



دانشگاه صنعتی امیر کبیر
(پلی تکنیک تهران)

سال چهل و پنج، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۲، صفحه ۳۹ تا ۴۹
Vol. 45, No.1, Summer 2013, pp. 39-49



نشریه علمی - پژوهشی امیر کبیر (مهندسی مکانیک)
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)
(AJSR - ME)

مطالعه عددی جابجایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در یک محفظه

قنبرعلی شیخزاده^{۱*}، علی عارفمنش^۲، مجید دستمالچی^۳، آرش اردشیری^۴

۱ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان

۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان

۳ دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان

۴ دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه کاشان

(دریافت ۱۳۹۰/۶/۵، پذیرش ۹۱/۱۰/۲)

چکیده

افزایش انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در یک محفظه مربعی بدون استفاده از تقریب بوزینسک و با استفاده از تقریب بوزینسک بصورت عددی مطالعه شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر حل شده است. اختلاف دمای دیواره‌های گرم و سرد محفظه 50°C در نظر گرفته شده است، و نتایج برای کسر حجمی نانوذرات از ۰الی ۰/۰۹ و اعداد رایلی از ۱۰۳الی ۱۰۵ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار تابع جریان بیشینه و عدد ناسلت متوسط در حالت دانسیته متغیر نسبت به دانسیته ثابت بیشتر است. همچنین، در حالت دانسیته متغیر، بیشترین افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسیال، در رایلی ۱۰۳ رخ می‌دهد. برای نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۹ در رایلی‌های ۱۰۴ و ۱۰۵، عدد ناسلت نسبت به سیال پایه کمی کاهش می‌یابد. برای کسر حجمی ۰/۰۱، بیشترین افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسیال در رایلی‌های ۱۰۳، ۱۰۴ و ۱۰۵ به ترتیب ۲۶، ۲۴ و ۲۳ درصد است.

کلمات کلیدی

جابجایی طبیعی، نانوسیال، خواص متغیر، محفظه، تقریب بوزینسک

* نویسنده مسئول وعهده دار مکاتبات
Email: sheikhz@kashanu.ac.ir

۱- مقدمه

انتقال حرارت جابجایی یکی از پدیده‌های مهم در سامانه‌های حرارتی از جمله مبدل‌های حرارتی، خنک‌کاری قطعات الکتریکی، پنجره‌های دوجداره و غیره است [۱]. با توجه به پایین بودن ضریب هدایت حرارتی سیالات رایج در سیستم‌های مبادله‌کن گرما، یافتن روش‌های افزایش انتقال حرارت همواره مورد توجه محققین بوده است. یکی از این روش‌ها برای بهبود انتقال حرارت، پراکنده نمودن ذرات ریز با ضریب هدایت حرارتی بالا در سیال پایه است [۲].

بر اساس متون علمی موجود، مطالعات و پژوهش‌های تجربی و تئوری زیادی از حدود صد و سی سال پیش، زمان ارائه نظریه ماکسول [۳]، برای بررسی مخلوط‌های سیال-جامد حاوی ذراتی با اندازه میلی‌متر و میکرومتر انجام شده است. دیده شده است که به دلیل بزرگی ذرات جامد و چگالی بالای آن‌ها و در نتیجه بزرگی نیروی گرانشی وارد بر آنها، رسوب این ذرات در سیال (و ناپایداری مخلوط) اجتناب‌ناپذیر است. رسوب این ذرات باعث افزایش نیروی اصطکاک در جریان شده و حتی منجر به خوردگی مجاری شده است. بنابراین استفاده از اینگونه ذرات در سیال توجیه عملی مناسبی ندارد.

چوی [۴] در سال ۱۹۹۳، با توجه به فرصت پیش آمده با ظهور نانو تکنولوژی، افزودن مواد فلزی با ابعاد نانومتر در سیالات عامل معمولی مانند آب، اتیلن گلیکول و روغن صنعتی را برای بهبود خواص حرارتی اینگونه سیالات پیشنهاد نمود.

وی مخلوطی از سیال پایه و ذرات با ابعاد نانومتر را "نانوسیال" نامید که در منابع علمی نیز بیشتر به همین نام خوانده شده است. اندازه متوسط ذرات در نانوسیالات می‌تواند از 100nm تا 10nm و یا حتی کوچکتر باشد. چوی عنوان نمود که نانوسیالات می‌توانند به عنوان نسل بعدی سیالات عامل باشند، زیرا قابلیت بهتری برای انتقال گرما نسبت به سیالات پایه (سیالات بدون نانو ذرات) از خود نشان می‌دهند. خواص نانوسیالات از مخلوط‌های حاوی ذرات با ابعاد میکرونی و میلی‌متری بهتر است زیرا با کوچک‌تر شدن ذرات نه تنها نسبت سطح به حجم ذرات بیشتر شده (که خود می‌تواند عاملی در بهبود خواص باشد)، بلکه پایداری مخلوط‌های نانو سیال نیز از مخلوط‌های میکرونی و میلی‌متری بیشتر می‌شود. همچنین حرکت براونی نانوذرات به سبب جرم کمترشان، بیشتر بوده و باعث افزایش بیشتر ضریب هدایت حرارتی می‌شود.

با مطرح شدن نانوسیال بعنوان سیال عامل مناسب در تبادل حرارت و پیشرفت علوم مرتبط با نانو تکنولوژی، بررسی و مطالعه رفتار حرارتی نانوسیالات طی دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار

گرفته است. در این راستا، محققان زیادی به مدلسازی و شبیه‌سازی عددی میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیالات در مجاری و محفظه‌ها پرداخته‌اند. در شبیه‌سازی عددی مسائل نانوسیالات دو دیدگاه وجود دارد. در دیدگاه اول که رایج‌تر است، نانوسیال، تک‌فازی در نظر گرفته می‌شود و اثر نانوذرات در خواص معادل لحاظ می‌شود و در دیدگاه دوم از طرح دوفازی بهره گرفته می‌شود که در مقالات کمتر استفاده شده است. طرح تک‌فازی ساده‌تر بوده و از نظر محاسباتی مقرون به صرفه است. رفتار نانوسیال تحت اثر عوامل مختلفی مانند حرکت براونی، بلوری شدن در سطح مشترک سیال-جامد، حرکت گلوله‌ای فونون‌ها در ذرات، زنجیره‌ای شدن نانوذرات و اصطکاک بین سیال و ذرات جامد است. گفتنی است که توصیف ریاضی و شبیه‌سازی تمامی این موارد از مشکلات مدل‌سازی عددی نانوسیالات است.

تاکنون توسط محققان زیادی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال بصورت اجباری و طبیعی مطالعه و بررسی شده است. مایگا و همکاران [۵ و ۶] به طور عددی خواص حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیالات عبوری از لوله‌ای که به طور یکنواخت حرارت داده می‌شود را در جریان آرام با مدل تک‌فازی بررسی نموده‌اند. نتایج نشان داده که افزودن نانوذرات، انتقال حرارت را نسبت به سیال پایه به طرز قابل توجهی افزایش می‌دهد. معایب نانوسیالات در انتقال حرارت نیز توسط مایگا و همکاران [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. افزودن نانوذرات سبب می‌شود تا تنش برشی دیواره زیادتر شود که این افزایش با نسبت حجمی نانوذرات نسبت مستقیم دارد.

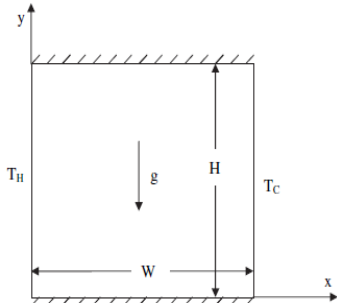
مثالی دیگر از نتایج بحث برانگیز انتقال حرارت نانوسیال توسط خانافر و همکاران [۸] گزارش نموده‌اند که به بررسی نانوسیال آب-اکسید مس در یک محفظه مربعی پرداخته‌اند. آنها گزارش کردند که انتقال حرارت با افزایش درصد حجمی نانوذرات در هر عدد گراشاف افزایش می‌یابد. اکبری‌نیا [۹] به بررسی اثر نانوسیال بر انتقال حرارت و اصطکاک در یک لوله‌ی خمیده با دبی ثابت پرداخته است. همچنین ون و دینگ [۱۰] اثر افزایش نانوذرات بر کم شدن انتقال حرارت را بصورت تجربی بررسی کرده‌اند. ابوندا و همکاران [۱۱] نشان دادند که افزایش انتقال حرارت جابجایی طبیعی به طور عمده وابسته به مقدار رایلی است. مثلاً برای رایلی ۱۰۴ افزایش نانوذرات اثری بر انتقال حرارت ندارد درحالی که برای رایلی‌های بالاتر موثر است.

بررسی نانوسیال با خواص متغیر (لزجت و ضریب هدایت حرارتی متغیر با دما) در محفظه توسط ابوندا و همکاران [۱۲] با استفاده از تقریب بوزینسک مطالعه شده است. آنها دریافتند که در رایلی-های بالا عدد ناسلت متوسط به مدل لزجت متغیر بیشتر از مدل

استفاده از برازش منحنی بر داده‌های تجربی) در یک محفظه‌ی مربعی پرداخته می‌شود و نتایج آن با نتایج حالت دانسیته ثابت مقایسه می‌شود.

۲- هندسه حل و معادلات حاکم

هندسه حل طبق با شکل ۱ در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): هندسه حل

سیال داخل محفظه نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص متغیر تابع دما در نظر گرفته شده است. ساختار جریان با توجه به محدوده بررسی آرام فرض شده. با فرض تعادل گرمایی بین نانوذرات و سیال پایه و شرط عدم لغزش میان دو جزء، حل معادلات حاکم نوشته شده است. در جدول (۱) خواص ترموفیزیکی نانوذرات و سیال پایه در دمای مرجع 22°C ارائه شده است [۱۹].

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات

خواص فیزیکی	سیال پایه (آب)	نانوذرات (Al_2O_3)
c_p	۴۱۷۹	۷۶۵
ρ	۹۹۷/۸	۳۹۷۰
k	۰/۶	۲۵
$\mu \times 10^{-۴}$	۹/۵۸	-
$\beta \times 10^{-۴}$	۲/۳	۰/۸۵
d_p	0.384×10^{-۹}	47×10^{-۹}

با توجه به فرضیات فوق، معادلات حاکم بر جریان آرام و دائم دوبعدی شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به صورت زیر است [۲۱]:

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

$$\rho_{nf} \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{3}\mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \quad (2)$$

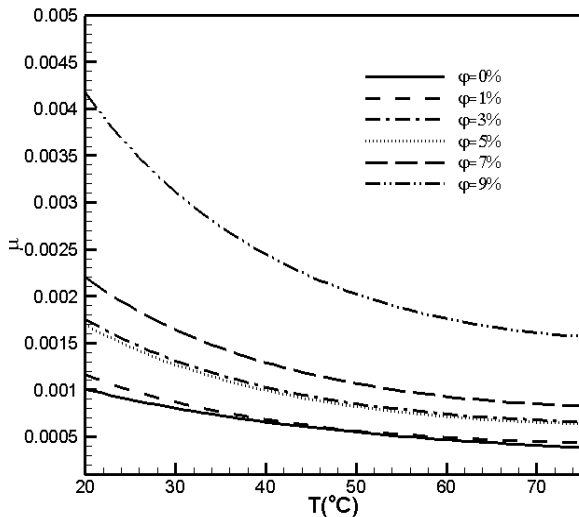
ضریب هدایت حرارتی متغیر وابسته است. آنها گزارش دادند که برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در رایلی‌های بالا با افزایش درصد حجمی نانوذرات بالای ۵٪، عدد ناسلت کاهش و در رایلی‌های پایین افزایش می‌یابد. برای نانوسیال آب-اکسید مس، عدد ناسلت در رایلی‌های بالا به طور پیوسته کاهش می‌یابد و در رایلی‌های پایین به تغییرات کسر حجمی نانوذرات حساس نیست. همچنین آنها اشاره نمودند که مدل بریکمن برای لزجت و مدل MG برای ضریب هدایت حرارتی مدل‌های مناسبی نیستند. از این رو از مدل نگوین و همکاران [۱۳] برای لزجت و از مدل چن و همکاران [۱۴] برای ضریب هدایت حرارتی که ساز و کارهای بیشتری را برای هدایت حرارتی از جمله حرکت براونی را استفاده نموده‌اند.

تابحال روش‌ها و دیدگاه‌های متعددی برای حل جریان با دانسیته متغیر با گرادیان دمای زیاد به کار گرفته شده است. چنوت و پاولوکی [۱۵] معادلات ناویر استوکس گذرا را به صورت عددی حل نمودند و حل مبسوطی را برای حل جریان با استفاده از قانون گاز ایده‌آل به دست آوردند. هونگ و چنگ [۱۶] به بررسی جابجایی آزاد هوا با فرض جریان تراکم پذیر در یک حفره مربعی بدون استفاده از تقریب بوزینسک روی یک شبکه جابجا شده پرداختند. دربندی و حسینی‌زاده [۱۷ و ۱۸] آنالوژی جدیدی برای حل جریان تراکم‌پذیر با ماخ پایین را توسعه دادند. آنها با استفاده از الگوریتم سیمپل هر دو جریان تراکم‌ناپذیر و جریان تراکم‌پذیر را حل نمودند. آنها نشان داده‌اند که برای حل جریان‌های با گرادیان دمای بالا باید از روش تراکم‌پذیر استفاده شود.

در مطالعات قبلی، جابجایی آزاد نانوسیال با استفاده از تقریب بوزینسک بررسی شده است، یعنی دانسیته ثابت فرض شده و تغییرات دانسیته با دما در جمله بویانسی معادله ممنتوم خطی فرض شده است. در تحقیق حاضر تغییرات دانسیته آب با بکارگیری یک رابطه همبسته با استفاده از برازش منحنی بر داده‌های تجربی در نظر گرفته شده است و این تغییرات در ارزیابی سایر خواص نیز لحاظ می‌شود. در برخی مطالعات از جمله مراجع [۱۲، ۱۹ و ۲۰]، دمای دیوار سرد بعنوان دمای مرجع فرض شده است. در کار حاضر دمای مرجع یک بار دمای دیوار سرد، بار دیگر دمای دیوار گرم و سپس دمای متوسط در نظر گرفته شده است و نتایج به دست آمده از این سه حالت با تقریب غیر بوزینسک و دانسیته متغیر مقایسه شده است. همچنین از آنجا که در مقالات در دسترس، جابجایی طبیعی نانوسیال با دانسیته متغیر بررسی نشده است، در کار حاضر به مطالعه‌ی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال با ضریب هدایت حرارتی متغیر (با استفاده از مدل چن و همکاران)، ویسکوزیته متغیر (با استفاده از مدل ابوندا و همکاران)، و دانسیته متغیر (با

$$\mu_{Al_2O_3} = \exp(3.003 - 0.04203T - 0.5445\varphi + 0.0002553T^2 + 0.0524\varphi^2 - 1.622\varphi^{-1}) \quad (10)$$

که در آن دما بر حسب درجه سانتی‌گراد و لزجت بر حسب سانتی‌پوز است. تغییرات لزجت نانوسیال بر حسب دما برای مقادیر مختلف φ ، با توجه به رابطه (۱۰) در شکل (۲) رسم شده است.



شکل (۲): تغییرات لزجت نانوسیال آب-اکسید آلومینیم بر حسب دما

لزجت، ضریب انبساط حرارتی و دانسیته آب نیز بر اساس برازش منحنی بر مقادیر آنها طبق با مرجع [۲۱] در محدوده دمایی ۲۱ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد بصورت زیر بدست می‌آید:

$$\mu_f = (1.272(\ln T)^5 - 8.736(\ln T)^4 + 33.7(\ln T)^3 + 246.6(\ln T)^2 + 518.9(\ln T) + 1153.9) \times 10^{-6} \quad (11)$$

$$\beta_f = 8.9 \times 10^{-6} (\ln T)^{2.872} \quad (12)$$

$$\rho_f = 1094.1 \exp(-0.001045T) - 94.137 \exp(-0.01252T) \quad (13)$$

دانسیته آب بر اساس تقریب بوزینسک عبارتست از:

$$\rho_f = \rho_{f_0} (1 - \beta_{f_0} (T - T_r)) \quad (14)$$

که در آن دما بر حسب درجه سانتی‌گراد است. در شکل (۳) تغییرات دانسیته با دما از رابطه (۱۳) و (۱۴) در دمای مرجع مختلف نشان داده شده است.

$$\rho_{nf} \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{2}{3} \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - \rho_{nf} g \quad (3)$$

$$(\rho c_p)_{nf} \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

معادلات حاکم برای جریان با دانسیته ثابت با تقریب بوزینسک ساده می‌شوند و معادله ممنوم در جهت y به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$\left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_{nf}} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + g \beta_{nf} (T - T_r) \quad (5)$$

دانسیته و گرمای ویژه موثر نانوسیال از روابط (۶) و (۷) بر حسب خواص نانوذرات و سیال پایه و کسر حجمی نانوذرات بدست می‌آید [۱۳]:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_p \quad (6)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho c_p)_f + \varphi (\rho c_p)_p \quad (7)$$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از طرح چن و همکاران [۱۴] استفاده شده است. این طرح با در نظر گرفتن تاثیر اندازه نانوذرات بر ضریب هدایت حرارتی در محدوده دمایی ۲۱ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد بدست آمده و عبارتست از:

$$k_{nf} = (1 + 64.7\varphi^{0.7640} (d_f / d_p)^{0.3690} \times (k_p / k_f)^{0.7476} \text{Pr}_T^{0.9955} \text{Re}^{1.2321}) k_f \quad (8)$$

که Pr_T و Re توسط رابطه (۹) محاسبه می‌شوند:

$$\text{Pr}_T = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi \mu_f^2 l_f} \quad (9)$$

که در آن، l_f مسیر متوسط نانوذرات و برابر با 0.117 نانومتر و k_b ثابت بولتزمن بوده و برابر با 1.38×10^{-23} است. [۱۵]. لزجت نانوسیال آب-اکسید آلومینوم نیز بصورت تابعی از دما و کسر حجمی نانو ذرات بر اساس داده‌های تجربی نگوبین و همکاران [۱۳] و برازش منحنی توسط ابوندا و همکاران [۱۲] عبارتست از:

با جایگذاری روابط (۱۸) و (۱۹) در (۱۷)، عدد ناسلت موضعی به صورت رابطه (۲۰) بدست می‌آید:

$$Nu = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} \quad (20)$$

عدد ناسلت متوسط با انتگرالگیری از رابطه (۲۰) بدست می‌آید:

$$Nu_{avg} = \int_0^1 Nu dY \quad (21)$$

برای محاسبه عددی انتگرال فوق از قاعده سیمسون ۱/۳ استفاده می‌شود. نسبت عدد ناسلت بصورت نسبت عدد ناسلت متوسط نانوسیال به عدد ناسلت متوسط سیال پایه، بصورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود:

$$Nu_{avg}^* = \frac{Nu_{avg}(\varphi)}{Nu_{avg}(\varphi=0)} \quad (22)$$

۳- شبکه‌ی بهینه و اعتبارسنجی کد

چندین شبکه مختلف برای جابجایی آزاد آب خالص در هندسه مورد نظر بررسی شده و شبکه بهینه با تعداد نقاط ۶۱×۶۱ بدست آمده است. عدد ناسلت متوسط حاصل از کار حاضر برای آب با مراجع [۲۲] و [۲۳] و برای نانوسیال با مرجع [۱۲] برای مقادیر مختلف رایلی در جدول (۲) مقایسه شده است.

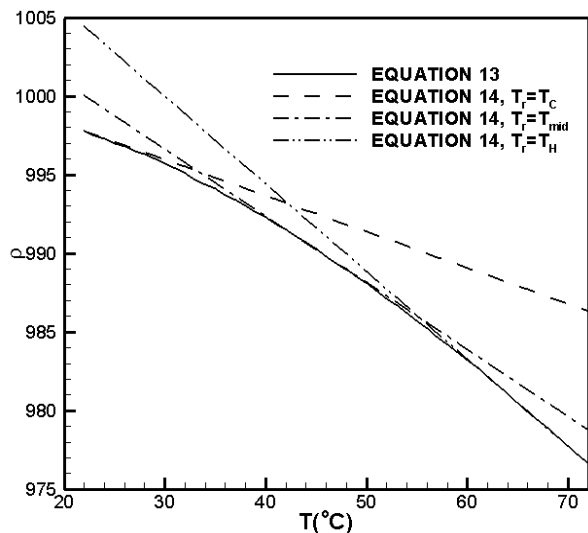
جدول (۲): عدد ناسلت متوسط در مقادیر مختلف رایلی برای آب و نانوسیال با درصد حجمی ۱٪ مقایسه نتایج حاضر با نتایج قبلی

Ra	آب			نانوسیال	
	مطالعه حاضر	طالبی و همکاران [۲۳]	دیویس [۲۲]	مطالعه حاضر	ابوندا و همکاران [۱۲]
10 ³	-	-	-	۱/۵۱	۱/۳۲
10 ⁴	۲/۲۹	۲/۲۵	۲/۲۴	۳/۰۵	۲/۹۶
10 ⁵	۴/۷۴	۴/۵	۴/۵۲	۶/۳۵	۵/۸۹
10 ⁶	۹/۱۲	۹/۱۵	۹/۰۴	-	-

۴- بررسی نتایج

مقایسه انتقال حرارت آب با دانسیته ثابت و متغیر

برای مقایسه نتایج برای آب با فرض دانسیته متغیر (غیربوزینسک) و فرض دانسیته ثابت (تقریب بوزینسک)، یک بار معادلات (۴-۱) و بار دیگر معادلات (۱، ۲، ۵ و ۴) حل شده است. عدد ناسلت متوسط برحسب اختلاف دمای دیواره‌های گرم و سرد برای دو حالت مذکور در شکل (۴) رسم شده است.



شکل (۳): تغییرات دانسیته سیال پایه (آب) با دما بر اساس معادلات ۱۳ و ۱۴ و دمای مرجع مختلف

نتایج عددی حاصل با استفاده از متغیرهای بی‌بعد (۱۵) بصورت بدون بعد ارائه می‌شوند:

$$X = \frac{x}{H}; \quad Y = \frac{y}{H}; \quad U = \frac{u}{\alpha_{f_0}/H}; \quad V = \frac{v}{\alpha_{f_0}/H}; \quad (15)$$

$$\theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}; \quad \Psi = \frac{\Psi}{\rho_{f_0} \alpha_{f_0}}$$

و اعداد بدون بعد رایلی و پرانتل بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Ra = \frac{g \beta_{f_0} (T_H - T_C) H^3}{\alpha_{f_0} \nu_{f_0}}, \quad Pr = \frac{\nu_{f_0}}{\alpha_{f_0}} \quad (16)$$

که در آن، β_{f_0} ، α_{f_0} و ν_{f_0} به ترتیب ضریب انبساط حرارتی، ضریب پخش گرمایی و ویسکوزیته سیال پایه در دمای مرجع هستند.

برای ارزیابی انتقال حرارت از عدد ناسلت موضعی و متوسط روی دیواره گرم استفاده می‌شود. عدد ناسلت موضعی عبارتست از:

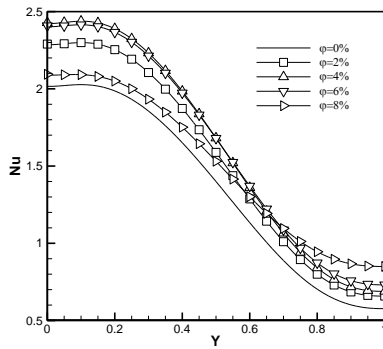
$$Nu = \frac{hH}{k_f} \quad (17)$$

که در آن، ضریب انتقال حرارت جابجایی عبارتست از:

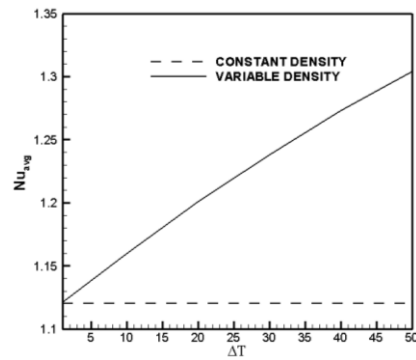
$$h = \frac{q_w}{T_H - T_C} \quad (18)$$

و شار حرارتی روی دیواره گرم عبارتست از:

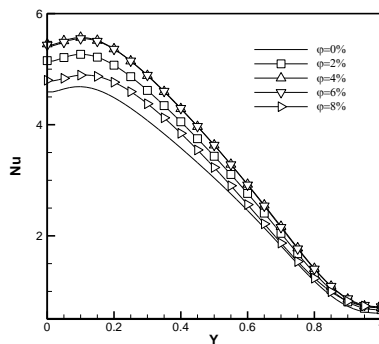
$$q_w = -k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad (19)$$



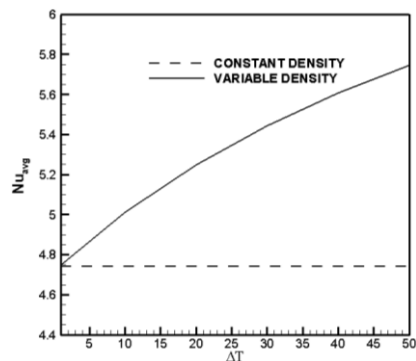
الف) $Ra=10^3$



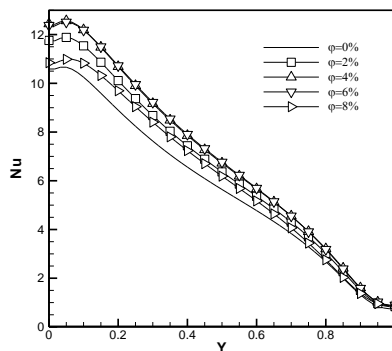
الف) $Ra=10^3$



ب) $Ra=10^4$



ب) $Ra=10^4$



ج) $Ra=10^5$

شکل (۴): تغییرات عدد ناسلت متوسط برحسب اختلاف دما

همانطور که دیده می‌شود عدد ناسلت برای دانسیته متغیر و اختلاف دمای کوچک که تقریب بوزینسک برقرار است برابر دانسیته ثابت است. اختلاف عدد ناسلت متوسط برای دانسیته ثابت و متغیر در رایلی‌های 10^3 و 10^5 به ترتیب به مقدارهای ۱۶ و ۲۱ درصد می‌رسد.

بررسی نتایج برای نانوسیال

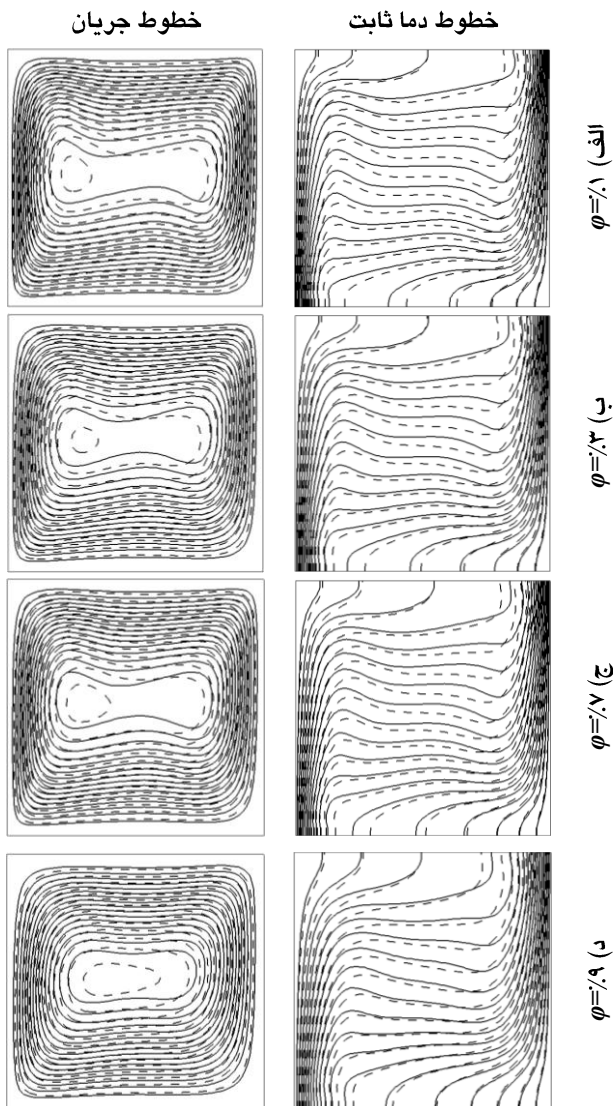
مطالعه عددی برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در محدوده درصد حجمی ۱ الی ۹ و اعداد رایلی 10^3 الی 10^6 انجام شده است. دمای دیواره سرد و دمای مرجع $22^\circ C$ بوده و اختلاف دمای دیوار گرم و سرد $50^\circ C$ است. شکل (۵) تغییرات عدد ناسلت روی دیوار گرم را برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانوذرات و اعداد رایلی مختلف نشان می‌دهد.

شکل (۵): تغییرات عدد ناسلت موضعی روی دیوار گرم برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانوذرات و اعداد رایلی

همانطور که دیده می‌شود در تمام اعداد رایلی، با افزایش ارتفاع ابتدا عدد ناسلت کمی افزایش و سپس کاهش می‌یابد. در رایلی 10^3 روند تغییرات عدد ناسلت موضعی با افزایش درصد حجمی نانوذرات، در محدوده $Y < 0.5$ عکس محدوده $Y > 0.5$ است؛ تغییرات عدد ناسلت برای درصد حجمی ۲٪ نانوذرات کمی متفاوت است.

برای تمام رایلی‌ها، عدد ناسلت موضعی از درصد حجمی ۴٪ به بعد، کاهش می‌یابد. نکته جالب در این رایلی‌ها آن است که تغییرات عدد ناسلت موضعی برای درصد حجمی ۸٪ و آب خالص اختلاف کمتری نسبت به سایر درصدهای حجمی دارند.

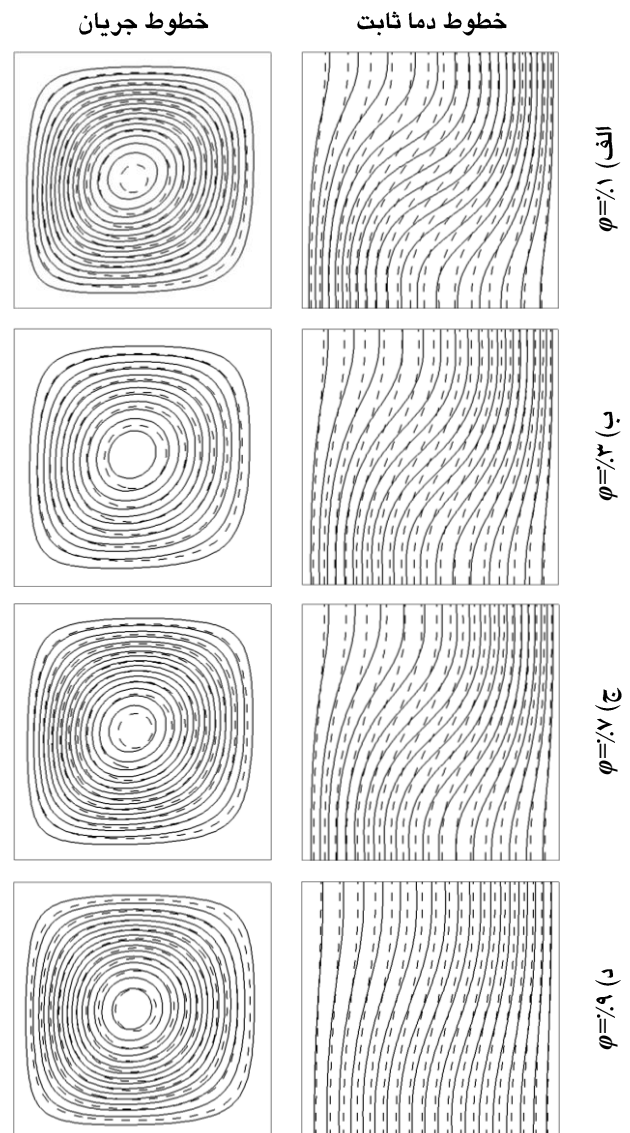
شکل (۷) خطوط جریان و خطوط دما ثابت را در رایلی 10^5 نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوی خطوط جریان و دما ثابت برای نانوسیال با دانسیته متغیر نسبت به دانسیته ثابت مانند رایلی 10^3 ، کمی متفاوت است. دیده می‌شود که نزدیک دیواره گرم، گرادیان دما در حالت دانسیته متغیر نسبت به دانسیته ثابت، بیشتر است. در این رایلی برخلاف رایلی 10^3 لایه‌بندی حرارتی به وجود می‌آید. خطوط دما ثابت در این لایه‌بندی حرارتی برای دانسیته متغیر کمی بالاتر از دانسیته ثابت است.



شکل (۷): خطوط جریان و خطوط دما ثابت برای رایلی 10^5 : دانسیته ثابت (خط چین) و دانسیته متغیر (خطوط پر)

شکل (۸) تغییرات بیشینه تابع جریان در محفظه برای دو حالت دانسیته ثابت و متغیر بر حسب درصد حجمی نانوذرات را در اعداد رایلی مختلف نشان می‌دهد. هم‌چنین تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیوار گرم برای دو حالت دانسیته ثابت و متغیر بر

شکل (۶) خطوط جریان و خطوط دما ثابت را در رایلی 10^3 نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، الگوی خطوط جریان و دما ثابت برای نانوسیال با دانسیته متغیر نسبت به دانسیته ثابت کمی متفاوت است. دیده می‌شود که نزدیک دیواره گرم، گرادیان دما در حالت دانسیته متغیر نسبت به دانسیته ثابت، در نیمه پایینی محفظه کمی بیشتر و در نیمه بالایی آن مقداری کاهش می‌یابد.



شکل (۶): خطوط جریان و خطوط دما ثابت برای رایلی 10^3 : دانسیته ثابت (خط چین) و دانسیته متغیر (خطوط پر)

نزدیک دیواره سرد این روند کاملاً عکس است. با افزایش درصد حجمی نانوذرات از انحنای خطوط دما ثابت کاسته شده و خطوط دما ثابت تقریباً موازی با دیواره گرم و سرد می‌شوند به عبارت دیگر با افزایش درصد حجمی نانوذرات هدایت حرارتی سهم بیشتری در انتقال حرارت می‌یابد.

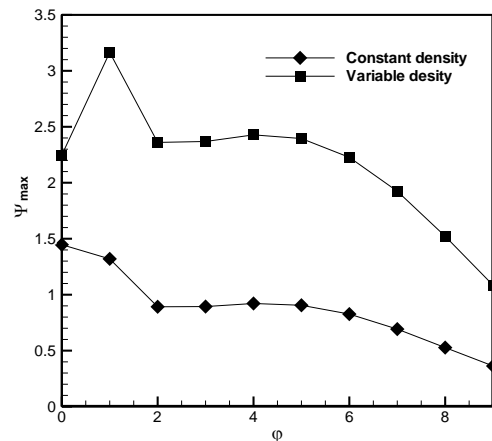
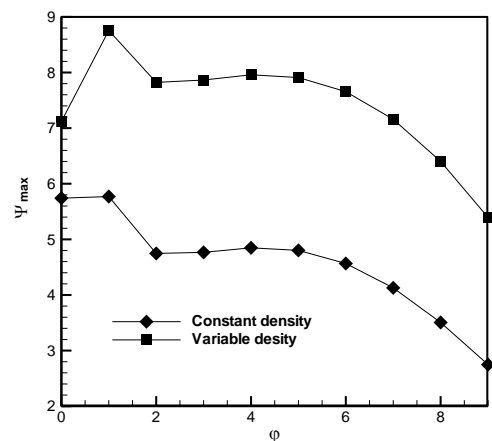
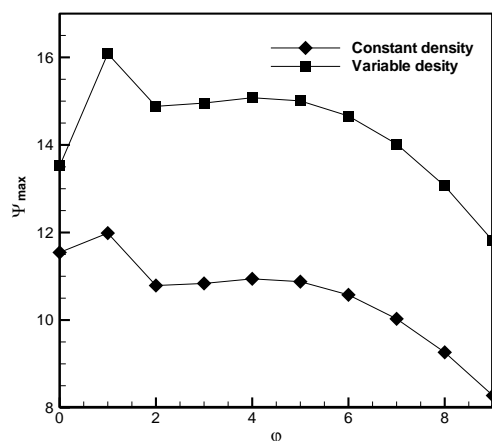
همانطور که دیده می‌شود، با افزایش عدد رایلی مقادیر تابع جریان و عدد ناسلت متوسط نیز افزایش می‌یابند. همچنین در تمام اعداد رایلی مقدار پیش‌بینی شده برای تابع جریان و عدد ناسلت متوسط در حالت دانسیته متغیر بیشتر از مقادیر آنها در حالت دانسیته ثابت است. همچنین دیده می‌شود که با افزایش درصد حجمی نانوذرات تابع جریان و عدد ناسلت متوسط ابتدا تا $\phi = 1\%$ کمی افزایش، سپس تا $\phi = 2\%$ کاهش و دوباره تابع جریان تا $\phi = 4\%$ و عدد ناسلت تا $\phi = 5\%$ افزایش و در پایان تا $\phi = 9\%$ کاهش می‌یابد. از مقایسه بیشینه تابع جریان و عدد ناسلت متوسط دیده می‌شود که تغییرات این دو بسیار مشابه است، یعنی هرچه قدرت جابجایی زیادتر می‌شود، انتقال حرارت نیز زیادتر می‌شود. از آنجا که عامل حرکت در جابجایی آزاد نیروی بویانسی است و تغییر دانسیته و در نتیجه نیروی بویانسی طبق شکل (۳) در اختلاف دماهای بالا در حالت دانسیته متغیر بسیار بیشتر از مقدار آن در حالت دانسیته ثابت است، افزایش در مقدار تابع جریان و عدد ناسلت در حالت دانسیته متغیر قابل توجه است.

نکته دیگری که گفتنی است آن است که در حالت دانسیته ثابت با افزودن نانوذرات (به جز $\phi = 1\%$) تابع جریان بیشینه نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد و در حالت دانسیته متغیر نیز با افزایش درصد حجمی نانوذرات بیش از 6% ، تابع جریان بیشینه نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد. عدد ناسلت متوسط در رایلی 10^3 با افزودن نانوذرات نسبت به سیال پایه، افزایش می‌یابد، گرچه با افزایش نانوذرات از یک مقدار به بعد، این افزایش کمتر است. در اعداد رایلی 10^4 و 10^5 ، در حالت دانسیته ثابت با افزودن نانوذرات (به جز $\phi = 1\%$) عدد ناسلت متوسط نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد و در حالت دانسیته متغیر نیز با افزایش درصد حجمی نانوذرات به مقدار 9% ، عدد ناسلت متوسط نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد.

تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب درصد حجمی نانوذرات ناشی از اثرات متفاوت تغییرات ضریب هدایت حرارتی، دانسیته و لزجت سیال است. با افزایش درصد حجمی نانوذرات، لزجت نانوسیال، دانسیته و ضریب هدایت حرارتی افزایش می‌یابند. با افزایش لزجت و افزایش نیروی اصطکاک، سرعت جریان نانوسیال داخل محفظه کاهش می‌یابد و با کاهش سرعت، انتقال حرارت جابجایی نیز کاهش می‌یابد.

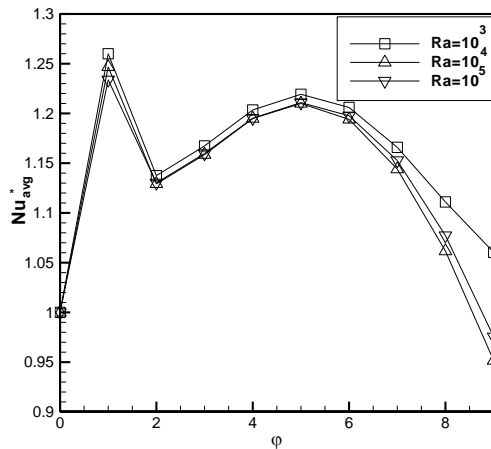
از سوی دیگر با افزایش درصد حجمی نانوذرات، دانسیته و ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته و در نتیجه انتقال حرارت هدایتی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در درصدهای حجمی مختلف بسته به اینکه کدام عامل غالب باشد، ضریب انتقال حرارت افزایش یا کاهش می‌یابد.

حسب درصد حجمی نانوذرات در اعداد رایلی مختلف در شکل (۹) نشان داده شده است.

الف) $Ra=10^3$ ب) $Ra=10^4$ ج) $Ra=10^5$

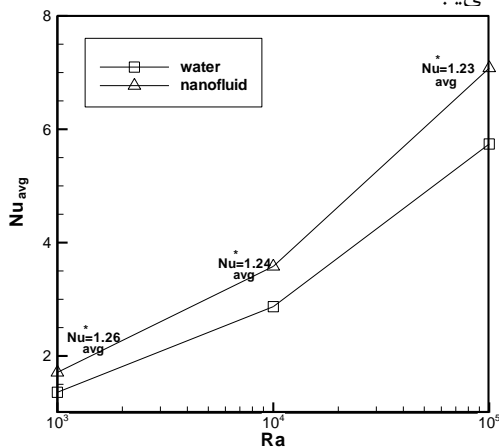
شکل (۸): تغییرات بیشینه تابع جریان در محفظه بر حسب درصد حجمی برای رایلی‌های مختلف

بیشتر است. از شکل (۱۰) نیز دیده می‌شود که در رایلی‌های ۱۰۴ و ۱۰۵، افزودن ۰.۹٪ نانوذرات به سیال پایه، عدد ناسلت متوسط را کمی کاهش می‌دهد.



شکل (۱۰): نسبت عدد ناسلت متوسط نانوسیال به سیال پایه بر حسب درصد حجمی نانوذرات

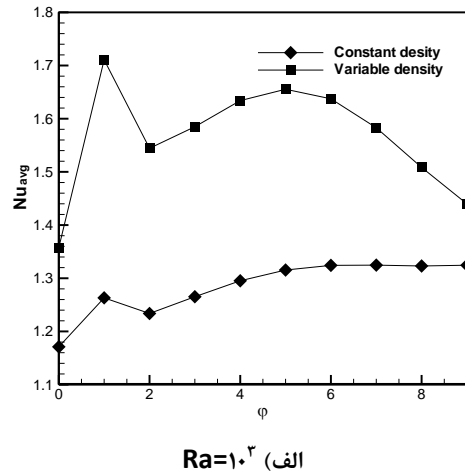
برای نشان دادن اثر وجود نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رایلی برای نانوسیال ($\phi=0.1$) و سیال پایه (آب) و مقدار نسبت عدد ناسلت در شکل (۱۱) مقایسه شده است. دیده می‌شود که عدد ناسلت متوسط نانوسیال در رایلی‌های 10^3 ، 10^4 و 10^5 بترتیب ۲۶، ۲۴ و ۲۳ درصد افزایش می‌یابد.



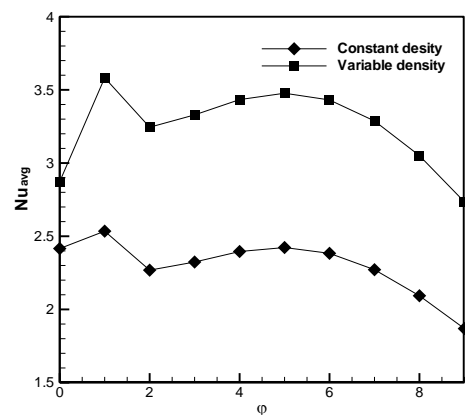
شکل (۱۱): مقایسه تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال و سیال پایه بر حسب عدد رایلی

۵- نتیجه‌گیری

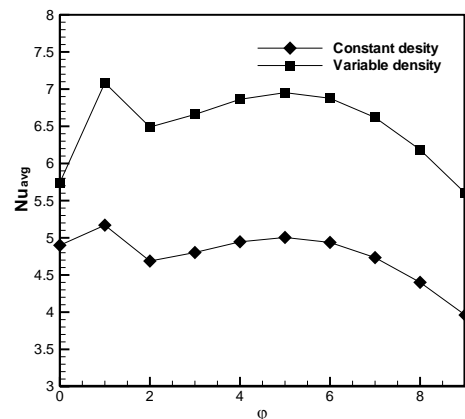
مطالعه عددی برای آب خالص و نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در رایلی‌های 10^3 - 10^5 و درصد حجمی ۰-۰.۹ با چگالی ثابت و متغیر و مقایسه این دو انجام شد. براساس مطالعه انجام شده، نتایج عبارتند از:



الف) $Ra=10^3$



ب) $Ra=10^4$



ج) $Ra=10^5$

شکل (۹): تغییرات عدد ناسلت متوسط در محفظه بر حسب درصد حجمی برای رایلی‌های مختلف

شکل (۱۰) نسبت عدد ناسلت متوسط بر حسب ϕ را در حالت دانسیته متغیر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که افزایش نسبی عدد ناسلت ناشی از افزودن نانوذرات در $\phi=0.1$ بیشترین مقدار را دارد و بطور کلی افزایش نسبی عدد ناسلت در رایلی 10^3

در حالت دانسیته متغیر، بیشترین افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسیال در رایلی ۱۰۳ رخ می‌دهد.
با افزودن نانوذرات به مقدار ۹٪ در رایلی‌های ۱۰۴ و ۱۰۵، عدد ناسلت متوسط نسبت به سیال پایه کمی کاهش می‌یابد.
بیشترین افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسیال (۱٪) در رایلی‌های ۱۰۳، ۱۰۴ و ۱۰۵ بترتیب ۲۶، ۲۴ و ۲۳ درصد است.

۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مایلند از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان بخاطر حمایت از این تحقیق تشکر و قدردانی نمایند.

برای آب خالص با در نظر گرفتن دمای مرجع در دمای متوسط دیوار سرد و گرم، تغییرات چگالی با در نظر گرفتن تقریب بوزینسک و غیر بوزینسک تفاوت اندکی دارد، اما با در نظر گرفتن دمای مرجع در دمای دیوار سرد، اختلاف چگالی بوسیله این دو تقریب با افزایش دما افزایش می‌یابد.

در تمام اعداد رایلی مقدار پیش‌بینی شده برای تابع جریان و عدد ناسلت متوسط در حالت دانسیته متغیر نسبت به دانسیته ثابت بیشتر است.

در حالت دانسیته ثابت با افزودن نانوذرات بیش از ۱٪ و در حالت دانسیته متغیر با افزودن نانوذرات بیش از ۶٪، تابع جریان بیشینه نسبت به سیال پایه کاهش می‌یابد.

۷- مراجع

- [۱۳] Nguyen, C.T.; Desgranges, F.; Roy, G.; Galanis, N.; Mare, T.; Boucher, S.; Minsta, H. A.; "Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids-hysteresis phenomenon", *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 28, pp. 1492-1506, 2007.
- [۱۴] Chon, C.H.; Kihm, K.D.; Lee, S.P.; Choi, S.U.S.; "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement", *Appl. Phys. Lett*, vol. 87, pp. 107-153, 2005.
- [۱۵] Chenoweth, D.R.; Paolucci, S.; "Natural convection in an enclosed vertical air layer with large horizontal temperature differences", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 169, pp.173-210, 1986.
- [۱۶] Hung, K.S.; Cheng, C.H.; "Pressure effects on natural convection for non-Boussinesq fluid in a rectangular enclosure", *Numerical Heat Transfer. Part A*, vol. 41 (5), pp. 515-528, 2002.
- [۱۷] Darbandi, M.; Hosseinizadeh, S.F.; "A general strategy to include density variation in incompressible algorithms", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 39 (3), pp. 372-380, 2003.
- [۱۸] Darbandi, M.; Hosseinizadeh, S.F.; "Numerical simulation of thermobuoyant flow with large temperature variation", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 20 (2) pp. 285-296, 2006.
- [۱۹] Abu-Nada, E.; Chamkha, A.J.; "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO-EG-Water nanofluid", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 2339-2352, 2010.
- [۲۰] Abu-Nada, E.; "Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al_2O_3 -water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 30, pp. 679-690, 2009.
- [۲۱] Bijan, A.; "Convection heat transfer", third edition, Wiley, 1984.
- [۲۲] Vahl Davis, G. D.; "Natural convection of air in a square cavity a bench mark numerical solution", *International Journal of Numerical Methods of Fluids*, vol. 3, pp. 249-264, 1983.
- [۲۳] Talebi, F.; Mahmoudi, A. H.; Shahi, M.; "Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 79-90, 2010.
- [۱] Vahl Davis, G. D.; Jones, I.P.; "Natural convection in a square cavity: a benchmark numerical solution", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, vol. 3, pp. 227-248, 1983.
- [۲] Trisaksri, V.; Wongwises, S.; "Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids", *Ren. Sust. En. Rev.*, vol. 11, pp. 512-523, 2007.
- [۳] J.C. Maxwell; "A Treatise on Electricity and Magnetism", second Ed., Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.
- [۴] Choi, S.U.S.; "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, FED-vol. 231/MD-vol. 66*, pp. 99-105, 1995.
- [۵] Maiga, S.E.B.; Nguyen, C.T.; Galanis, N.; Roy, G.; "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube", *Superlattices and Microstructures*, 35, pp. 543-557, 2004.
- [۶] Maiga, S.E.B.; Nguyen, C.T.; Galanis, N.; Roy, G.; "Hydrodynamic and thermal behaviours of a nanofluid in a uniformly heated tube", *Computational Studies*, vol. 5, pp. 453-462, 2004.
- [۷] Maiga, S.E.B.; Palm, S.J.; Nguyen, C.T.; Roy, G.; Galanis, N.; "Heat transfer enhancement by using nanofluids in forced convection flows", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 26, pp. 530-546, 2005.
- [۸] Khanafer, K.; Vafai, K.; Lightstone, M.; "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 46, pp. 3639-3653, 2003.
- [۹] Akbarinia, A.; "Impacts of nanofluid flow on skin friction factor and Nusselt number in curved tubes with constant mass flow", *Int. J Heat Fluid Flow*, vol.29, pp.229-241, 2008.
- [۱۰] Wen, D.; Ding, Y.; "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", *Int. J. HeatMass Transfer*, vol. 47, pp. 5181-5188, 2004.
- [۱۱] Abu-Nada, E.; Masoud, Z.; Hijazi, A.; "Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids", *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, vol. 35 (5), pp. 657-665, 2008.
- [۱۲] Abu-Nada, E.; Masoud, Z.; Oztop, H. F.; Campo, A.; "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures", *Int. J. Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 479-491, 2010.

۸- فهرست علائم

c_p گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

H ارتفاع محفظه (m)

d قطر (m)

g شتاب گرانش (ms^{-2})

h ضریب انتقال حرارت محلی (m)

k ضریب هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)

Nu عدد ناسلت $Nu = hH / k_f$

Pr عدد پرانتل $Pr = \nu_{f_0} / \alpha_{f_0}$

q_w شار حرارتی (W m^{-2})

Ra عدد رایلی $Ra = g\beta_{f_0} (T_H - T_C) H^3 / \alpha_{f_0} \nu_{f_0}$

Re عدد رینولدز $Re = \rho_f k_b T / 3\pi \mu_f^2 l_f$

T دمای با بعد (K)

u, v مولفه‌های سرعت در جهت‌های x و y (m s^{-1})

U, V سرعت‌های بدون بعد $U = \frac{u}{\alpha_{f_0} / H}$, $V = \frac{v}{\alpha_{f_0} / H}$

W عرض محفظه (m)

X, Y مختصات بدون بعد

x, y مختصات با بعد (m)

علائم یونانی

α ضریب پخش گرما ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

β ضریب انبساط گرمایی (K^{-1})

ϕ کسر حجمی نانوذرات

θ دمای بی بعد $\theta = (T - T_C) / (T_H - T_C)$

ν ویسکوزیته سینماتیک ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

ψ تابع جریان با بعد ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

Ψ تابع جریان بی بعد $\Psi = \psi / \rho_{f_0} \alpha_{f_0}$

ρ دانسیته (kg m^{-3})

μ ویسکوزیته دینامیک (N m s^{-1})

زیرنویس‌ها

avg متوسط

C سرد

f سیال

H گرم

nf نانوسیال

p نانوذرات

w دیوار