

حل عددی انتقال گرمایی جریان طبیعی نانو سیال در کانالهای با مقطع مستطیلی

عبدالله رضوانی آلילה کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه امام خمینی نوشهر
 رسام دهنوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی
 فرزانه بهنام گرمی کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

در این تحقیق از روش عددی حجم محدود برای مطالعه دوبعدی همرفت آزاد و تراکم‌ناپذیر جریان داخل محفظه‌ای با سطح مقطع مربعی شکل پر شده با نانو سیال آب، Al_2O_3 تحت دیواره گرم متفاوت استفاده شده است. به عنوان شرایط مرزی، محفظه شامل دو دیواره افقی آدیاباتیک و دیواره-های عمودی هم‌دما می‌باشد. معادلات ناویر-استوکس و انرژی به صورت عددی حل شده‌اند. مساله برای تعیین نرخ انتقال گرما در اثر تغییر پارامترهای مانند نانوذرات غیر یکنواخت، اندازه قطر متوسط نانوذرات، کسر حجمی نانوذرات، در اعداد گراشف، و پراتل برای هندسه‌های مختلف حل شده است. در این مقاله جهت گسسته کردن معادلات حاکم بر جریان از روش حجم‌محدود استفاده شده است به گونه‌ای که معادلات حاصل جبری صریح بوده و به صورت شبه‌زمانی ظاهر می‌شوند که با استفاده از روش رانگ‌کوتا مرتبه چهار و با الگوی پیشرو زمانی حل شده است. همچنین به جای استفاده از الگوریتم‌های متداول، SIMPLE, SIMPLEM, SIMPLEC با استفاده از روش تراکم‌پذیری مصنوعی، معادله پیوستگی به معادلات ممنتوم کوپل شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانو سیال باعث افزایش نرخ انتقال گرما و عدد ناسلت می‌شود. علاوه براین با کاهش میانگین قطر نانو ذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. با افزایش R ، کسر حجمی نانو سیال و عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: ضریب تراکم‌پذیری مصنوعی، روش حجم محدود، عدد ناسلت، عدد گراشف، نانو ذرات.

Numerical Investigation of Natural Convective Heat Transfer of Nanofluids in a Rectangular Cavity

A. Rezvani Alile M.Sc. Department of Mechanical Engineering, University of Imam Khomeini
 R. Dehnavi M.Sc. Department of Mechanical Engineering, Mohaghegh Ardabili University
 F. Behnam Germi B.Sc. Department of Mechanical Engineering, Mohaghegh Ardabili University

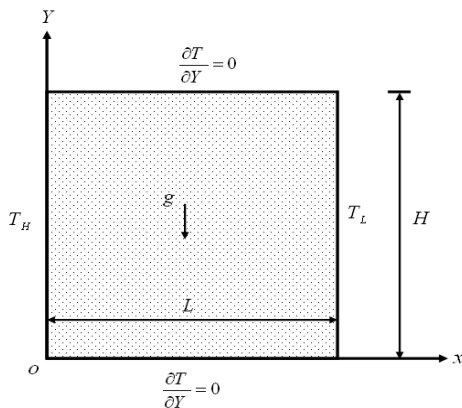
Abstract

This paper presents an explicit finite-volume model which has been developed to study two dimensional incompressible natural convection in a square enclosure filled with $Al_2O_3/Water$ nanofluid that operates under differentially heated walls. As boundary conditions of cavity, two opposite left and right walls were kept at constant but different temperatures. Also two opposite bottom and top walls were thermally insulated. The Navier-Stokes and energy equations are solved, numerically. Heat transfer and fluid flow are examined for parameters of non-uniform nanoparticle size, mean nanoparticle diameter, nanoparticle volume fraction, Grashof number, Prandtl number and different geometries of enclosure. At this work, for solving of the governing equations an explicit finite-volume procedure and a time-marching method are utilized, and the forth order runge-kuta is used for discretizing time expressions. Also instead of the conventional algorithms of SIMPLE, SIMPLEM and SIMPLEC, an artificial compressibility technique is applied for coupling the continuity to the momentum equations. Results indicate that using nanofluid causes an increase in the heat transfer and the Nusselt number. Furthermore; by decreasing the mean diameters of nanoparticles, Nusselt number increases. By increasing R nano particle volume fraction, Nusselt number increases.

Keywords: Artificial compressibility, Finite volume method, Nusselt number, Grashof number, Nanoparticle

۱- مقدمه

شامل دو دیواره افقی آدیباتیک و دیواره‌های قائم هم‌دمای می‌باشد.



شکل ۱- شکل و شرایط مرزی مسأله

امروزه در صنعت سرمایش و گرمایش سیالات مبادله کننده گرما یا مبردها نقش بسیار مهمی بازی می‌کنند. باتوجه به بحران انرژی و مسایل زیست محیطی استفاده از تجهیزات اقتصادی‌تر وسازگارتر با محیط زیست به یکی از موضوعات مهم علم تهویه و تبرید بدل گشته است. اگرچه تکنیک‌های گوناگونی برای افزایش انتقال گرما به کار می‌رود رسانندگی گرمایی پایین جریان سیال از کارایی مبادله‌کن گرما کم می‌کند. یک روش برای افزایش انتقال حرارت افزایش رسانایی حرارتی سیال می‌باشد. برای تحقق این مورد دانشمندان از تعلیق ذرات ریز (در ابعاد میکرو و بزرگتر) با رسانایی گرمایی بالا درون سیال (میکروسیال) بهره گرفته‌اند که این کار اولین بار حدود یک قرن پیش توسط ماکسول انجام گرفت. استفاده از این ذرات مشکلاتی از قبیل رسوبدهی خوردگی اجزای فشار اضافی و رفتار غیر نیوتنی به همراه داشت. باظهور فناوری نانو امکان تولید ذرات در ابعاد نانو فراهم شد که از پخش این نانو ذرات در یک سیال که آنرا سیال پایه می‌نامیم، مخلوط جدیدی به نام نانو سیال ایجاد می‌شود که رسانایی گرمایی بالا و بسیار وابسته به دمایی داشته و به علت ابعاد کوچک ذرات و نیاز به کسرهای حجمی کوچک برای افزایش رسانایی گرمایی بسیار پایدارتر بوده و عاری از مشکلات مذکور می‌باشد. بهبود ویژگی‌های گرمایی در انتقال انرژی سیالات می‌تواند یک افزایش ظاهری در انتقال گرما ایجاد کند. [۱-۲].

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم برای بررسی جریان تراکم‌ناپذیر دائم، معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی می‌باشند. فرض می‌شود: نانو سیال مورد بررسی نیوتنی و دارای خواص فیزیکی ثابت هستند، فاز مایع و نانوذرات در حالت تعادل گرمایی هستند، نانوذرات کروی هستند، سهم انتقال گرمایی بین دو طرف از دیواره محفظه ناچیز است. بنابراین با فرضیات فوق معادلات حاکم بر مسأله با در نظر گرفتن عبارت بوزینیسک بصورت بی- بعد زیر نوشته می‌شوند.

معادله پیوستگی،

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتم در جهت X،

$$\frac{\partial U}{\partial \zeta} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{eff}}{\rho_{nf}} \frac{Pr}{\nu_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

معادله مومنتم در جهت Y،

$$\frac{\partial V}{\partial \zeta} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = - \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{eff}}{\rho_{nf}} \frac{Pr}{\nu_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

$$+ \frac{1}{\rho_{nf} \beta_f} \left[(1 - \Phi) \rho_f \beta_f + \Phi \rho_s \beta_s \right] Pr^2 Gr \theta$$

معادله انرژی،

نانوسیالات به علت افزایش قابل توجه خواص گرمایی، توجه بسیاری از دانشمندان را در سال‌های اخیر به خود جلب کرده است، به عنوان مثال مقدار کمی (حدود یک درصد حجمی) از نانوذرات مس یا نانولوله‌های کربنی در اتیلن گلیکول یا روغن به ترتیب افزایش ۴۰ و ۱۵۰ درصدی در رسانش گرمایی این سیالات ایجاد می‌کند [۳]؛ در حالی که برای رسیدن به چنین افزایشی در سوسپانسیون‌های معمولی، به غلظت‌های بالاتر از ده درصد از ذرات احتیاج است. در یک تحقیق تجربی نشان داده شده است که با افزایش ۵ درصد کسر حجمی نانو سیال آب، Al_2O_3 و نانو سیال آب، CuO مقدار هدایت حرارتی از ۲۹ درصد به ۶۰ درصد رسیده است [۴]. وانگ و همکارانش در یک مطالعه تئوری نشان دادند که ضریب رسانندگی گرمایی در نانو سیال آب، Al_2O_3 با افزایش اندازه نانوذرات و کاهش دمای میانگین، کاهش می‌یابد [۵].

در کار حاضر از روش عددی حجم محدود برای مطالعه دوبعدی همرفت آزاد و تراکم‌ناپذیر نانو سیال داخل محفظه‌ای با سطح مقطع مربعی شکل استفاده شده است. شکل مورد نظر و شرایط مرزی مسأله در شکل ۱ نشان داده شده است. محفظه

۲-۴- پخشندگی گرمایی

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf} \quad (11)$$

۲-۵- رسانندگی گرمایی ظاهری بی‌بعد

هدایت حرارتی ظاهری پارامتر بسیار مهمی برای نشان دادن پتانسیل افزایشی در سوسپانسیون‌های نانوذرات - مایع است. تحقیقات نشان داده است که رسانندگی گرمایی نانوسیال تابع رسانندگی گرمایی هردو جزو سیال پایه و نانو ذرات است.

$$\frac{k_{Stationary}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (12)$$

۲-۶- رسانندگی گرمایی ظاهری بی‌بعد کل

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_{Stationary}}{k_f} + \frac{k_c}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} + \frac{Nu_p d_f (2 - D_f) D_f}{Pr (1 - D_f)^2} \left[\frac{\left(\frac{d_{max}}{d_{min}}\right)^{1-D} - 1}{\left(\frac{d_{max}}{d_{min}}\right)^{2-D} - 1} \right] \frac{1}{d_p} \quad (13)$$

$$D_f = 2 - \frac{Ln\phi}{Ln(d_{p,max}/d_{p,min})} \quad (14)$$

که در آن $d_{p,max}$ و $d_{p,min}$ حداقل و حداکثر قطر نانو ذرات می‌باشند. با توجه به نسبت اندازه‌گیری $R = (d_{p,max}/d_{p,min})$ حداقل و حداکثر قطر از نانوذرات داده پردازای را می‌توان با نانوذرات با قطر متوسط تعیین کرد.

$$d_{p,max} = d_p \frac{D_f - 1}{D_f} \left(\frac{d_{p,min}}{d_{p,max}} \right) \quad (15)$$

$$d_{p,min} = d_p \frac{D_f - 1}{D_f} \quad (16)$$

$$D_f = 2 + \frac{Ln\phi}{Ln(R)} \quad (17)$$

۲-۷- عدد نوسلت

عدد ناسلت توسط رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$Nu = - \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial n} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \zeta} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

پارامترهای بی‌بعد عبارتند از:

$$X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{uH}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vH}{\alpha_f} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{t\alpha_f}{H^2}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad P = \frac{\rho H^2}{\rho_f \alpha_f^2}$$

پارامترهای بی‌بعد به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$Pr = \frac{V_{nf}}{\alpha_{nf}} \quad (6)$$

$$Gr = \frac{g\beta_f(T_h - T_L)H^3}{v_f^2} \quad (7)$$

بخاطر وجود نانو ذرات در سیال خصوصیات نانو سیال به صورت روابطی که در زیر آورده شده و با استفاده از جدول ۱ تغییر می‌کند. پارامترهای اصلی که در محاسبه نرخ انتقال گرما نانوسیالات مهم‌اند شامل: ظرفیت گرمایی، گرانیوی و رسانندگی گرمایی می‌باشند که ممکن است کاملاً با سیال خالص اصلی متفاوت باشند. خواص فیزیکی موثر در در معادلات ذکر شده نانوسیال به صورت زیر می‌باشد.

۲-۱- لزجت

$$\mu_{eff} = \mu_f \left(1 + 2.5\phi \right) \left[1 + \eta \left(\frac{d_p}{H} \right)^{-2\epsilon} \phi^{2/3} (1 + \epsilon) \right] \quad (8)$$

این مدل توسط جانگ و همکاران [۶]، برای محفظه‌ای حاوی مایع رقیق تعلیق ذرات کوچک کروی سفت و سخت ارائه شده است. در رابطه فوق برای AL_2O_3 به تجربه ثابت شده است که: $\epsilon = -0.25$ و $\eta = 280$.

۲-۲- چگالی

چگالی مواد نسبت جرم به حجم آن‌ها معرفی می‌شود. تمامی محققین روی استفاده از قانون مخلوط‌ها برای محاسبه چگالی نانوسیالات اجماع نظر دارند. این رابطه به صورت زیر است:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (9)$$

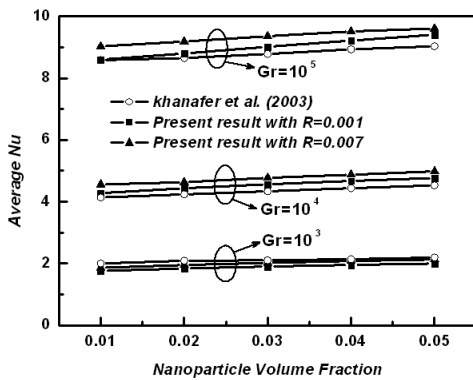
۲-۳- ظرفیت گرمایی

ظرفیت گرمای ویژه که به طور معمول از آن به گرمای ویژه نام برده می‌شود اندازه انرژی گرمایی مورد نیاز برای افزایش یک واحد دمایی از مقدار مشخص ماده می‌باشد.

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (10)$$

با در نظر گرفتن عدد در حالت عدد گراشف برابر روی شبکه مستقل آزمایش شده است. به صورتی که جهت تعیین محدوده شبکه بندی، کد حاضر برای تعداد شبکه های 50×50 ، 100×100 و 150×150 در حالت $\phi = 0.05, d_p = 10nm$ ، $R = 0.007$ و $Pr = 6$ اجرا شده است. نتایج حاصل برای تعیین عدد بی بعد ناسلت، در سه محدوده شبکه مذکور بین کمترین و بیشترین، مقدار حاصله کمتر از 0.002 درصد با هم اختلاف دارند. برای بالا بردن دقت و صرفه جویی در زمان حل از شبکه 100×100 استفاده شده است.

برای مقایسه کد حاضر با کار دیگران، مسئله مذکور را برای سیال خالص اجرا کرده و نتایج حاصل برای عدد بی بعد ناسلت با نتایج حاصل از کارهای ارائه شده توسط کوانگ [۷] و خانافر [۸] در $\phi = 0.05, d_p = 10nm, Pr = 6.2$ و در عدد های بی- بعد گراشف $Gr = 10^3, Gr = 10^4, Gr = 10^5$ مورد مقایسه قرار گرفته است. ارزیابی برای عدد بی بعد ناسلت در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- نمودار مقایسه کار حاضر با کار دیگران

شکل ۳ رسانندگی گرمایی نانو سیال را برحسب کسرهای حجمی متفاوت از نانو ذرات در $\phi = 0.05$ و $Pr = 6$ نشان می دهد. D_f که به وسیله حرکت براونی در نانو سیال از رابطه (۱۷) بدست می آید، رابطه عکس با R دارد، بنابراین مقادیر R یک معیار از اهمیت ساختارهای غیر یکنواخت نانو ذرات را بدست می دهد. با توجه به شکل انتقال گرما نانو سیال با افزایش انرژی انتقال در سیال بطور قابل توجه بوسیله مقدار R افزایش می یابد. این پدیده بوسیله تئوری حرکت براونی که ذرات را به سرعت بالا مرتبط می کند قابل توجه است. با افزایش مقدار R از ۰/۰۰۱ به ۰/۰۰۷ الگوهای جریان بدون تغییر باقی می ماند، در حالیکه مقدار رسانندگی گرمایی نانو سیال بدلیل نرخ بالا نسبت کسر حجمی نانو سیال، افزایش می یابد. به منظور توضیح این پدیده، بیشینه و کمینه قطر قابل توجه است که برای یک

جدول ۱- مشخصات ترموفیزیکی فازهای مختلف

| ویژگی ها | فاز مایع آب (300K) | فاز جامد (Al_2O_3) |
|-----------------|----------------------|------------------------|
| $C_p (j/kg.K)$ | 4179 | 850 |
| $\rho (kg/m^3)$ | 997.1 | 3900 |
| $K (W/m.K)$ | 0.61 | 46 |
| $\beta (1/K)$ | 2.1×10^{-4} | 1.67×10^{-5} |
| $\mu (kg/m.s)$ | 8.9×10^{-4} | ---- |

که در آن n معرف جهت عمود بر سطح می باشد. عدد ناسلت محلی برای دیواره گرم از رابطه زیر تعیین می شود.

$$Nu_x = - \frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_h \quad (19)$$

عدد ناسلت متوسط از انتگرال گیری عدد ناسلت در طول دیواره تعیین می شود.

$$\overline{Nu} = \int_0^H Nu_x dy \quad (20)$$

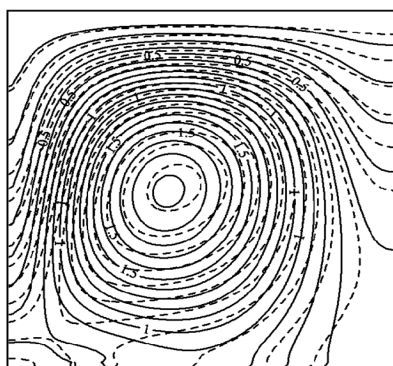
۳- روش عددی

در این تحقیق جهت حل عددی از روش حجم محدود برای مطالعه دوبعدی همرفت آزاد و تراکم ناپذیر استفاده شده است. جهت کوپل معادله پیوستگی به معادلات ممنتوم از روش تراکم پذیری مصنوعی چورین استفاده شده است به گونه ای که معادلات حاصل جبری صریح بوده و به صورت شبه زمانی ظاهر می شوند، که با استفاده از روش رانگ کوتای مرتبه چهار و با الگوی پیشرو زمانی حل شده است. برای تولید شبکه از روش تولید شبکه های با سازمان به دلیل کاهش زمان محاسبات استفاده شده است. شبکه تولید شده در این مقاله توسط روش تولید شبکه به روش جبری می باشد، شبکه ها به شکل مربعی در دو جهت X و Y به یک نسبت تولید شده است. جهت استفاده از شبکه جبری تولید شده در نزدیکی مرزها به دلیل پیچیدگی فیزیکی جریان از تراکم شبکه جبری در نزدیکی دیواره ها استفاده شده است. معادلات گسسته شده توسط روش های گسسته سازی های زمانی و مکانی در زبان برنامه نویسی فرترن نوشته شده است.

۴- نتایج

یک دستورالعمل آزمایش شبکه بندی گسترده برای ضمانت درست عمل کردن حل مستقل شبکه ارائه شده است. که در آن

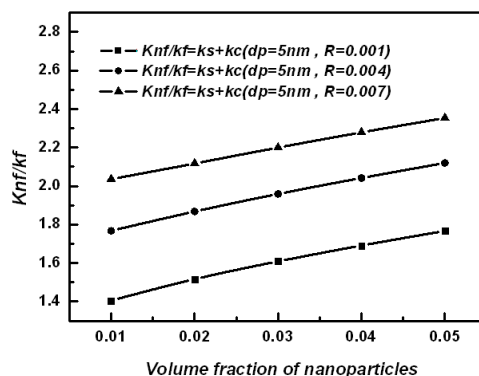
شکل ۵ خطوط گرما ثابت برای همرفت طبیعی در محفظه مربع شکل برای سیال حاوی نانو ذرات و سیال خالص برای $Gr = 10^3$ در $\phi = 0.05$ ، $d_p = 10nm$ ، $R = 0.007$ و $Pr = 6$ را نشان می‌دهد. خطوط گرما ثابت موازی دیواره‌های عایق بالایی و پایینی هستند. این خطوط همچنین بر دو دیواره دما ثابت جانبی عمود هستند زیرا در نواحی نزدیک این دیواره-ها ساز و کار غالب در انتقال گرما، رسانش است. الگوی خطوط گرما ثابت به صورت هندسی بزرگی عدد ناسلت بر اساس رسانش و همچنین شار انرژی را در هسته به طرف پایین نشان می‌دهد. عدد ناسلت بر اساس رسانش در شکل به عنوان مقدار بیشینه در بالاترین خط گرما ثابت ظاهر شده است.



شکل ۵- کانتورهای گرما ثابت برای محفظه مربعی شکل در $\phi = 0.05$

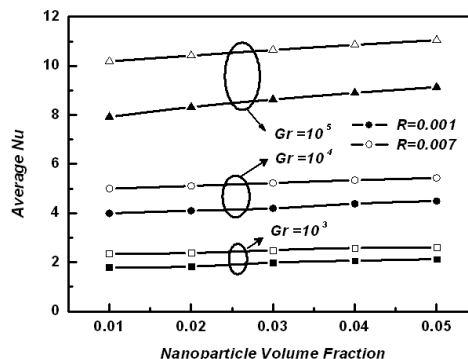
شکل ۶ خطوط هم‌دما در محفظه مستطیلی شکل را برای سیال حاوی نانو ذرات (-) و سیال خالص (۰۰) در نسبت اندازه‌های مختلف برای $Gr = 10^3$ در $\phi = 0.05$ نشان می‌دهد. نتایج حاصل از شکل نشان دهنده این است، که با افزایش نسبت اندازه خطوط هم‌دما خطوطی تقریباً عمودی و صاف را تشکیل می‌دهند، این در حالی است که در نسبت اندازه پایین این خطوط با مقداری خمیدگی در مرکز شکل همراه هستند. از کانتورهای دما ثابت مشخص است که نانو ذرات سهم بسزایی در افزایش انتقال گرما از طریق رسانش دارند.

قطر ثابت نانو ذرات ماکزیمم مینیمم قطر نانو ذرات در مقادیر بالای R بوسیله نانو ذرات نسبتاً کوچکتر با اندازه یکنواخت تر ارتقا بهتری می‌یابد.



شکل ۳- نمودار رسانندگی گرمایی برحسب کسر حجمی در $\phi = 0.05$

شکل ۴ منحنی‌های تغییر عدد ناسلت را برحسب کسر حجمی نانو ذرات برای $d_p = 5nm$ و $\phi = 0.05$ نشان می‌دهد. عدد ناسلت به عنوان یک شاخص برای افزایش انتقال گرما به کار می‌رود که افزایش عدد ناسلت به معنای افزایش میزان انتقال گرما است. با توجه به شکل با افزایش مقدار R از 0.001 تا 0.007، عدد ناسلت متوسط به سرعت برای عدد گراش‌های مختلف افزایش می‌یابد. با افزایش کسر حجمی نانوسیال در عددهای گراش پایین میزان افزایش عدد ناسلت کم بوده و با افزایش عدد گراش عدد ناسلت افزایش بیشتری دارد. همچنین در تمامی عددهای گراش افزایش قطر نانو ذرات باعث کاهش میزان عدد ناسلت شده و رسانندگی گرمایی را کاهش می‌دهد. عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال در مقایسه با سیال خالص در عددهای گراش مختلف پایین است. این کاهش در انتقال گرما بیشتر به دلیل تأثیر لزجت دینامیکی می‌باشد، به طوری که این فاکتور در انتقال گرما طبیعی نانو سیال با رسانندگی گرمایی پایین غالب است.



شکل ۴- نمودار تغییر عدد ناسلت برحسب کسر حجمی نانو ذرات در $\phi = 0.05$

β ضریب انبساط گرمایی

زیر نویس

نانوسیال nf
جامد s

مراجع

[1] Daungthongsuk W, Wongwiset S. "A critical review of convective heat transfer of nanofluids". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 11, Issue 5, pp. 797-817, 2007.

[2] L.A. Florio, A. Harnoy, "Combination technique for improving natural convection cooling in electronics," International Journal of Thermal Sciences, Volume 46, Issue 1, pp. 76-92, 2007.

[3] Abu-Nada, Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flow encountered in backward facing step International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 29, Issue 1, pp. 242-249, 2008.

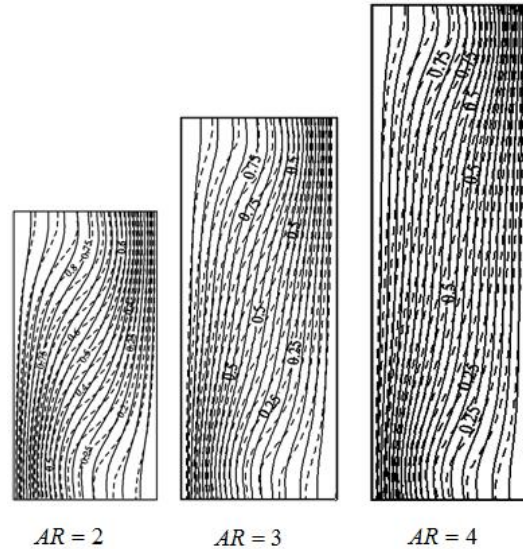
[4] Xuan Y, Li Q. "Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of Heat and Fluid Flow", Volume 21, Issue 1, pp. 58-64, 2000.

[5] Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., Wu, Q, "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles". J. Appl. Phys. 91, pp.4568-4572, 2002.

[6] Kyo Sik Hwang, Seok Pil Jang, Stephen U.S. "Choi, Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al_2O_3 nanofluids in fully developed laminar flow regime. International Journal of Heat and Mass Transfer", Volume 52, Issues 1-2, pp. 193-199, 2009.

[7] Kuang C. Lin, Angela Violi. "Natural convection heat transfer of nanofluids in a vertical cavity": Effects of non-uniform particle diameter and temperature on thermal conductivity. International Journal of Heat and Fluid Flow, Volume 31, Issue 2, pp. 236-245, 2010.

[8] Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M., "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 46, Issue 19, pp. 3639-3653, 2003.



شکل ۶- کانتورهای دما برای محفظه در نسبت اندازه‌های مختلف در $\phi = 0.05$

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شده است که مشخصه‌های انتقال گرمای نانو سیال با افزایش نرخ بیشینه و کمینه قطر نانوذرات (R) از ۰.۰۰۱ به ۰.۰۰۷ افزایش و یا قطر متوسط نانوذرات (d_p) از ۱۰ به ۵ کاهش می‌یابد. این افزایش موجب تاثیر عمده حرکت براونی ناشی از انتقال گرما می‌شود. افزایش دمای نانوسیال منجر به افزایش تاثیر قطر نانوذرات غیر یکنواخت و قطر متوسط نانوذرات در محفظه می‌شود. برای مقادیر کوچک و بزرگ عدد گراشف، بدلیل تحت شعاع قرار گرفتن هدایت گرمایی محفظه بوسیله رسانندگی گرمایی نانوسیال، افزایش انتقال گرما در سیستم‌های مختلف مشابه می‌باشد. نتایج حاصل از تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نانو سیال باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت می‌شود. علاوه براین با کاهش میانگین قطر نانو ذرات، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. دو مکانیزم کلیدی حرکت براونی و نانولایه‌ها، توأم از مهم‌ترین عوامل افزایش رسانندگی گرمایی سیالات انتقال دهنده گرما می‌باشند.

نمادها

ζ زمان بی‌بعد
 d_f قطر ملکولی مایع
 d_p متوسط قطر نانو ذرات

علائم یونانی

α پخشندگی گرمایی