیوتنی که ذرات ریز فلزی در آن معلق باشد را بررسی کرد و نتایج نشان داد که ویسکوزیته سیال شامل ذرات افزودنی، بالاتر از سیال نیوتنی بدون چنین ذراتی است. همچنین تحقیقات او نشان داد که معادلات کلاسیک ناویر- استوکس برای ییشبینی رفتار چنین سیالاتی که دارای ویژگیهای میکروسکویی خاص هستند، ناکارآمد است. نظریه میکروسیالها توسط /رینگن بهمنظور بررسی رفتار برخی سیالات مانند حرکت خون حیوانات، کریستال مایع، خون نرمال انسان و سیالات واقعی با سوسپانسیون (که نظریه سیالات نیوتنی یا غیرنیوتنی، توانایی توصیف آنها را ندارد) معرفی شده است. در سیالات ریزقطبی، هر المان سیال حول مركز ثقلش دوران دارد. سيالات ريزقطبى دربردارنده برخى اثرات میکروسکوپی ناشی از تغییر شکل محلی و میکروحرکات عناصر هستند^[1, 5]. نظریه سیالات ریزقطبی قادر به توصیف برخی یدیدههای فیزیکی است که معادلات ناویر- استوکس کلاسیک نمىتواند آنها را توصيف كند. اين مدل در واقع، تعميم معادله ناویر- استوکس است که ساختار میکروسیال را در نظر میگیرد. در این نوع سیالات، علاوہ بر بردار سرعت خطی، بردار سرعت چرخشی بهمنظور مدلسازی میکروچرخشها معرفی میشود. استفاده از این نظریه برای مدلسازی سیالات حاوی ریزساختارها، یکی از پایهایترین دلایل پیدایش و ارایه این نظریه توسط *جمال ارینگن* است. از این رو تحقیقات بسیاری در زمینه سیالات شامل میکروساختار بهکمک این مدل صورت گرفته است^[2, 6, 7].

آیدین و *پاپ*^[7] در پژوهشی عددی به روش اختلاف محدود، جریان جابهجایی طبیعی سیال ریزقطبی در یک محفظه بسته را مورد مطالعه قرار دادند که شامل یک منبع حرارتی در قسمتی از دیوار سمت چپ بود. در این مساله دیوار سمت راست بهصورت مرزی با دمای سرد و ثابت و دیوارههای افقی، عایق در نظر گرفته شدند و محاسبات بهازای مقادیر مختلفی از اعداد رایلی و پرانتل و در حالتهای تمرکز ضعیف و تمرکز قوی انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش طول منبع حرارتی، نرخ انتقال حرارت افزایش پیدا میکند. علاوه بر این، هنگامی که کل طول دیوار سمت چپ تحت تاثیر منبع حرارتی باشد، میزان انتقال حرارت بیشینه است. *آیدین* و *پاپ* در پژوهشی دیگر^[8] با استفاده از روش عددی مبتنی بر

اختلاف محدود، جریان جابهجایی طبیعی آرام و پایای سیال ریزقطبی در یک محفظه بسته را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه دیوار سمت چپ گرم، دیوار سمت راست سرد و دیوارهای افقی، عایق در نظر گرفته شدند و محاسبات بهازای اعداد رایلی و یرانتل مختلف انجام شد. نتایج نشان داد نرخ انتقال حرارت در سیالات ریزقطبی کمتر از سیالات نیوتنی است. همچنین در اعداد پرانتل کوچکتر از یک، عدد ناسلت متوسط با $(RaPr)^{1/4}$ و در اعداد پرانتل بزرگتر از یک با (Ra)، متناسب است. هسو و *وانگ*^[9] جریان آرام انتقال حرارت ترکیبی سیال ریزقطبی درون یک محفظه مربعی را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، یارامترهای مختلف از جمله عدد گراشف، عدد رینولدز و ویسکوزیته بدون بعد مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که انتقال حرارت سیال ریزقطبی نسبت به سیال نیوتنی کمتر است. *سلیم* و همکاران^[10] جریان گذرا و پایای جابهجایی طبیعی سیال ریزقطبی درون یک محفظه مستطیلی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، دیوار پایین گرم، دیوار سمت راست عایق و دیوارهای سمت چپ و بالا سرد فرض شدهاند. آنها از رهیافت حجم محدود بر پایه روش ضمنی تناوبی مستقیم و حدود متواتر بالایی تخفیف برای حل عددی معادلات حاکم استفاده نمودند. در این مطالعه، نتایج بهازای مقادیر مختلف عدد رایلی، عدد یرانتل، طول محفظه و ویسکوزیته بیبعد به دست آمد و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نرخ انتقال حرارت در سیال نیوتنی نسبت به سیال ریزقطبی بیشتر است. همچنین با افزایش عدد پرانتل و عدد رایلی، میزان انتقال حرارت در سیال نیوتنی و سیال ریزقطبی افزایش مىيابد.

احمد و همکاران[11] انتقال حرارت ترکیبی سیال ریزقطبی شامل ذرات نانو را درون یک محفظه مربعی با منبع گرمایی و دو وجه متحرک، مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، چهار حالت مختلف برای حرکت دو وجه متحرک در بالا و چپ محفظه بسته را بررسی کردند، بهصورتی که هر کدام از دیوارهها میتوانند در دو جهت مختلف حرکت کنند و در مجموع چهار حالت حرکتی مختلف در محفظه مربعی بسته، برای بررسی ایجاد میشود. سیس اثر یارامترهای مختلفی از جمله عدد ریچاردسون، نوع نانوسیال، کسر حجمی ذرات و ویسکوزیته بدون بعد را در چهار حالت مختلف حرکت وجوه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش كسر حجمى نانوذرات، عدد ناسلت متوسط افزايش مىيابد. همچنین تاثیر تغییرات عدد ریچاردسون و جهت حرکت وجوه بر میزان انتقال حرارت در مقایسه با سایر پارامترها بیشتر است. در این پژوهش، اثر حرکت براونی نانوذرات در نظر گرفته نشده است. مرور مطالعات پیشین نشان میدهد که فرآیند انتقال حرارت در زمینه جابهجایی ترکیبی نانوسیالات بهعنوان گونهای از سیالات میکروپولار با درنظرگرفتن حرکات براونی ذرات جامد تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است. علاوه بر این، در مطالعه حاضر برای دیواره پایینی محفظه، شرط دمای متغیر سینوسی در نظر گرفته شده است و نقش یارامترهای مختلف از جمله عدد گراشف، رینولدز و ويسكوزيته چرخشى روى الگوى جريان و ميزان انتقال حرارت نانوسیال ریزقطبی مورد بررسی قرار میگیرد. همچنین تاثیر درنظرگرفتن حرکات براونی بر میزان انتقال حرارت مورد مطالعه قرار می گیرد. بدین صورت که مشخص خواهد شد اثر درنظرگرفتن این حرکت در مدلسازی بر میزان انتقال حرارت در محفظه چگونه خواهد بود. بهطور کلی، نوآوری پژوهش حاضر شبیهسازی جابهجایی ترکیبی نانوسیال میکرویولار در محفظه با دریوش

Volume 19, Issue 6, June 2019

..... مطالعه جریان جابهجایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی در حفره با دیواره متحرک ۱۴۸۵ متحرک و شرایط مرزی دمایی سینوسی و همچنین درنظرگرفتن حرکت براونی ذرات نانوسیال و بررسی اثرات آن است.

۲ – بیان مساله و معادلات حاکم

هندسه مورد مطالعه در پژوهش حاضر در شکل ۱ مشاهده میشود. هندسه مساله شامل یک محفظه مربعی با دیواره گرم پایینی با دمای ثابت و دیواره عایق بالایی است. دو دیواره سمت چپ و راست محفظه در دمای ثابت قرار دارند و سرد هستند.



شکل ۱) هندسه مساله

جریان سیال درون محفظه، آرام و پایا فرض شده و از تلفات لزجت نیز صرف نظر شده است. معادلات بیبعد حاکم با فرض غیرقابل تراکمبودن جریان نانوسیال و استفاده از تقریب بوزینسک بهصورت زیر است (با توجه به محدودیت صفحات از بیان توضیحات کاملتر در این قسمت خودداری شده و به منبع اصلی ارجاع داده شده است) ^[11]:

پيوستگى:

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

مومنتم در راستای x:

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{K}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) \frac{\partial N}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + K\right) \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + K\right) \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right)$$

$$(Y)$$

نومنتم در راستای y:

$$u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{K}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) \frac{\partial N}{\partial x} \\ + \left(\frac{\rho\beta_{nf}}{\rho_f\beta_f}\right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) \frac{Gr}{Re^2} T \\ + \frac{1}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + K\right) \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + K\right) \frac{\partial v}{\partial y}\right)\right)$$
(*)

میکروچرخش:

Modares Mechanical Engineering

۱۴۸۶ امین هادیزاده و همکاران ـ

$$u\frac{\partial N}{\partial x} + v\frac{\partial N}{\partial y} = -\frac{2K}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) N + \frac{K}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) + \frac{1}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}}\right) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + \frac{K}{2}\right)\frac{\partial N}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + \frac{K}{2}\right)\frac{\partial N}{\partial y}\right)\right)$$
(*)

$$\begin{aligned} u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \\ &= \frac{(\rho C_p)_f}{\operatorname{Re} \operatorname{Pr}(\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right. \end{aligned} \tag{\Delta}$$
$$&+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \end{aligned}$$

متغیرهای بیبعد استفادهشده در معادلههای ۵–۱ بهصورت زیر هستند:

$$x = \frac{x}{L}, y = \frac{y}{L}, \quad u = \frac{u}{U_0}, \quad v = \frac{v}{U_0}$$

$$T = \frac{\left(\overline{T} - \overline{T}_c\right)}{\left(\overline{T}_h - \overline{T}_c\right)}, \quad P = \frac{\overline{P}}{\rho_{nf}{U_0}^2}, N = \overline{N} \frac{L}{U_0}$$
(5)

اعداد بدون بعد که در معادلههای ۵–۱ ظاهر می شوند نیز عبارت از موارد زیر هستند:

$$\operatorname{Re} = \frac{U_0 L}{v_f}, \quad \operatorname{Gr} = \frac{g\beta_f(\overline{T}_h - \overline{T}_c)L^3}{{v_f}^2}, \quad \operatorname{K} = \frac{\kappa}{\mu_f}$$
(Y)

$$\Pr = \frac{v_f}{\alpha_f}$$
, $\operatorname{Ri} = \frac{\operatorname{Gr}}{\operatorname{Re}^2}$

ar

شرایط مرزی سرعت به صورت شرط عدم لغزش برای کلیه دیوارها و (T_h) شرایط مرزی حرارتی به صورت دیوار گرم پایین با دمای ثابت و دیوارهای جانبی با دمای ثابت (T_c) و نیز دیوار بالا عایق هستند. این شرایط مرزی برای معادلات بیبعد $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right) = 0$ بهصورت رابطه ۸ بیان می شود.

$$\begin{aligned} x &= 0 \ , 0 \leq y \leq 1 \\ u &= v = 0 \ , \qquad N = -n\frac{\partial u}{\partial x} \ , \qquad T = 0 \\ x &= 1 \ , 0 \leq y \leq 1 \\ u &= v = 0 \ , \qquad N = -n\frac{\partial u}{\partial x} \ , \qquad T = 0 \\ y &= 0 \ , \qquad 0 \leq x \leq 1 \\ u &= v = 0 \ , \qquad N = -n\frac{\partial v}{\partial y} \\ T &= T_c + (T_h - T_c)sin(\frac{\pi x}{L}) \\ y &= 1 \ , \qquad 0 \leq x \leq 1 \\ u &= 1 \ , v = 0 \ , N = -n\frac{\partial v}{\partial y} \ , \qquad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \end{aligned}$$

در رابطه ۸، مقدار n ثابت و $1 \leq n \leq 0$ است. لازم به ذکر است که اگر n=۱ باشد، به آن تمرکز قوی گفته می شود. در این حالت ذرات نزدیک دیوار قادر به چرخش نیستند و مقدار *۸=N* خواهد بود. حالت n=٠/٥ نشان مىدهد كه تانسور تنش متقارن نيست و بيانگر

ماهنامه علمی–پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

تمرکز ضعیف است^[12]. حالت n=۱ برای جریانهای لایه مرزی آشفته به کار میرود^[9]. این پژوهش تنها به حالت تمرکز قوی مىيردازد.

در این پژوهش برای محاسبه عدد ناسلت محلی و عدد ناسلت متوسط بهترتیب از روابط ۹- الف و ۹- ب استفاده شده است:

$$Nu_{Loc} = -\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right) \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0}$$
(4)
$$Nu_{Ave} = -\frac{1}{L} \int_0^L Nu \, dx$$
(4)

۲-۱- روابط مربوط به خواص ترموفیزیک نانوسیال

خواص ترموفیزیک نانوسیال شامل چگالی، گرمای ویژه، ضریب پخش حرارتی و ضریب انبساط حرارتی که برای حل معادلات (۲ تا ۵) و ۹ لازم است، از روابط ۱۰ تا ۱۴ براساس نسبت حجمی نانوسیال به دست میآیند. بهکمک خواص ترموفیزیک سیال پایه و نانوذرات اکسید آلومینیوم با قطر ٤٠نانومتر که در جدول ۱ [13] آمده است، خواص ترموفیزیک نانوسیال تکفازی از روابط زیر به دست می آیند^[14, 15]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi \rho_p \tag{1}$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \tag{W}$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_p \tag{17}$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \tag{197}$$

جدول ۱) خواص ترموفیزیک آب و نانوذرات اکسیدآلومینیوم[13]

نوع	β	k	C_p	ρ
آب	¥1×1.•-≏	•/831	4179	٩٩٧/١
اكسيدآلومينيوم	•/∧∆×\•⁻≏	۴.	٧۶۵	۳۹۲۰

در این مطالعه برای تعیین ضریب رسانش گرمایی نانوسیال از مدل ییشنهادی ماکسول - گرنت استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای درنظرگرفتن حرکت براونی نانوذرات باید مقداری را به آن اضافه نمود که وابسته به دما، نسبت حجمی و اندازه نانوذرات است[15].

(14)

$$\begin{aligned} k_{br} &= 5 \times 10^4 (8.4407 (100\varphi)^{-1.07304}) \varphi \rho_f C_{pf} \sqrt{\frac{\kappa \Gamma}{\rho_p d_p}} f(T,\varphi) \end{aligned}$$

$$f(T,\varphi) = (2.8212 \times 10^{-2}\varphi + 3.917 \times 10^{-3}) \left(\frac{\bar{T}}{\bar{T}_0}\right) \quad (1\Delta)$$

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_f - 2(k_f - k_p)\varphi}{k_p + 2k_f + (k_f - k_p)\varphi} k_f + k_{br}$$
⁽¹⁵⁾

ویسکوزیته موثر نانوسیال با درنظرگرفتن حرکت براونی بهصورت زیر به دست میآید^[4]:

$$\mu_{br} = \frac{k_{br}}{k_f} \times \frac{\mu_f}{pr} \tag{1V}$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} + \mu_{br} \tag{14}$$

۳ – حل عددی معادلات حاکم

معادلههای ۵–۱ همراه با شرایط مرزی ذکرشده به روش حجم

دوره ۱۹، شماره ۶، خرداد ۱۳۹۸

محدود گسسته سازی، ترمهای جابه جایی به روش هیبرید و ترمهای نفوذ به روش اختلاف مرکزی جبری سازی شده اند. میدان حل با روش شبکه جابه جاشده به صورت یکنواخت شبکه بندی شده است. برای حل همزمان معادله های پایا، از الگوریتم سیمپل به کمک رهیافت شبه گذرا استفاده شده است^[16]. معادلات جبری سازی شده کاملاً به هم وابسته بوده و با روش الگوریتم ماتریس سه قطری حل شده اند. بدین منظور، یک کد کامپیوتری به زبان FORTRAN 90 تهیه شده است. همگرایی زمانی حاصل می شود که حاصل معادله پیوستگی به عدد کوچک مشخصی رسیده باشد.

۳-۱- بررسی استقلال شبکه و صحتسنجی حل عددی

برای بهدستآوردن نتایج مستقل از شبکه نقاط، ناسلت میانگین در مقطع پایینی محفظه برای چندین شبکه، محاسبه و با مقایسه آنها اندازه شبکه مناسب انتخاب شده است. به این منظور، حساسیت عدد ناسلت به تغییرات شبکه در اعداد گراشف مختلف مقایسه شده و در نهایت، سیال نیوتونی در عدد گراشف ^۵۰۱ و عدد رینولدز ۱۰۰ در جدول ۲ مورد بررسی قرار گرفته است. بهمنظور استقلال از شبکه عدد ناسلت میانگین بهعنوان معیار، استفاده و در نهایت، شبکه ۱۰۰×۱۰۰ بهعنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. زیرا با کوچک کردن شبکه بیش از این مقدار تغییر قابل ملاحظهای در مقدار عدد ناسلت میانگین مشاهده نمیشود.

جدول ۳) عدد ناسلت میانگین بر دیواره گرم در اعداد رایلی و Kهای مختلف

یبی نانوسیال ریزقطبی در حفره با دیواره متحرک ۱۴۸۷	ــــــ مطالعه جريان جابهجايي تركب
	جدول ۲) بررسی استقلال از شبکه

شبکه	۴•×۴•	9•×9•	۸۰×۸۰	1×1	14•×14•
ناسلت میانگین	٨/٠٣٠٨	V/9VYY	V/953Y	٧/٩۶٣.	٧/٩۶٣٨
درصد اختلاف	-	•/Y	•/11	•/•٢	•/•Y

بهمنظور اعتبارسنجی کد نوشتهشده برای سیال میکرویولار، نتایج یژوهش حاضر با نتایج منابع مختلف^[7, 17] مقایسه شده است. در این منابع، جریان سیال ریزقطبی و انتقال حرارت طبیعی در یک محفظه مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. در دو پژوهش فوق، دیواره بالایی و پایینی محفظه عایق بوده و دیوارههای عمودی آن در دمای ثابت قرار گرفتهاند. مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در شرایط دایم برای اعداد رایلی ۱۰٬ ۱۰٬ ۱۰٬ ۱۰٬ و بهازای مقادیر K برابر با صفر و ۲ حاصل از پژوهش حاضر با نتایج این منابع در جدول ۳ مقایسه شده است. همچنین برای اعتبارسنجی کد نوشته شده برای انتقال حرارت جابه جایی ترکیبی، مقادیر عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم در حالت دایم برای اعداد گراشف ۱۰۰ و رینولدزهای مختلف با نتایج پژوهشهای پیشین^[20-18] در جدول ۴ مقایسه شده است. خطای بین نتایج بهدستآمده از کد نوشتهشده برای یژوهش حاضر با نتایج مقالات را میتوان در استفاده از روش مرتبه یایین در جبریسازی ترمهای جابهجایی و همچنین استفاده از روش عددی مبتنی بر اصلاح فشار و شبکه جداشده در پژوهش حاضر عنوان کرد.

	۱۰۳			١.,			۱۰°			١٠'		
مطالعه حاضر	منبع ^[17]	منبع ^[7]	К									
1/11&	۱/۱۱۸	۱/۱۱۸	4/450	4/413	4/422	٤/٥٣٠	٤/٥٤٠	٤/٤٨٦	۲۷۸/۸	٨/٧٤٢	٨/٩٤٥	١
١/•١٦	١/•١٧	١/•١٦	1/001	1/077	1/020	٣/٣٤٦	36/14	٣/٣١٤	٦/٧٢.	٦/٧١٤	٦/٦٧٣	۲

جدول ۴) ناسلت میانگین بر دیواره گرم در گراشف ۱۰۰ و اعداد رینولدز مختلف (اعداد داخل پرانتز، درصد اختلاف هستند)

منبع ^[20]	منبع ^[19]	منبع ^[18]	مطالعه حاضر	Ri	Re
٢/•٩•٨٣٧	۲/۰۳۱۱٦	۲/۰۲			•
(1/27)	(۱/٤٨)	(۲/•۲)	17+11	+/+1	1++
٤/١٦٢٠٥٧	٤/•٢٤٦٢	٤/٠١	6100		6
(1/21)	(1/7Y)	(٢/•٤)	27• (1	•/•• (10	2
8/001710	7/28273	٦/٤٢	7/09)	/ >	•
(•/٦١)	(1/72)	(۲/٦٦)	1/041	+/+++1	1+++

۴ – نتایج

در این مطالعه، به بررسی فرآیند انتقال حرارت ترکیبی نانوسیال اکسید آلومینیوم در محفظه مربعی شکل با دیواره متحرک بالایی پرداخته شده است. دیواره پایینی گرم، دیواره متحرک بالایی عایق و دیواره های چپ و راست عایق هستند. میدان های جریان و دما و نیز مقادیر ناسلت متوسط برای سیال ریزقطبی برای بازه عدد ریچاردسون بین ۱۰/۰ تا ۱۰، در پرانتل ۲/۶ و عدد ثابت رینولدز ۱۰۰، برای مقادیر K برابر با صفر، ۱ و ۲ ارایه شده و مورد بررسی قرار گرفته اند.

۴–۱ اثر تغییرات عدد گراشف بر انتقال حرارت

خطوط دمای ثابت و خطوط جریان در اعداد گراشف مختلف برای سیال نیوتونی (K=۰) در نمودار ۱ ارایه شدهاند. نتایج نشان میدهد که افرایش عدد گراشف در عدد رینولدز ثابت منجر به فاصلهگرفتن مرکز گردابه اولیه ناشی از نیروهای برشی بهوجودآمده توسط درپوش متحرک، از دیواره بالایی و نزدیکشدن آن به مرکز هندسی

کویتی میشود. در واقع، افزایش عدد گراشف باعث افزایش عدد بیبعد ریچارسون میشود که خود معیاری از افزایش اثر نیروی شناوری نسبت به نیروی برشی است و مکانیزم انتقال حرارت را از جابهجایی اجباری به سمت جابهجایی طبیعی سوق میدهد. همچنین مشاهده میشود که افزایش ریچارسون باعث افزایش مقدار ایسها و در نتیجه قدرت سیرکلاسیون میشود.

در حالت الف، گردابه اولیه تقریباً تمامی محفظه را در بر گرفته و دو گردابه کوچک در کنارهها تشکیل شده است که مخالف گردابه اولیه در چرخش هستند. بهدلیل غیریکنواختبودن شرایط مرزی در دیواره پایین و پیوستگی دما در گوشههای پایینی، خطوط دما در نزدیکی دیوارههای کناری بهصورت موازی و تقریباً عمود بر دیواره پایینی هستند و حالتی مشابه شرایط مرزی عایق حرارتی ایجاد شده است. همچنین با توجه به خطوط دمای ثابت و تمرکز آنها در نزدیکی دیواره گرم، دمای بیشتر نقاط سیال سرد است. در حالت ب، افزایش گراشف سبب بزرگترشدن گردابه ثانویه ناشی از نیروی شناوری میشود و گردابه کوچک سمت راست محو میشود. از طرف دیگر، لایه مرزی دما در نزدیکی دیواره رشد میکند و خطوط دمای ثابت در مجاورت دیوارههای جانبی و گوشههای پایین محفظه از حالت توازی در گراشف ۱۰۰، خارج و باعث افزایش انتقال حرارت میشود. این روند در حالت ج نیز ادامه مییابد. از طرفی با توجه به شکل خطوط جریان و تجمع خطوط دمای ثابت در نزدیکی سطح داغ دیواره پایینی در هر سه حالت، میتوان گفت که مکانیزم انتقال حرارت رسانش بهخصوص در نواحی نزدیک دیواره مکانیزم غالب است.



نمودار ۱) مقایسه خطوط جریان (راست) و خطوط همدمای (چپ) جریان در ۰=φ و ۰=K در اعداد گراشف ^۲۰۱، ^۳۰۱ و ^۲۰۱؛ الف) ^۲۰۱، ب) ^۲۰۱، ج) ^۱۰

۴–۲– اثر تغییرات ویسکوزیته ریزقطبی بر انتقال حرارت

خطوط دمای ثابت و خطوط جریان در عدد گراشف ثابت ^۱۰۴ در ضرایب میکروپولاریته مختلف در نمودار ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که با افزایش میکروپولاریته سیال در عدد رینولدز ثابت، گردابه اولیه ناشی از نیروهای برشی بهوجودآمده توسط درپوش متحرک، تقویت میشود. علاوه بر این، مرکز گردابه با افزایش ویسکوزیته از درپوش محفظه فاصله میگیرد و به سمت مرکز هندسی محفظه حرکت میکند. در واقع، افزایش میکروپولاریته باعث افزایش ویسکوزیته سیال میشود که در نتیجه موجب تقویت سیرکلاسیون و متعاقباً

انتقال حرارت به شکل جابه جایی اجباری می شود. در حالت الف، گردابه اولیه تقریباً تمامی محفظه را در بر گرفته و گردابه کوچکی در گوشه سمت چپ تشکیل شده که مخالف گردابه اولیه در چرخش است. همچنین با توجه به خطوط دمای ثابت و تمرکز آنها در نزدیکی دیواره گرم، دمای بیشتر نقاط سیال سرد است. در حالت ب، با افزایش میکروپولاریته گردابه ثانویه ناشی از نیروی شناوری، کوچک می شود که این خود نشان از افزایش اثر نیروهای اینرسی نسبت به نیروی شناوری است. در این حالت، خطوط دمای ثابت در مجاورت دیوارههای جانبی و به خصوص در گوشه پایینی سمت چپ محفظه از حالت توازی

خارج شدهاند که بیانگر افزایش میزان انتقال حرارت در این حالت نسبت به حالت الف است. در حالت ج نیز این روند افزایش انتقال حرارت ادامه دارد. در این حالت، خطوط دمای ثابت در فاصله اندکی

. مطالعه جریان جابهجایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی در حفره با دیواره متحرک ۱۴۸۹ از سطح سرد دیواره سمت راست، به دیواره نزدیکتر شدهاند که نشاندهنده افزایش دمای توده سیال در وسط محفظه نسبت به حالات قبل است.



در نمودار ۳، خطوط دمای ثابت و خطوط جریان در گراشف ثابت ۱۰ و بهازای ضرایب میکروپولاریته مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که با افرایش میکروپولاریته در عدد رینولدز

ثابت، گردابه اولیه ناشی از حرکت درپوش بالایی تقویت میشود. در حالت الف، گردابه اولیه تقریباً تمامی محفظه را در بر گرفته و گردابههای کوچکی در گوشههای سمت چپ تشکیل شده است که

۱۴۹۰ امین هادیزاده و همکاران ــ

مخالف گردابه اولیه در چرخش هستند. همچنین با توجه به خطوط دمای ثابت و تمرکز آنها در نزدیکی دیواره گرم، دمای بیشتر نقاط سیال سرد است. شیب مثبت خطوط دمای ثابت در گوشه پایینی سمت چپ نشان میدهد که نیروی شناوری در این ناحیه، نیروی غالب است. در حالت ب، با افزایش میکروپولاریته، گردابه ثانویه ناشی از نیروی شناوری، کوچک میشود که نشان میدهد اثر جابهجایی اجباری نسبت به جابهجایی طبیعی افزایش یافته است. در این حالت، خطوط دمای ثابت در گوشه پایینی در مجاورت دیواره سمت چپ بهصورت موازیتر در آمده که نشاندهنده کاهش میزان انتقال حرارت است. در واقع در این حالت، افزایش

ویسکوزیته سبب افزایش نیروی برشی و کاهش نیروی شناوری میشود. در حالت ج، خطوط دمای ثابت در گوشه سمت چپ از توازی، خارج و دارای شیب مثبت میشوند. تغییر شیب خطوط دمای ثابت، بیانگر افزایش میزان انتقال حرارت است. زیرا در این حالت، افزایش بیش از پیش ویسکوزیته سبب غلبه نیروهای برشی بر انتقال حرارت جابهجایی در جریان میشود. مقایسه نمودار ۳ – الف تا ج نشان میدهد که مرکز گردابه با افزایش ویسکوزیته به سمت مرکز هندسی محفظه حرکت میکند. زیرا افزایش نیروی برشی ناشی از افزایش ویسکوزیته سبب میشود تا اثر وجود دیواره متحرک بالایی بیشتر به داخل جریان انتقال یابد.



نمودار ۳) مقایسه خطوط جریان (راست) و خطوط همدمای (چپ) جریان در ۰/۱-e و ^د۰۱-Gr در اعداد K؛ الف)صفر، ب) ۱، ج) ۲

۴–۳– بررسی اثر افزایش نسبت حجمی نانوسیال بر میزان انتقال حرارت

نمودار ٤، خطوط جریان و خطوط دمای ثابت در جریان نانوسیال با نسبت حجمی صفر و ۰/۰۰ را در گراشف ۰۰۰ و برای ۰=k (الف) و ۲=۲ (ب) نمایش میدهد. افزایش نسبت حجمی با توجه به معادلات ۱۸ و ۱۹ منجر به افزایش رسانش حرارتی و ویسکوزیته میدهد که با افزایش نسبت حجمی نانوسیال، لایه مرزی دمایی نزدیک دیواره گرم رشد میکند و باعث فاصله گرفتن خطوط دمای ثابت مجاور دیواره از سطح آن میشود که آن را میتوان به افزایش ضریب رسانش حرارتی نانوسیال مربوط دانست. از

مطالعه جریان جابهجایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی در حفوه با دیواوه متحرک ۱۶۹۱ طرفی، افزایش ویسکوزیته نانوسیال موجب تقویت نیروهای برشی و رشد لایه مرزی حرارتی در مجاورت دیواره سمت چپ میشود که نتیجه آن افزایش میزان انتقال حرارت در نانوسیال است. در حالت ب نیز فرآیندی مطابق حالت پیش اتفاق میافتد، اما اثر تغییرات ویسکوزیته ناشی از افزایش نسبت حجمی نانوذرات در این حالت بهدلیل غالببودن انتقال حرارت رسانش بر جریان، کمتر است. به عبارت دیگر، علت اصلی افزایش انتقال حرارت، افزایش ضریب رسانش حرارتی است. به همین دلیل، کاهش قدرت سیرکلاسیون در حالت ب در مقایسه با حالت پیشین (الف) کمتر بوده که این تفاوت از مقایسه خطوط جریان قابل نتیجهگیری است.



نمودار ۴) مقایسه خطوط جریان (چپ) و خطوط همدمای (راست) جریان در ۹-۱/ φ=۰/۱ در اعداد K؛ الف)صفر، ب) ۲

۴-۴- تغییرات عدد ناسلت میانگین

نمودار ۵ نشان میدهد که با افزایش Gr، عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم پایینی افزایش مییابد. این امر به علت افزایش میزان انتقال حرارت با افزایش قدرت نیروی شناوری نانوسیال است. در k=۰ افزایش میزان عدد ناسلت میانگین با افزایش عدد گراشف، نسبت به دو حالت دیگر (k=۱ و k=۲) بیشتر است. دلیل این امر افزایش ویسکوزیته کلی نانوسیال با افزایش k است. علاوه بر این، نتایج نشان میدهد که افزایش ویسکوزیته میکروپولار در گراشف ^۰۱۰ باعث کاهش نیروی شناوری و افزایش عدد ناسلت میانگین نشان که این پدیده خود را به شکل کاهش عدد ناسلت میانگین نشان داده است. تداوم فرآیند افزایش ویسکوزیته میکروپولار، جریان را

به سمتی میبرد که افزایش انتقال حرارت جابهجایی ناشی از نیروهای برشی موجب افزایش انتقال حرارت کلی میشود و در نتیجه مطابق با نمودار ۵، عدد ناسلت میانگین افزایش مییابد. تغییرات عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم با تغییر کسر حجمی نانوسیال در نمودار ۶ نمایش داده شده است. مشاهده میشود که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، عدد ناسلت میانگین همواره افزایش مییابد. علاوه بر این، نتایج نشان میدهد که میزان افزایش انتقال حرارت با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در گراشف افزایش انتقال حرارت با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در گراشف ویسکوزیته، ضریب رسانش حرارتی نانوسیال نیز افزایش مییابد و اثر همزمان این دو عامل سبب افزاش بیشتر میزان انتقال حرارت

۱۴۹۲ امین هادیزاده و همکاران

در نانوسیال میشود و به صورت موازی در تقویت انتقال حرارت، موازی عمل میکنند.



 φ =۰ نمودار ۵) تغییر عدد ناسلت میانگین برحسب اعداد K و Gr در Gr نمودار ۵)



نمودار ۶) تغییر عدد ناسلت میانگین برحسب نسبت حجمی نانوسیال در اعداد گراشف مختلف و ۰=K

نمودار ۲، تغییرات عدد ناسلت میانگین را در عدد گراشف ۱۰۴ با تغییر نسبت حجمی نانوذرات در kهای مختلف نشان میدهد. براساس این نمودار، شیب نمودار ناسلت میانگین محاسبهشده روی سطح گرم برحسب نسبت حجمی نانوذرات، با افزایش ویسکوزیته میکروپولار کاهش مییابد. زیرا با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، ضریب رسانش حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال افزایش مییابد. با توجه به غالببودن مکانیزم انتقال حرارت رسانش در جریان، اثر افزایش نسبت کسر حجمی نانوذرات بر میزان انتقال حرارت بسیار بیشتر از اثر افزایش ویسکوزیته بر آن است. از طرفی افزایش ویسکوزیته میکروپولار موجب افزایش ویسکوزیته کلی سیال میشود و اثر افزایش ویسکوزیته ناشی از افزایش نسبت

حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت را نامحسوستر میکند. به همین دلیل در Kهای کوچکتر، اثر افزایش نسبت حجمی نانوذرات بر میزان انتقال حرارت بیشتر است.



نمودار ۲) تغییر عدد ناسلت میانگین برحسب نسبت حجمی نانوسیال در اعداد K مختلف و °۲=۱۰

۴–۵– بررسی درنظرگرفتن اثر حرکت براونی نانوذرات در انتقال حرارت نانوسیال

در این قسمت، عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم در دو حالت مختلف با درنظرگرفتن یا نگرفتن حرکت براونی نانوذرات در خواص ترموفیزیک نانوسیال به دست آمده است. در حالت اول، برای تعیین خواص ترموفیزیک نانوسیال از مدل خواص متغیر که حرکت براونی نانوذرات را در نظر گرفته باشد، استفاده شده و در حالت دوم از مدل خواص ثابت، بدون درنظرگرفتن حرکت براونی نانوذرات استفاده شده است.

نتایج جدول ۵ نشان میدهد که استفاده از مدل خواص متغیر برای محاسبه عدد ناسلت میانگین در مقایسه با مدل خواص ثابت همواره موجب بهدستآوردن مقادیر بیشتر نمیشود. علاوه بر این، تفاوت مقادیر بهدستآمده برای عدد ناسلت میانگین با استفاده از دو مدل مذکور، در حالت نیوتونی نسبت به میکروپولار بیشتر است. از این مشاهدات میتوان نتیجه گرفت که استفاده از نظریه سیال میکروپولار در شبیهسازی جریان نانوسیال داخل یک محفظه، بخشی از کاهش یا افزایش انتقال حرارت را که مدل خواص متغیر پیش بینی میکند، بهواسطه درنظرگرفتن ویسکوزیته چرخشی دمپ میکند. از طرفی بیشترین اختلاف در گراشفها و نسبت زیرا وجود گرادیانهای دمایی بیشتر است، مشاهده میشود. زیرا وجود گرادیانهای دمایی شدیدتر در این حالات و از طرف میشود تا اثر درنظرگرفتن حرکات براونی در این شرایط تاثیر میشود تا اثر درنظرگرفتن حرکات براونی در این شرایط تاثیر میشود تا اثر درنظرگرفتن حرکات براونی در این شرایط تاثیر

جدول ۵) عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم در دو حالت (حالت اول با درنظرگرفتن حرکت براونی و حالت دوم بدون درنظرگرفتن حرکت براونی)

	•/•Y			•/•٦			•/\•		جمى	نسبت ح
حالت اول	حالت دوم	اختلاف%	حالت اول	حالت دوم	اختلاف%	حالت اول	حالت دوم	اختلاف%	К	Gr
٣/٧١٨٠	٣/٧١٩٩	_•/•011	4/.140	٤/٠٢٨٣	_•/۲٦٨١	٤/٣٣٣١	٤/٣٥١٩	-•/٤٣١٩	•	1.Y
٣/٣٥٠٠	0/3277	+•/•07٣	0/07+9	0/0797	-•/10•1	۵/۷.۶۲	٥/٧٢٣٨	_•/٣•Y0	٢	1•
٣/٨١٢٥	٣/٨١٤٤	-•/•£9A	٤/١٠٦١	٤/١١٧٢	-•/४٦٩٦	£/£10Y	٤/٤٣٤٨	-•/٤٣•V	•	۰, ۳
0/274	0/270+	++/+021	0/02+9	0/0294	-•/1297	0/7721	0/7201	-•/٣•٨١	۲	1•
4/2422	٤/٥٤٥٥	•/••••١	٤/٨٢٠٤	٤/٨٣١٤	-+/7777	0/1+29	0/1701	-•/٣٩٤١	•	ر د
0/0777	0/0371	+•/•7YA	0/7777	0/7270	-•/\WYY	0/932.	0/9017	-+/Y90Y	٢	1•
Y/1908	V/IVOY	+•/۲٨•١	Y/09+1	Y/0179	++/+277	٧/٩٦٣.	٧/٩٧٣٤	-+/0+7Y	•	
7/7032	7/7819	+•/١٧٩١	٦/٩٦٣٠	7/9702	-•/•٣٤0	٧/٢٨٢.	V/2972	-•/1927	٢	1+

ماهنامه علمی– پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۹، شماره ۶، خرداد ۱۳۹۸

۵- نتیجهگیری

در این پژوهش، انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی اکسید آلومینیوم – آب در یک محفظه مربعی بسته با دریوش متحرک مورد بررسی عددی قرار گرفته است. دیواره پایینی محفظه دارای شرط مرزی دمایی سینوسی گرم و دو دیواره کناری سرد در نظر گرفته شدهاند، در حالی که دیواره متحرک، عایق است. اثر یارامترهایی چون عدد گراشف (۲۰–۱۰)، نسبت حجمی، نسبت میکروپولاریته (۲–۰) روی نانوسیال بررسی شده است. همچنین برای محاسبه خواص ترموفیزیک نانوسیال از مدل متغیر استفاده و نسبت حجمی نانوذرات بین صفر تا ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

وجود صفحه گرم یایینی موجب ایجاد نیروی شناوری درون سیال و از طرف دیگر نیروی برشی اعمال شده توسط صفحه متحرک باعث ایجاد حرکت در سیال می شود.

نتایج نشان میدهد که افزایش گراشف موجب تقویت نیروی شناوری، افزایش عدد ناسلت و انتقال حرارت می شود. همچنین افزایش ویسکوزیته چرخشی در گراشفهای پایین منجر به تقویت جابهجایی اجباری میشود و عدد ناسلت روی دیواره پایین را افزایش میدهد. اما در گراشف ۱۰٬۰ افزایش نیروی شناوری افزایش ویسکوزیته چرخشی تا K=۱ باعث کاهش انتقال حرارت و افزایش بيشتر آن موجب افزايش انتقال حرارت مىشود.

افزودن نانوذرات به سيال باعث افزايش ميزان انتقال حرارت می شود، هر چند که این افزایش میزان انتقال حرارت در نانوسیال میکروپولار کمتر از حالت نیوتونی است. ناسلت میانگین محاسبه شده روی سطح گرم برحسب نسبت حجمی نانوذرات، با افزایش ویسکوزیته میکروپولار کاهش مییابد. بهعبارتی در Kهای

کوچک تر اثر افزایش نسبت حجمی بر انتقال حرارت بیشتر است. مقایسه بین استفاده از دو مدل خواص ثابت و خواص متغیر برای محاسبه خواص ترموفيزيك نانوسيال آب– اكسيد آلومينيوم، نشان میدهد که استفاده از مدل خواص متغیر برای محاسبه عدد ناسلت میانگین در مقایسه با مدل خواص ثابت همواره موجب بهدست آوردن مقادیر بیشتر نمی شود. علاوه بر این، تفاوت مقادیر بهدستآمده برای عدد ناسلت میانگین با استفاده از دو مدل مذکور، در حالت نبوتونی نسبت به میکروپولار بیشتر است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است. **تایبدیه اخلاقی:** موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است. **تعارض منافع:** موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است. سهم نویسندگان: امین هادیزاده (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/یژوهشگر اصلی//نگارنده بحث (۳۳/٤%)؛ امین حقیقییشتیری (نویسنده دوم)، روششناس/یژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۳/۳%)؛ آرش بهرامی (نویسنده سوم)، ایژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳۳/۳%) **منابع مالی:** موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

۶ ـ پىنوشت

- علايم ظرفیت حرارتی (JKg⁻¹K⁻¹) C_p
 - شتاب گرانش (ms⁻²) g
 - عدد گراشف Gr
 - عدد نسبت ميكروپولاريته К
- ضریب هدایت گرمایی (Wm⁻¹K⁻¹) k
 - طول و عرض حفرہ (m) L
- شاخص میکروچرخش عمود بر سطح دیواره n

- سرعت زاویهای بیبعد Ν عدد ناسلت Nu
 - فشار بىبعد Р
 - \overline{P} فشار (kgm⁻¹s⁻²) عدد پرانتل Pr
 - عدد رينولدز
 - Re عدد ریچاردسون Ri
 - Т دمای بیبعد
 - \overline{T} دما (K)
- سرعت دیوارہ متحرک (ms⁻¹) U_0
- سرعت بیبعد در جهات x و y u, vسرعت در جهات x و x (ms⁻¹)
 - \bar{u}, \bar{v} مختصات كارتزين بىبعد x, y
 - مختصات كارتزين \bar{x}, \bar{y}

علايم يونانى

ρ

α

φ

κ

ĸ

β

- لزجت دینامیک (kgm⁻¹s⁻¹) μ
 - چگالی (kgm⁻³)
- عمر متوسط موضعی هوا (s) τ υ
 - لزجت سینماتیک (m²s⁻¹)
 - $(m^2 s^{-1})$ پخش حرارتی
 - نسبت حجمى نانوذرات ثابت بولتزمن (JK⁻¹)
- لزجت چرخشی (N s m⁻²)
- ضریب انبساط حرارتی (K⁻¹)
 - زيرنويسها

air	هوا
Avg	مقدار متوسط
br	براونی
с	سرد
f	سيال پايه
h	گرم
Loc	محلى
nf	نانو سيال
р	نانوذره جامد

منابع

1- Eringen AC. Theory of microfluids. Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 1966;16:1-18.

2- Cemal Eringen A. Simple microfluids. International Journal of Engineering Science. 1964;2(2):205-217.

3- Bourantas GC, Loukopoulos VC. Modeling the natural convective flow of micropolar nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2014;68:35-41.

4- Hashemi H, Namazian Z, Hashem Zadeh SM, Mehryan SAM. MHD natural convection of a micropolar nanofluid flowing inside a radiative porous medium under LTNE condition with an elliptical heat source. Journal of Molecular Liquids. 2018;271:914-925.

5- Bhargava R, Agarwal RS, Kumar L, Takhar HS. Finite element study of mixed convection micropolar flow in a vertical circular pipe with variable surface conditions. International Journal of Engineering Science. 2004;42(1):13-27.

6- Ikbal MA, Chakravarty S, Mandal PK. Two-layered micropolar fluid flow through stenosed artery: Effect of peripheral layer thickness. Computers and Mathematics with Applications. 2009;58(7):1328-1339.

7- Aydin O, Pop I. Natural convection from a discrete heater in enclosures filled with a micropolar fluid. International Journal of Engineering Science. 2005;43(19-20):1409-1418.

8- Aydın O, Pop I. Natural convection in a differentially heated enclosure filled with a micropolar fluid. enclosure utilizing nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003;46(19):3639-3653.

15- Vajjha RS, Das DK. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009;52(21-22):4675-4682.

16- Patankar SV. Numerical heat transfer and fluid flow. Boca Raton: CRC Press; 1980.

17- Zadravec M, Hriberšek M, Škerget L. Natural convection of micropolar fluid in an enclosure with boundary element method. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2009;33(4):485-492.

18- Khanafer KM, Al-Amiri AM, Pop I. Numerical simulation of unsteady mixed convection in a driven cavity using an externally excited sliding lid. European Journal of Mechanics B Fluids. 2007;26(5):669-687.

19- Waheed MA. Mixed convective heat transfer in rectangular enclosures driven by a continuously moving horizontal plate. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009;52(21-22):5055-5063.

20- Abu-Nada E, Chamkha AJ. Mixed convection flow in a lid-driven inclined square enclosure filled with a nanofluid. European Journal of Mechanics B Fluids. 2010;29(6):472-482.

International Journal of Thermal Sciences. 2007;46(10):963-969.

9- Hsu TH, Wang SG. Mixed convection of micropolar fluids in a cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2000;43(9):1563-1572.

10- Saleem M, Asghar S, Hossain MA. Natural convection flow of micropolar fluid in a rectangular cavity heated from below with cold sidewalls. Mathematical and Computer Modelling. 2011;54(1-2):508-518.

11- Ahmed SE, Mansour MA, Hussein AK, Sivasankaran S. Mixed convection from a discrete heat source in enclosures with two adjacent moving walls and filled with micropolar nanofluids. Engineering Science and Technology an International Journal. 2016;19(1):364-376.

12- Maxwell JC. A treatise on electricity and magnetism. Wotton-under-Edge: Clarendon Press; 1973.

13- Sheikhzadeh GA, Khorasanizadeh H, Ghaffari SP. Mixed convection of variable properties Al2O3-EG-Water nanofluid in a two-dimensional lid-driven enclosure. Transport Phenomena in Nano and Micro Scales. 2013;1(2):75-92.

14- Khanafer K, Vafai K, Lightstone M. Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional