



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-dependend 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 increase 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 Convection; Nanofluid

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

CITATION LINKS

[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

مطالعه جریان جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی در حفره با دیواره متحرک

امین هادی زاده MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

امین حقیقی‌پشتیری* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

آرش بهرامی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

به منظور بررسی قابلیت مدل سیال ریزقطبی در شبیه‌سازی رفتار نانوسیال‌ها، انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی در یک محفظه مربعی بسته با درپوش 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 می‌شود. همچنین افزایش ویسکوزیته چرخشی در اعداد گراشف پایین منجر به تقویت جابه‌جایی اجباری می‌شود و عدد ناسلت روی دیواره پایین را افزایش می‌دهد، اما در عدد گراشف ۱۰۵ افزایش ویسکوزیته چرخشی تا $k=1$ باعث کاهش انتقال حرارت و افزایش آن به مقداری بزرگ‌تر، موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود. افزودن نانوذرات به سیال منجر به افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود. هر چند میزان افزایش انتقال حرارت در k های غیرصفر کمتر از حالت نیوتونی است.

کلیدواژه‌ها: ریزقطبی، جابه‌جایی ترکیبی، نانوسیال

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۱۹

*نویسنده مسئول: haghghi_p@guilan.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌های گوناگون از جمله ابزارهای الکترونیکی و کوچک‌تر شدن 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 به‌ویژه خنک‌سازی استفاده می‌شوند، همچنین افزودن نانوذرات به سیالات پایه به منظور افزایش انتقال حرارت، باعث ایجاد گونه‌ای از سیالات با ذرات معلق در آن می‌شود، به طوری که استفاده از معادلات کلاسیک ناویر- استوکس برای شبیه‌سازی آنها از کارایی کافی برخوردار نیست که به این گونه از سیالات غیرنیوتونی، سیال ریزقطبی گفته می‌شود [1].

روانکارهای غیرنیوتونی 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 مدل‌کردن این دسته از سیالات، با توجه به گستره وسیع آنها، فرمولاسیون‌های مختلفی ارائه شده است [2]. به‌عنوان تحقیقی در این زمینه می‌توان به پژوهش بوراتاس و لوکویولوس [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 در نظرگرفتن میکروچرخش ذرات نانو باعث مطابقت هرچه بیشتر نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌شود. با افزودن 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 در نظرگرفتن حرکات براونی نانوذرات است [4]. با توجه به کاربرد بسیار زیاد نانوسیال‌ها برای خنک‌سازی در سیالات پایه‌ای 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 میکروپولار 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

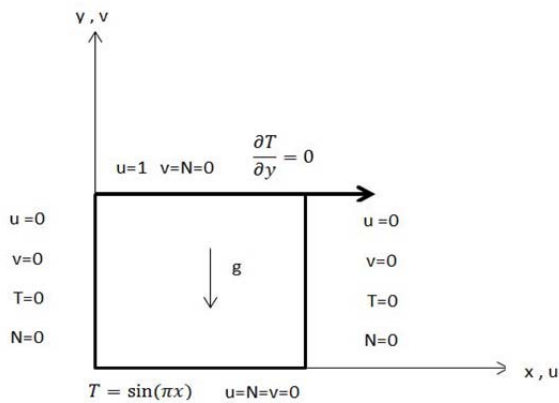
مطالعات روی سیالاتی با ساختار میکرو توسط جفری آغاز شد. او مساله حرکت سیال نیوتنی که ذرات ریز فلزی در آن معلق باشد را بررسی کرد و نتایج نشان داد که ویسکوزیته سیال شامل ذرات افزودنی، بالاتر از سیال نیوتنی بدون چنین ذراتی است. همچنین تحقیقات او نشان داد که معادلات کلاسیک ناویر- استوکس برای پیش‌بینی رفتار چنین سیالاتی که دارای ویژگی‌های میکروسکوپی خاص هستند، ناکارآمد است. نظریه میکروسیال‌ها توسط ارینگن 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 مرکز ثقلش دوران دارد. سیالات ریزقطبی دربردارنده برخی اثرات میکروسکوپی ناشی از تغییر شکل محلی و میکروحرکات عناصر هستند [5]. نظریه سیالات ریزقطبی قادر به توصیف برخی پدیده‌های فیزیکی است که معادلات ناویر- استوکس کلاسیک نمی‌تواند آنها را توصیف کند. این مدل در واقع، تعمیم معادله ناویر- استوکس است که ساختار میکروسیال را در نظر می‌گیرد. در این نوع سیالات، علاوه 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 آرایه این نظریه توسط جمال/ارینگن است. از این رو تحقیقات بسیاری در زمینه سیالات شامل میکروساختار به‌کمک این مدل صورت گرفته است [6, 7].

آیدین و یاپ [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 پراتل 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 یاپ در پژوهشی دیگر [8] با استفاده از روش عددی مبتنی بر

متحرک و شرایط مرزی دمایی سینوسی و همچنین در نظر گرفتن 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 تراکم بودن جریان نانوسیال و استفاده از تقریب بوزینسک به صورت 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]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

مومنتم در راستای x:

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

مومنتم در راستای y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{K}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \right) \frac{\partial N}{\partial x} + \left(\frac{\rho_f \beta_{nf}}{\rho_f \beta_f} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \right) \frac{Gr}{Re^2} T + \frac{1}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + K \right) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + K \right) \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right) \quad (3)$$

میکروچرخش:

اختلاف محدود، جریان جابه‌جایی طبیعی آرام و پایای سیال ریزقطبی در یک محفظه بسته را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه دیواره سمت چپ گرم، دیواره سمت راست سرد و دیواره‌های افقی، عایق در نظر گرفته شدند و محاسبات به‌ازای اعداد رایلی و پرانتل 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 $(Ra)^{1/4}$ 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، پارامترهای 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، دیواره پایین گرم، دیواره سمت راست عایق و دیواره‌های 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 پرانتل، 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 می‌یابد.

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. سپس اثر پارامترهای 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 کسر حجمی نانوذر، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. 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 نانوذر 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 در نظر گرفتن 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 پارامترهای مختلف از جمله عدد گراشف، رینولدز و ویسکوزیته چرخشی روی الگوی جریان و میزان انتقال حرارت نانوسیال ریزقطبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین تاثیر در نظر گرفتن حرکات براونی بر میزان انتقال حرارت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین صورت که مشخص خواهد شد اثر در نظر گرفتن این حرکت در مدل‌سازی بر میزان انتقال حرارت در محفظه چگونه خواهد بود. به‌طور کلی، نوآوری پژوهش حاضر شبیه‌سازی جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال میکروپولار در محفظه با درپوش

تمرکز ضعیف است [12]. حالت $n=1$ برای جریان‌های لایه مرزی آشفتگی به کار می‌رود [9]. این پژوهش تنها به حالت تمرکز قوی می‌پردازد.

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

$$Nu_{Loc} = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (۹-الف)$$

$$Nu_{Ave} = - \frac{1}{L} \int_0^L Nu \, dx \quad (۹-ب)$$

۱-۲- 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. به کمک خواص ترموفیزیک سیال پایه و نانوذرات اکسید آلومینیوم با قطر ۴۰ نانومتر که در جدول ۱ [13] آمده است، خواص ترموفیزیک نانوسیال تک‌فازی از روابط زیر به دست می‌آیند [14, 15]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (۱۰)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad (۱۱)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_p \quad (۱۲)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (۱۳)$$

جدول ۱) خواص ترموفیزیک آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم [13]

نوع	ρ	C_p	k	β
آب	۹۹۷/۱	۴۱۷۹	۰/۶۳۱	۲۱×10^{-3}
اکسید آلومینیوم	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	$۰/۸۵ \times 10^{-3}$

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

$$(۱۴)$$

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

$$f(T, \varphi) = (2.8212 \times 10^{-2} \varphi + 3.917 \times 10^{-3}) \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (۱۵)$$

$$+ (-3.0669 \times 10^{-2} \varphi - 3.91123 \times 10^{-3}) \quad (۱۶)$$

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

ویسکوزیته موثر نانوسیال با در نظر گرفتن حرکت براونی به صورت زیر به دست می‌آید [4]:

$$\mu_{br} = \frac{k_{br}}{k_f} \times \frac{\mu_f}{pr} \quad (۱۷)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \varphi)^{2.5}} + \mu_{br} \quad (۱۸)$$

۳- حل عددی معادلات حاکم

معادله‌های ۵-۱ همراه با شرایط مرزی ذکر شده به روش حجم

$$u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = - \frac{2K}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \right) N + \frac{K}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \right) \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{Re} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + \frac{K}{2} \right) \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} + \frac{K}{2} \right) \frac{\partial N}{\partial y} \right) \right) \quad (۴)$$

انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{(\rho C_p)_f}{Re Pr (\rho C_p)_{nf}} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) \quad (۵)$$

متغیرهای بی‌بعد استفاده شده در معادله‌های ۵-۱ به صورت زیر هستند:

$$x = \frac{\bar{x}}{L}, y = \frac{\bar{y}}{L}, u = \frac{\bar{u}}{U_0}, v = \frac{\bar{v}}{U_0} \quad (۶)$$

$$T = \frac{(\bar{T} - \bar{T}_c)}{(\bar{T}_h - \bar{T}_c)}, P = \frac{\bar{P}}{\rho_{nf} U_0^2}, N = \bar{N} \frac{L}{U_0}$$

اعداد بدون بعد که در معادله‌های ۵-۱ ظاهر می‌شوند نیز عبارت از موارد زیر هستند:

$$Re = \frac{U_0 L}{\nu_f}, Gr = \frac{g \beta_f (\bar{T}_h - \bar{T}_c) L^3}{\nu_f^2}, K = \frac{\kappa}{\mu_f} \quad (۷)$$

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

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

$$x = 0, 0 \leq y \leq 1$$

$$u = v = 0, N = -n \frac{\partial u}{\partial x}, T = 0$$

$$x = 1, 0 \leq y \leq 1$$

$$u = v = 0, N = -n \frac{\partial u}{\partial x}, T = 0$$

$$y = 0, 0 \leq x \leq 1 \quad (۸)$$

$$u = v = 0, N = -n \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$T = T_c + (T_h - T_c) \sin(\pi x / L)$$

$$y = 1, 0 \leq x \leq 1$$

$$u = 1, v = 0, N = -n \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

در رابطه ۸، مقدار n ثابت و $0 \leq n \leq 1$ لازم به ذکر است که اگر $n=1$ باشد، به آن تمرکز قوی گفته می‌شود. در این حالت ذرات نزدیک دیوار قادر به چرخش نیستند و مقدار $N=0$ خواهد بود. حالت $n=0/5$ نشان می‌دهد که تانسور تنش متقارن نیست و بیانگر

شبکه	۴۰×۴۰	۶۰×۶۰	۸۰×۸۰	۱۰۰×۱۰۰	۱۲۰×۱۲۰
ناسلت میانگین	۸/۰۳۰۸	۷/۹۷۲۲	۷/۹۶۳۲	۷/۹۶۳۰	۷/۹۶۳۸
درصد اختلاف	-	۰/۷	۰/۱۱	۰/۰۲	۰/۰۷

به‌منظور اعتبارسنجی کد نوشته‌شده برای سیال میکروپولار، نتایج پژوهش 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 10^2 ، 10^3 ، 10^4 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 نوشته‌شده برای انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی، مقادیر عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم در حالت دایم برای اعداد گراشف ۱۰۰ و رینولدزهای مختلف با نتایج پژوهش‌های پیشین [18-20] در جدول ۴ مقایسه شده است. خطای بین نتایج به‌دست‌آمده از کد نوشته‌شده برای پژوهش حاضر با نتایج مقالات را می‌توان در استفاده از روش مرتبه پایین در جبری‌سازی ترم‌های جابه‌جایی و همچنین استفاده از روش عددی مبتنی بر اصلاح فشار و شبکه جاداشده در پژوهش حاضر عنوان کرد.

محدود گسسته‌سازی، ترم‌های جابه‌جایی به روش هیبرید و ترم‌های نفوذ به روش اختلاف مرکزی جبری‌سازی شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابه‌جاشده به‌صورت یکنواخت شبکه‌بندی شده است. برای حل همزمان معادله‌های پایا، از الگوریتم سیمپل به‌کمک رهیافت شبه گذرا استفاده شده است [16]. معادلات جبری‌سازی شده کاملاً به هم وابسته بوده و با روش الگوریتم ماتریس سه‌قطری حل شده‌اند. بدین منظور، یک کد کامپیوتری به زبان FORTRAN 90 تهیه شده است. همگرایی زمانی حاصل می‌شود 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 10^4 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 100×100 به‌عنوان شبکه مناسب انتخاب شده است. زیرا با کوچک‌کردن 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 K های مختلف

K	10^1			10^2			10^3		
	منبع [7]	منبع [17]	مطالعه حاضر	منبع [7]	منبع [17]	مطالعه حاضر	منبع [7]	منبع [17]	مطالعه حاضر
۱	۸/۹۴۵	۸/۷۴۲	۸/۸۷۶	۴/۴۸۶	۴/۵۴۰	۴/۵۳۰	۱/۱۱۸	۱/۱۱۸	۱/۱۱۸
۲	۶/۶۷۳	۶/۷۱۴	۶/۷۲۰	۳/۳۱۴	۳/۳۷۷	۳/۳۴۶	۱/۰۱۶	۱/۰۱۷	۱/۰۱۶

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

Re	Ri	مطالعه حاضر			منبع [19]	منبع [20]
		منبع [18]	منبع [17]	منبع [7]		
۱۰۰	۰/۰۱	۲/۰۶۱	(۲/۰۲)	۲/۰۳۱۱۶	۲/۰۹۰۸۳۷	(۱/۴۲)
۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۴/۰۹۲	(۲/۰۴)	۴/۰۲۴۶۲	۴/۱۶۳۰۵۷	(۱/۲۱)
۱۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۶/۵۹۱	(۲/۶۶)	۶/۴۸۴۲۳	۶/۵۵۱۶۱۵	(۰/۶۱)

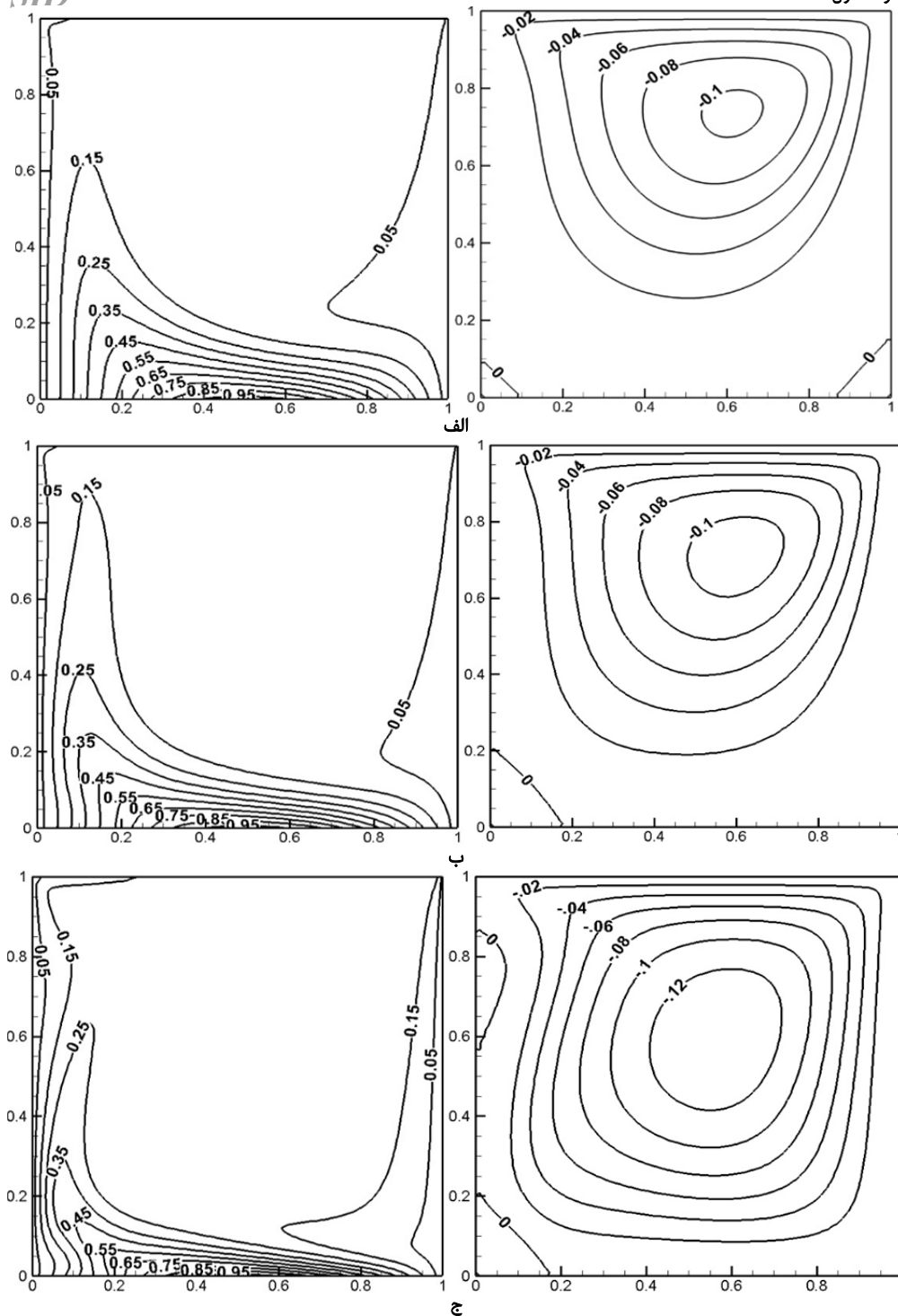
۴- نتایج

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

۴-۱- اثر تغییرات عدد گراشف بر انتقال حرارت

خطوط دمای ثابت و خطوط جریان در اعداد گراشف مختلف برای سیال نیوتونی ($K=0$) در نمودار ۱ ارایه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد گراشف در عدد رینولدز ثابت منجر به فاصله‌گرفتن مرکز گردابه اولیه ناشی از نیروهای برشی به‌وجودآمده توسط دیپوش متحرک، از دیواره بالایی و نزدیک شدن آن به مرکز هندسی

کوبیتی 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 $|\Psi|_{max}$ 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 غیریکنواخت بودن 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 بزرگ‌تر شدن 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 10^4 ، 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 $\varphi=0$ و $K=0$ در اعداد گراش ف 10^4 و 10^5 ؛ الف) 10^4 ، ب) 10^5 ، ج) 10^6

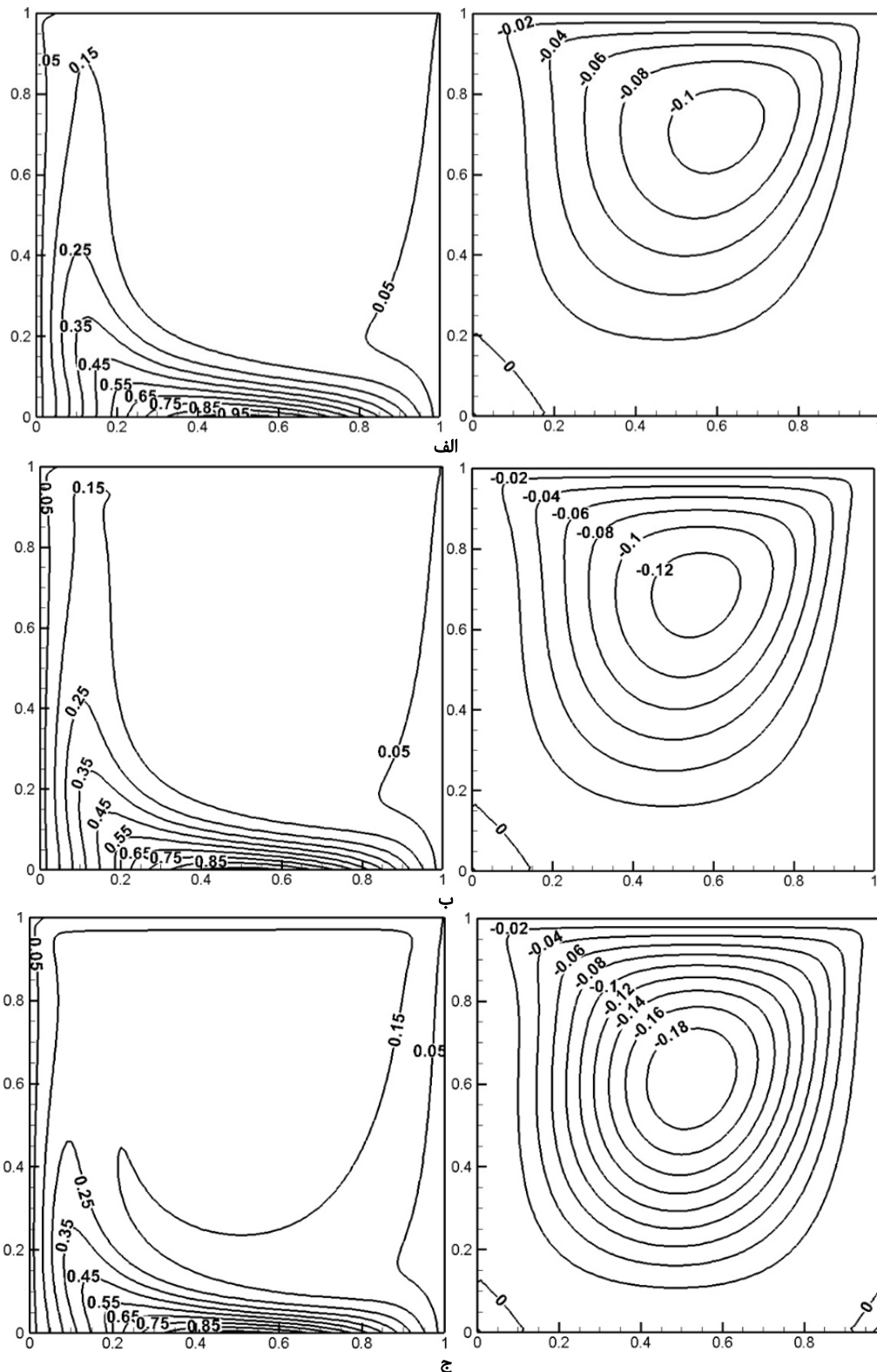
انتقال حرارت به شکل جابه‌جایی اجباری می‌شود. در حالت الف، گردابه اولیه تقریباً تمامی محفظه را در بر گرفته و گردابه کوچکی در گوشه سمت چپ تشکیل شده که مخالف گردابه اولیه در چرخش است. همچنین با توجه به خطوط دمای ثابت و تمرکز آنها در نزدیکی دیواره گرم، دمای بیشتر نقاط سیال سرد است. در حالت ب، با افزایش میکروپولاریته گردابه ثانویه ناشی از نیروی شناوری، کوچک می‌شود 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 به‌خصوص در گوشه پایینی سمت چپ محفظه از حالت توازی

۴-۲- اثر تغییرات ویسکوزیته ریزقطبی بر انتقال حرارت

خطوط دمای ثابت و خطوط جریان در عدد گراش ف ثابت 10^4 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 سیرکلایسیون و متعاقباً

از سطح سرد دیواره سمت راست، به دیواره نزدیک‌تر شده‌اند که نشان‌دهنده افزایش دمای توده سیال در وسط محفظه نسبت به حالات قبل است.

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 دمایی ثابت در فاصله اندکی



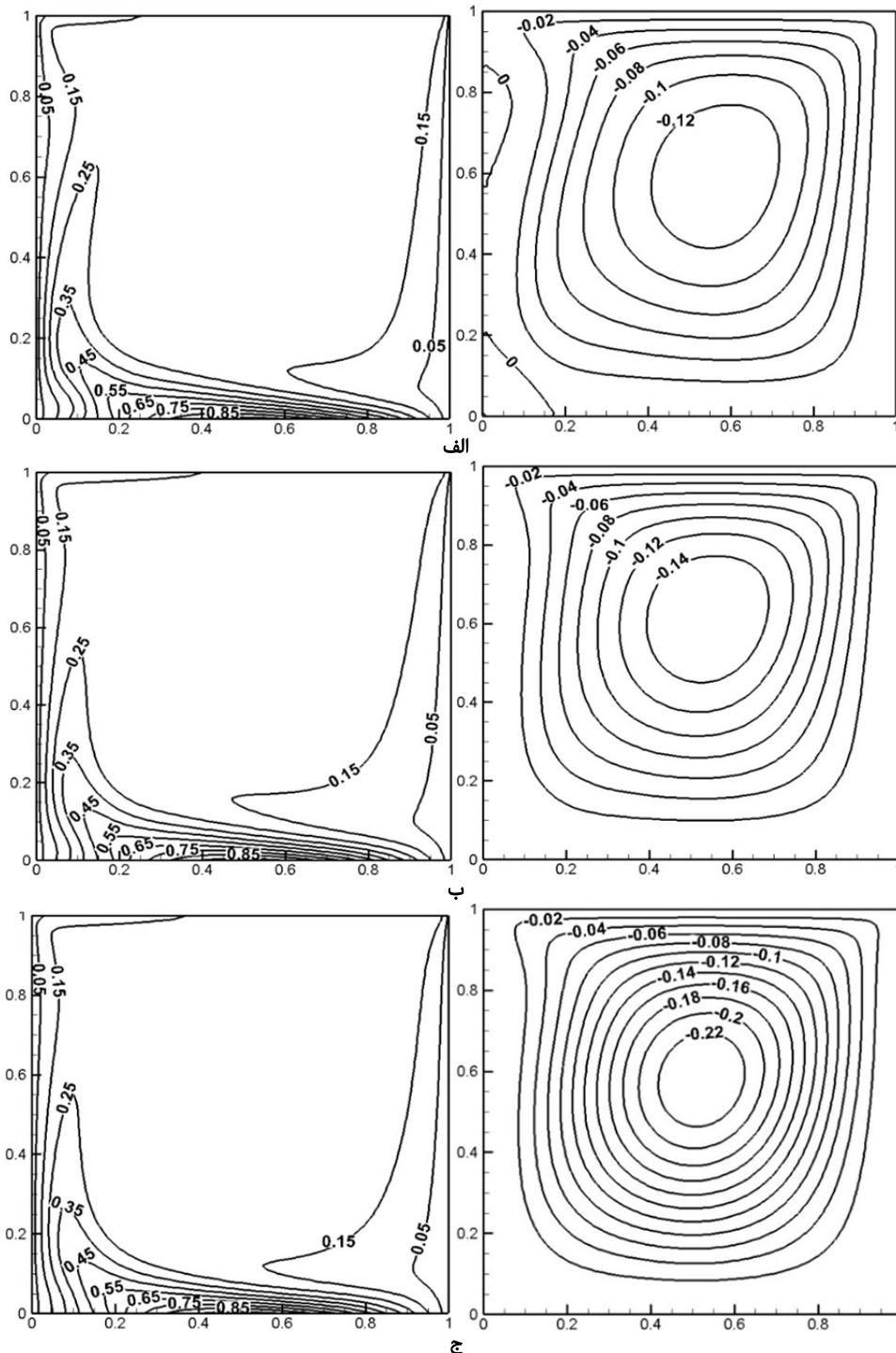
نمودار ۲) مقایسه خطوط جریان (راست) و خطوط همدمای (چپ) جریان در $\phi=0$ و $Gr=10^4$ در اعداد K: الف) صفر، ب) ۱، ج) ۲

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

در نمودار ۳، خطوط دمایی ثابت و خطوط جریان در گرافش ثابت 10^5 و به‌ازای ضرایب میکروپولاریته مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میکروپولاریته در عدد رینولدز

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.

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 به صورت موازی‌تر در آمده که نشان‌دهنده کاهش میزان انتقال حرارت است. در واقع در این حالت، افزایش

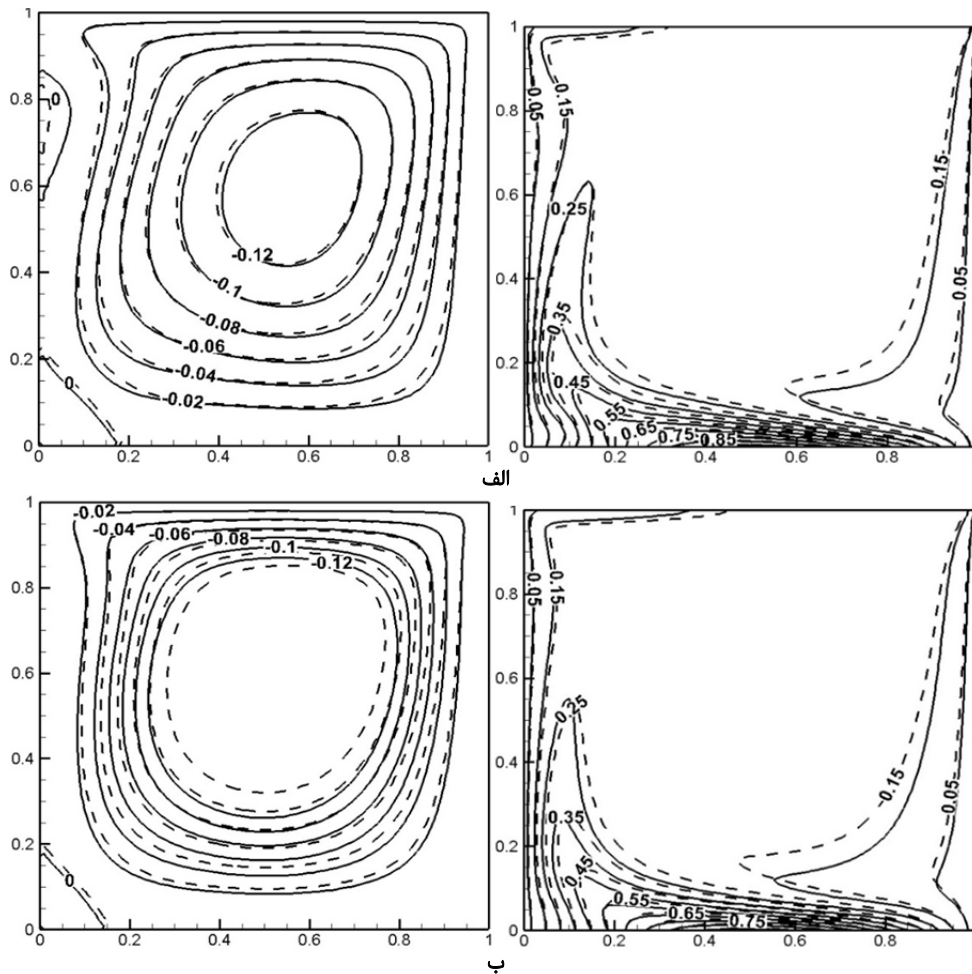


نمودار ۳ (مقایسه خطوط جریان (راست) و خطوط همدمای (چپ) جریان در $\phi=0/1$ و $Gr=10^5$ در اعداد K: الف) صفر، ب) ۱، ج) ۲

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 به دلیل غالب بودن 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 سیرکلسیون در حالت ب در مقایسه با حالت پیشین (الف) کمتر بوده که این تفاوت از مقایسه خطوط جریان قابل نتیجه‌گیری است.

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

نمودار ۴، خطوط جریان و خطوط دمایی ثابت در جریان نانوسیال با نسبت حجمی صفر و ۱۰٪ را در گراش $k=0$ و برای (الف) و $k=2$ (ب) نمایش می‌دهد. افزایش نسبت حجمی با توجه به معادلات ۱۸ و ۱۹ منجر به افزایش رسانش حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال می‌شود. خطوط دمایی ثابت در حالت الف نشان می‌دهد که با افزایش نسبت حجمی نانوسیال، لایه مرزی دمایی نزدیک دیواره گرم رشد می‌کند و باعث فاصله‌گرفتن خطوط دمایی ثابت مجاور دیواره از سطح آن می‌شود که آن را می‌توان به افزایش ضریب رسانش حرارتی نانوسیال مربوط دانست. از



نمودار ۴) مقایسه خطوط جریان (چپ) و خطوط همدمایی (راست) جریان در $\phi=1/10$ و $Gr=10^5$ در اعداد K: الف) صفر، ب) ۲

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.

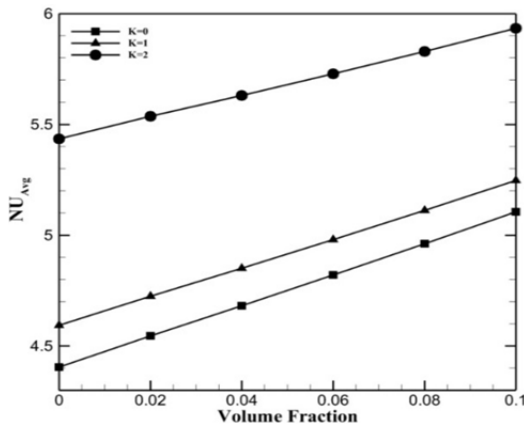
تغییرات عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم با تغییر کسر حجمی نانوسیال در نمودار ۶ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت حجمی نانوذرات، عدد ناسلت میانگین همواره افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که میزان افزایش انتقال حرارت با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در گراش 10^5 دارای بیشترین مقدار است. زیرا در این حالت، علاوه بر افزایش ویسکوزیته، ضریب رسانش حرارتی نانوسیال نیز افزایش می‌یابد و اثر همزمان این دو عامل سبب افزایش بیشتر میزان انتقال حرارت

۴-۴- تغییرات عدد ناسلت میانگین

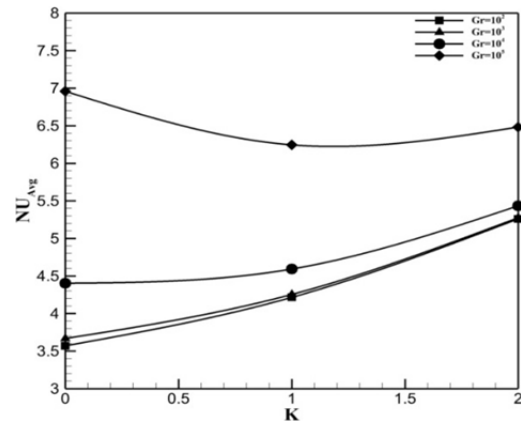
نمودار ۵ نشان می‌دهد که با افزایش Gr ، عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم پایینی افزایش می‌یابد. این امر به علت افزایش میزان انتقال حرارت با افزایش قدرت نیروی شناوری نانوسیال است. در $k=0$ افزایش میزان عدد ناسلت میانگین با افزایش عدد گراش، نسبت به دو حالت دیگر ($k=1$ و $k=2$) بیشتر است. دلیل این امر افزایش ویسکوزیته کلی نانوسیال با افزایش k است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که افزایش ویسکوزیته میکروپولار در گراش 10^5 باعث کاهش نیروی شناوری و افزایش نیروهای برشی می‌شود که این پدیده خود را به شکل کاهش عدد ناسلت میانگین نشان داده است. تداوم فرآیند افزایش ویسکوزیته میکروپولار، جریان را

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.

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



نمودار ۷) تغییر عدد ناسلت میانگین برحسب نسبت حجمی نانوسیال در اعداد مختلف K و $Gr=10^5$

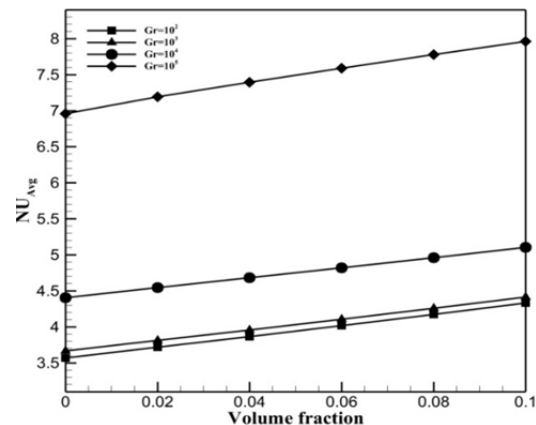


نمودار ۵) تغییر عدد ناسلت میانگین برحسب اعداد K و Gr در $\phi=0$

۴-۵- بررسی در نظر گرفتن اثر حرکت براونی نانوذرات در انتقال حرارت نانوسیال

در این قسمت، عدد ناسلت میانگین روی دیواره گرم در دو حالت مختلف با در نظر گرفتن 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 در نظر گرفتن 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 به‌دست آوردن مقادیر بیشتر نمی‌شود. علاوه بر این، تفاوت مقادیر به‌دست آمده 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 پیش‌بینی می‌کند، به‌واسطه در نظر گرفتن ویسکوزیته چرخشی دمپ می‌کند. از طرفی بیشترین اختلاف در گراف‌ها و نسبت حجمی‌های بالاتر که پخش دمایی بیشتر است، مشاهده می‌شود. زیرا وجود گرادیان‌های دمایی شدیدتر در این حالات و از طرف دیگر، وابستگی مدل خواص متغیر به دمای محلی نانوسیال باعث می‌شود تا اثر در نظر گرفتن حرکات براونی در این شرایط تأثیر بیشتری داشته باشد.



نمودار ۶) تغییر عدد ناسلت میانگین برحسب نسبت حجمی نانوسیال در اعداد گرافش مختلف و $K=0$

نمودار ۷، تغییرات عدد ناسلت میانگین را در عدد گراف 10^4 با تغییر نسبت حجمی نانوذرات در Kهای مختلف نشان می‌دهد. براساس این نمودار، شیب نمودار ناسلت میانگین محاسبه شده 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 غالب بودن 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

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

نسبت حجمی		۰/۱۰			۰/۰۶			۰/۰۲		
Gr	K	اختلاف%	حالت دوم	حالت اول	اختلاف%	حالت دوم	حالت اول	اختلاف%	حالت دوم	حالت اول
۱۰ ^۲	۰	-۰/۴۳۱۹	۴/۳۵۱۹	۴/۳۳۳۱	-۰/۲۶۸۱	۴/۲۸۳	۴/۰۱۷۵	-۰/۰۵۱۱	۳/۷۱۸۰	۳/۷۱۹۹
	۲	-۰/۳۰۷۵	۵/۷۲۳۸	۵/۷۰۶۲	-۰/۱۵۰۱	۵/۵۲۹۲	۵/۵۲۰۹	+۰/۰۵۲۳	۳/۳۵۰۰	۵/۳۴۷۲
۱۰ ^۳	۰	-۰/۴۳۰۷	۴/۴۳۴۸	۴/۴۱۵۷	-۰/۲۶۹۶	۴/۱۱۷۲	۴/۱۰۶۱	-۰/۰۴۹۸	۳/۸۱۲۵	۳/۸۱۴۴
	۲	-۰/۳۰۸۱	۵/۷۴۵۸	۵/۷۲۸۱	-۰/۱۴۹۶	۵/۵۴۹۲	۵/۵۴۰۹	+۰/۰۵۴۱	۵/۳۶۷۹	۵/۳۶۷۰
۱۰ ^۴	۰	-۰/۳۹۴۱	۵/۱۲۵۱	۵/۱۰۴۹	-۰/۲۲۷۷	۴/۱۸۳۱۴	۴/۱۸۲۰۴	-۰/۰۰۰۰۱	۴/۵۴۴۵۵	۴/۵۴۵۵
	۲	-۰/۲۹۵۷	۵/۹۵۱۶	۵/۹۳۴۰	-۰/۱۳۷۷	۵/۷۴۶۵	۵/۷۲۸۶	+۰/۰۶۷۸	۵/۵۳۶۶	۵/۵۳۲۸
۱۰ ^۵	۰	-۰/۵۰۶۷	۷/۹۷۳۴	۷/۹۶۳۰	+۰/۰۴۲۲	۷/۵۸۶۹	۷/۵۹۰۱	+۰/۲۸۰۱	۷/۱۹۵۳	۷/۱۷۵۲
	۲	-۰/۱۹۴۶	۷/۲۹۶۲	۷/۲۸۲۰	-۰/۰۳۴۵	۶/۹۶۵۴	۶/۹۶۳۰	+۰/۱۷۹۱	۶/۶۵۳۸	۶/۶۴۱۹

در این پژوهش، انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال ریزقطبی اکسید آلومینیوم- آب در یک محفظه مربعی بسته با درپوش 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 پارامترهایی چون عدد گراشف (10^4-10^6)، نسبت حجمی، نسبت میکروپولاریته (۲-۴) 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 پایینی موجب ایجاد نیروی شناوری درون سیال و از طرف دیگر نیروی برشی اعمال شده توسط صفحه متحرک باعث ایجاد حرکت در سیال می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش گراشف موجب تقویت نیروی شناوری، افزایش عدد ناسلت و انتقال حرارت می‌شود. 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 10^4 ، افزایش نیروی شناوری افزایش ویسکوزیته چرخشی تا $K=1$ باعث کاهش انتقال حرارت و افزایش بیشتر آن موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود.

افزودن نانوذرات به سیال باعث افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود، 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. به عبارتی در K های کوچک‌تر اثر افزایش نسبت حجمی بر انتقال حرارت بیشتر است. مقایسه بین استفاده از دو مدل خواص ثابت و خواص متغیر برای محاسبه خواص ترموفیزیک نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم، 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 نمی‌شود. علاوه بر این، تفاوت مقادیر به‌دست آمده برای عدد ناسلت میانگین با استفاده از دو مدل مذکور، در حالت نیوتونی نسبت به میکروپولار بیشتر است.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

تأییدیه 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/پژوهشگر اصلی//نگارنده بحث (۴/۳۳٪)؛ امین حقیقی‌پشتیری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳/۳۳٪)؛ آرش بهرامی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۳/۳۳٪)

منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان ذکر نشده است.

۶- پی‌نوشت

علام

C_p	ظرفیت حرارتی ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
Gr	عدد گراشف
K	عدد نسبت میکروپولاریته
k	ضریب هدایت گرمایی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
L	طول و عرض حفره (m)
n	شاخص میکروچرخش عمود بر سطح دیواره

N	سرعت زاویه‌ای بی‌بعد
Nu	عدد ناسلت
p	فشار بی‌بعد
\bar{p}	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
Ri	عدد ریچاردسون
T	دمای بی‌بعد
\bar{T}	دما (K)
U_0	سرعت دیواره متحرک (ms^{-1})
u, v	سرعت بی‌بعد در جهات x و y
\bar{u}, \bar{v}	سرعت در جهات x و y (ms^{-1})
x, y	مختصات کارتزین بی‌بعد
\bar{x}, \bar{y}	مختصات کارتزین

علام یونانی

μ	لزجت دینامیک ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
τ	عمر متوسط موضعی هوا (s)
ν	لزجت سینماتیک (m^2s^{-1})
α	پخش حرارتی (m^2s^{-1})
φ	نسبت حجمی نانوذرات
κ	ثابت بولتزمن (JK^{-1})
ζ	لزجت چرخشی (N s m^{-2})
β	ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})

زیرنویس‌ها

air	هوا
Avg	مقدار متوسط
br	براونی
c	سرد
f	سیال پایه
h	گرم
Loc	محل
nf	نانو سیال
p	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- Aydın 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- Zadavec 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