



مطالعه عددی جابجایی طبیعی نانوسيال آب-اکسیدآلومینیوم با خواص متغیر در یک محفظه

قنبعلی 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 نانوسيال آب-اکسیدآلومینیوم 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 دیوارهای گرم و سرد محفظه C° در نظر گرفته شده است، و نتایج برای کسر حجمی نانوذرات از $0\text{--}10^3$ الی 10^5 و اعداد رایلی از $0\text{--}10^9$ در 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 نانوسيال، در رایلی 10^3 رخ می‌دهد. برای نانوسيال با کسر حجمی در رایلی‌های 10^4 و 10^5 ، عدد ناسلت نسبت به سیال پایه کمی کاهش می‌یابد. برای کسر حجمی 10^1 ، بیشترین افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسيال در رایلی‌های 10^3 ، 10^4 و 10^5 به ترتیب 24 ، 26 و 23 درصد است.

کلمات کلیدی

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

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

گرفته است. در این راستا، محققان زیادی به مدلسازی و شبیه‌سازی عددی میدان جریان و انتقال حرارت نانوسيالات در مجاری و محفظه‌ها پرداخته‌اند. در شبیه‌سازی عددی مسائل نانوسيالات دو دیدگاه وجود دارد. در دیدگاه اول که رایج‌تر است، نانوسيال، 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 مقرن به صرفه است. رفتار نانوسيال 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 نانوسيالات است.

تاکنون توسط محققان زیادی انتقال حرارت جابجایی نانوسيال بصورت اجباری و طبیعی مطالعه و بررسی شده است. مایبیگا و همکاران [۵] و [۶] به طور عددی خواص حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسيالات 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 نانوسيالات در انتقال حرارت نیز توسط مایبیگا 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 نانوسيال توسط خانافر و همکاران [۸] گزارش نموده‌اند که به بررسی نانوسيال آب-اکسید مس در یک محفظه مربعی پرداخته‌اند. آنها گزارش کردند که انتقال حرارت با افزایش درصد حجمی نانوذرات در هر عدد گراف افزایش می‌یابد. اکبری‌نیا [۹] به بررسی اثر نانوسيال بر انتقال حرارت و اصطکاک در یک لوله‌ی خمیده با دیبی 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 عمدۀ وابسته به مقدار رایلی است. مثلا برای رایلی 10^4 افزایش نانوذرات اثری بر انتقال حرارت ندارد درحالی که برای رایلی‌های بالات موثر است.

بررسی نانوسيال 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 رایلی‌های بالا عدد ناسلت متوسط به مدل لزجت متغیر بیشتر از مدل

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 مبادله کن 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 ماسکول [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 نانوتکنولوژی، 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.

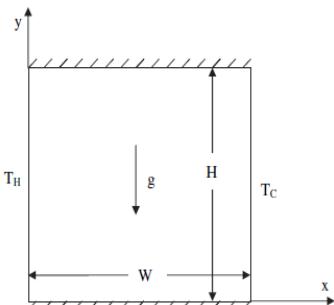
وی مخلوطی از سیال پایه و ذرات با ابعاد نانومتر را "نانوسيال" نامید که در منابع علمی نیز بیشتر به همین نام خوانده شده است. اندازه متوسط ذرات در نانوسيالات می‌تواند از 100nm تا 10nm و یا حتی کوچکتر باشد. چوی عنوان نمود که نانوسيالات می‌توانند به عنوان نسل بعدی سیالات عامل باشند، زیرا قابلیت بهتری برای انتقال گرما نسبت به سیالات پایه (سیالات بدون نانو ذرات) از خود نشان می‌دهند. خواص نانوسيالات 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 نانوسيال بعنوان سیال عامل مناسب در تبادل حرارت و پیشرفت علوم مرتبط با نانوتکنولوژی، بررسی و مطالعه رفتار حرارتی نانوسيالات طی دو دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار

استفاده از برآش منحنی بر داده‌های تجربی) در یک محفظه 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 نانوسيال آب-اکسیدآلومینیوم 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 نانوذرارات و سیال پایه و شرط عدم لغزش میان دو جزء، حل معادلات حاکم نوشته شده است. در جدول (۱) خواص ترموفیزیکی نانوذرارات و سیال پایه در دمای مرجع 22°C ارائه شده است [۱۹].

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرارات

| نانوذرارات | سیال پایه (آب) | (Al_2O_3) |
|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| c_p | ۴۱۷۹ | ۷۶۵ |
| ρ | $۹۹۷/۸$ | ۲۹۷۰ |
| k | .۰/۶ | ۲۵ |
| $\mu \times 10^4$ | ۹/۵۸ | - |
| $\beta \times 10^{-3}$ | ۲/۳ | .۰/۸۵ |
| d_p | $.۳۸۴ \times 10^{-9}$ | ۴۷×10^{-9} |

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

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

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

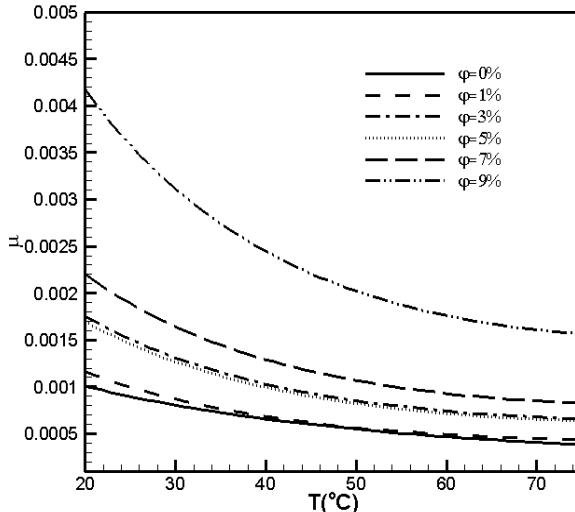
ضریب هدایت حرارتی متغیر وابسته است. آنها گزارش دادند که برای نانوسيال آب-اکسیدآلومینیوم در رایلهای بالا با افزایش درصد حجمی نانوذرارات بالای ۵٪، عدد ناسلت کاهش و در رایلهای پایین افزایش می‌یابد. برای نانوسيال آب-اکسید مس، عدد ناسلت در رایلهای بالا به طور پیوسته کاهش می‌یابد و در رایلهای پایین به تغییرات کسر حجمی نانوذرارات 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 گردایان دمای زیاد به کار گرفته شده است. چنوت و پاولوکی [۱۵] معادلات ناویر استوکس گذرا را به صورت عددی حل نمودند و حل مبسطه را برای حل جریان باستفاده از قانون گاز ایده‌آل به دست آورده‌اند. 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. دریندی 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 گردایان دمای بالا باید از روش تراکم‌پذیر استفاده شود.

در مطالعات قبلی، جابجایی آزاد نانوسيال با استفاده از تقریب بوزینسک بررسی شده است، یعنی دانسیته ثابت فرض شده و تغییرات دانسیته با دما در جمله بوبانسی معادله ممنتوم خطی فرض شده است. در تحقیق حاضر تغییرات دانسیته آب با بکارگیری یک رابطه همبسته با استفاده از برآش 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 نانوسيال با دانسیته متغیر بررسی نشده است، در کار حاضر به مطالعه عددی جابجایی طبیعی نانوسيال 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 نانوسيال بر حسب دما برای مقادیر مختلف φ ، با توجه به رابطه (۱۰) در شکل (۲) رسم شده است.



شکل (۲): تغییرات لزجت نانوسيال آب-اکسیدآلومینیم

برحسب دما

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

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

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

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

دانسیته آب براساس 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.

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

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{2}{3} \mu_{nf} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] - \rho_{nf} g \quad (4)$$

$$(\rho c_p)_{nf} \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (5)$$

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

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

دانسیته و گرمای ویژه موثر نانوسيال از روابط (۶) و (۷) برحسب 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 نانوسيال 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:

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

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 17×10^{-9} نانومتر و k_b ثابت بولتزمن بوده و برابر با 1.3807×10^{-23} است. [۱۵]. لزجت نانوسيال آب-اکسیدآلومینیوم نیز بصورت تابعی از دما و کسر حجمی نانوذرات بر اساس داده‌های تجربی نگوین و همکاران [۱۳] و برآش منحنی توسط ابوندا و همکاران [۱۲] عبارتست از:

با حایگذاری 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 قائد سیمسون $1/3$ استفاده می‌شود. نسبت عدد ناسلت بصورت نسبت عدد ناسلت متوسط نانوسیال به عدد ناسلت متوسط سیال پایه، بصورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود:

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

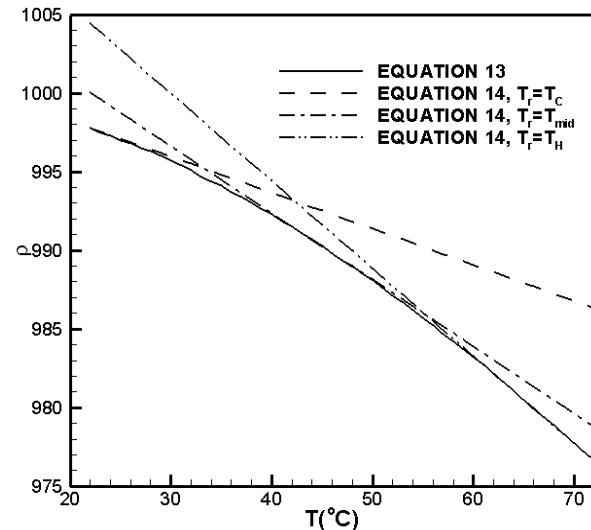
۳- شبکه‌ی بهینه و اعتبارسنجی کد
چندین شبکه مختلف برای جابجایی آزاد آب خالص در هندسه مورد نظر بررسی شده و شبکه بهینه با تعداد نقاط 61×61 بدست آمده است. عدد ناسلت متوسط حاصل از کار حاضر برای آب با مراجع [۲۲] و [۲۳] و برای نانوسیال با مرجع [۱۲] برای مقادیر مختلف رایلی در جدول (۲) مقایسه شده است.

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 | طلابی 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 (۱-۴) و بار دیگر معادلات (۱، ۲، ۵ و ۶) حل شده است. عدد ناسلت متوسط بر حسب 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 بدون بعد ارائه می‌شوند:

نتایج عددی حاصل با استفاده از متغیرهای بی بعد (۱۵) بصورت

بدون بعد ارائه می‌شوند:

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{H}; \quad Y = \frac{y}{H}; \quad U = \frac{u}{\alpha_{f_0}/H}; \quad V = \frac{v}{\alpha_{f_0}/H}; \\ \theta &= \frac{T - T_C}{T_H - T_C}; \quad \Psi = \frac{\psi}{\rho_{f_0} \alpha_{f_0}} \end{aligned} \quad (15)$$

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

که در آن، β_{f_0} 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:

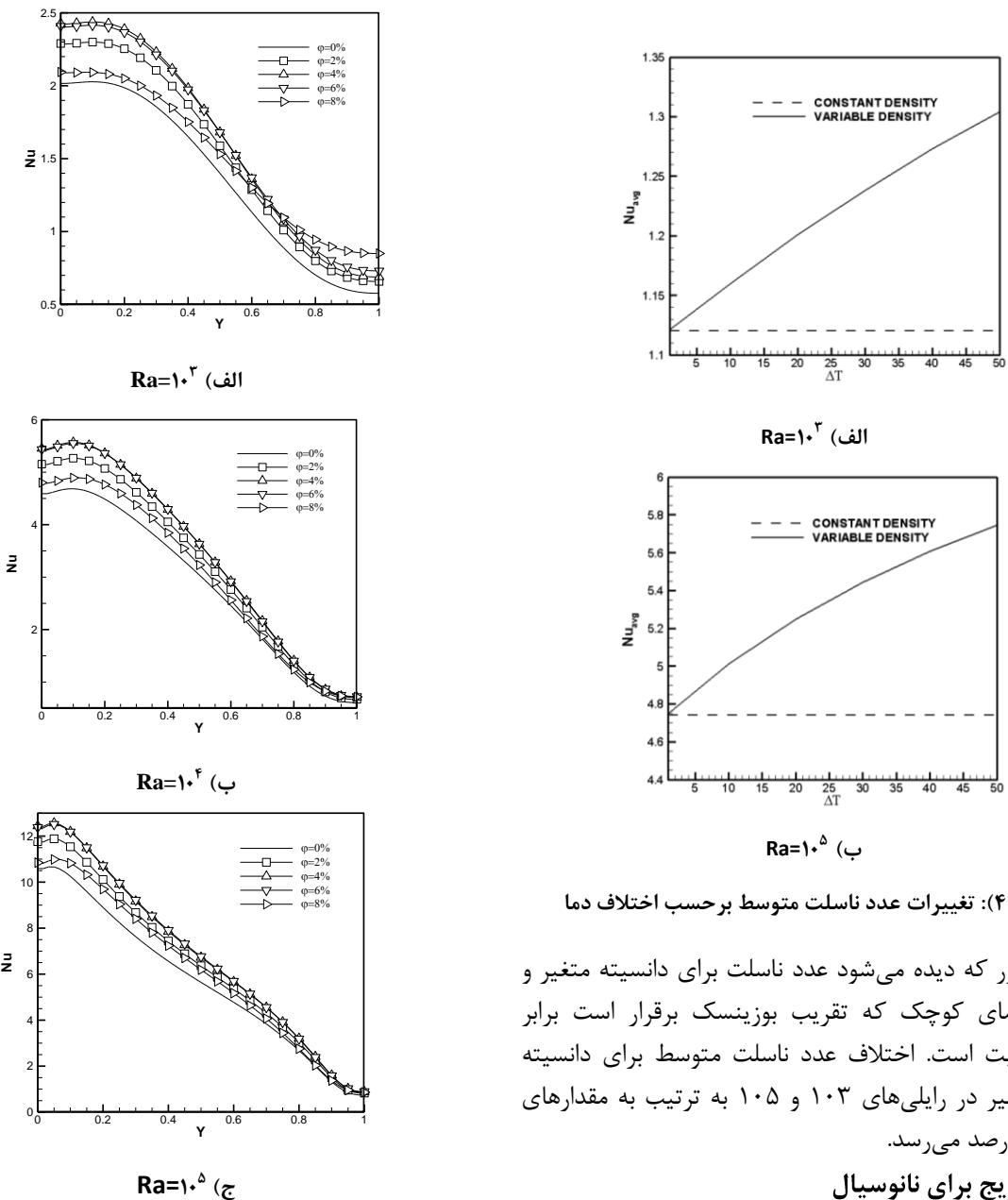
$$Nu = \frac{hH}{k_f} \quad (17)$$

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:

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



شکل (۴): تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب 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 نانوسيال

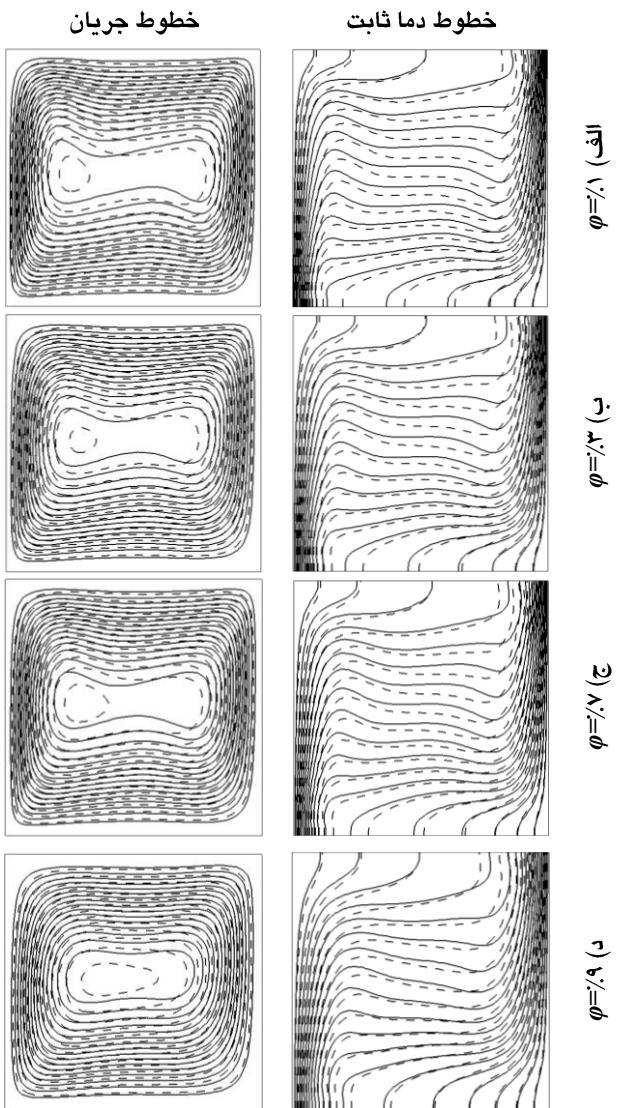
مطالعه عددی برای نانوسيال آب-اکسید آلومینیوم در محدوده درصد حجمی ۱ الی ۹ و اعداد رایلی 10^3 الی 10^6 انجام شده است. دمای دیواره سرد و دمای مرجع $22^\circ C$ بوده و اختلاف دمای دیوار گرم و سرد $50^\circ C$ است. شکل (۵) تغییرات عدد ناسلت روی دیوار گرم را برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانوذرات و اعداد رایلی 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 $0/5 < \gamma < 0/0$ عکس محدوده $\gamma > 0/5$ است؛ تغییرات عدد ناسلت برای درصد حجمی 2% نانوذرات کمی متفاوت است.

برای تمام رایلی‌ها، عدد ناسلت موضعی از درصد حجمی 4% به بعد، کاهشی است. نکته جالب در این رایلی‌ها آن است که تغییرات عدد ناسلت موضعی برای درصد حجمی 8% و آب خالص اختلاف کمتری نسبت به سایر درصدهای حجمی دارند.

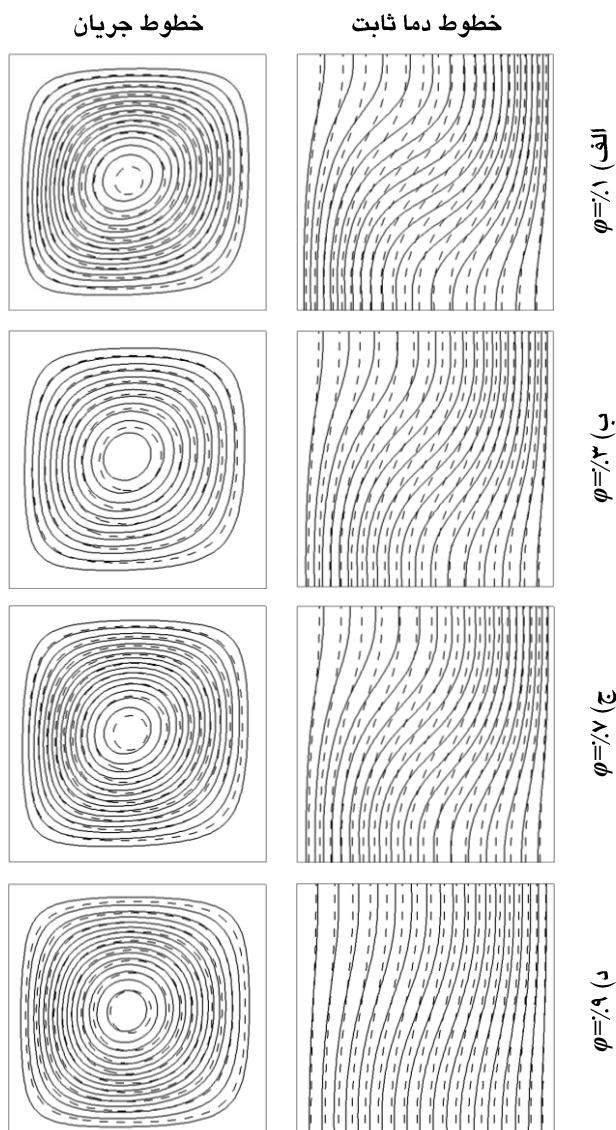
شکل (۷) خطوط جریان و خطوط دما ثابت را در رایلی 10^5 نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوی خطوط جریان و دما ثابت برای نانوسيال با دانسیته متفاوت نسبت به دانسیته ثابت مانند رایلی 10^3 ، کمی متفاوت است. دیده می‌شود که نزدیک دیواره گرم، گرادیان دما در حالت دانسیته متفاوت نسبت به دانسیته ثابت، بیشتر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

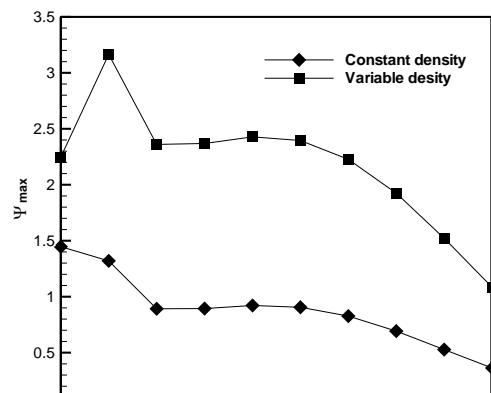
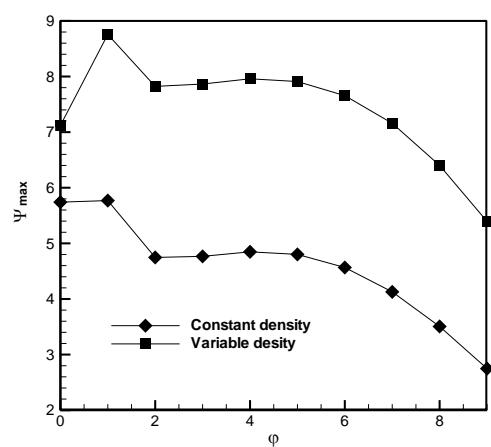
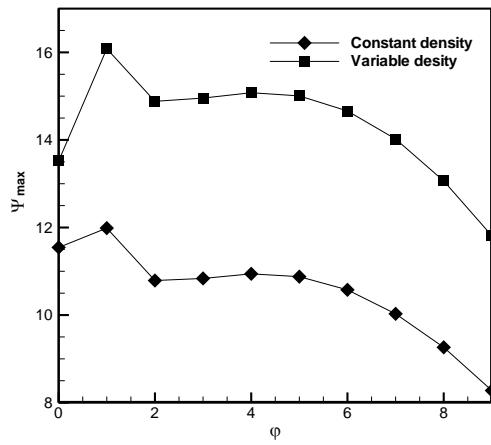
همانطور که دیده می‌شود، با افزایش عدد رایلی مقادیر تابع جریان و عدد ناسلت متوسط نیز افزایش می‌یابند. همچنین در تمام اعداد رایلی مقدار پیش‌بینی شده برای تابع جریان و عدد ناسلت متوسط در حالت دانسیته متغیر بیشتر از مقادیر آنها در حالت دانسیته ثابت است. همچنین دیده می‌شود که با افزایش درصد حجمی نانوذرات تابع جریان و عدد ناسلت متوسط ابتدا تا $\varphi = 0.1\%$ افزایش، سپس تا $\varphi = 2\%$ کاهش و دوباره تابع جریان تا $\varphi = 4\%$ و عدد ناسلت تا $\varphi = 5\%$ افزایش و در پایان تا $\varphi = 9\%$ 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 بیوانسی است و تغییر دانسیته و در نتیجه نیروی بیوانسی طبق شکل (۳) در اختلاف دمایان 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 قبل توجیه است.

نکته دیگری که گفتنی است آن است که در حالت دانسیته ثابت با افزودن نانوذرات (به جز $\varphi = 0.1\%$) 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 $\varphi = 0.1\%$) 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.

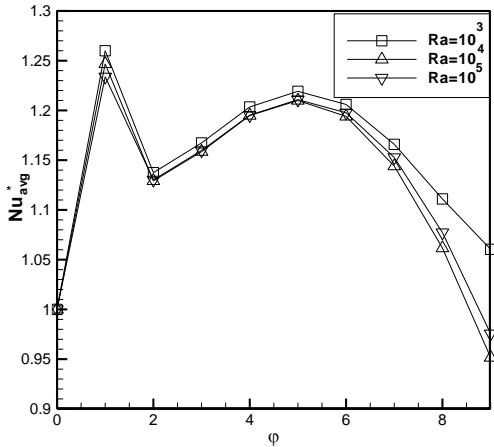
از سوی دیگر با افزایش درصد حجمی نانوذرات، دانسیته و ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته و در نتیجه انتقال حرارت هدایتی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در درصدهای حجمی مختلف بسته به اینکه کدام عامل غالب باشد، ضریب انتقال حرارت افزایش یا کاهش می‌یابد.

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

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

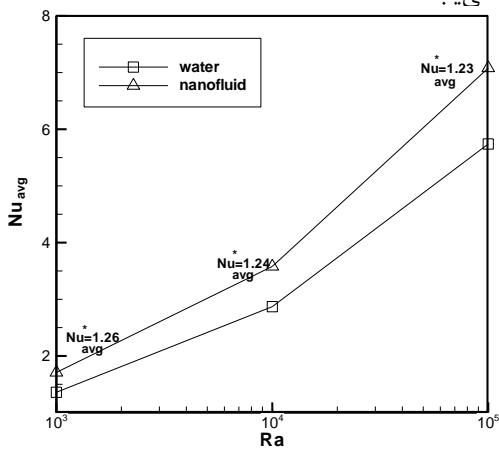
شکل (۸): تغییرات بیشینه تابع جریان در محفظه بر حسب درصد حجمی برای رایلی‌های مختلف

بیشتر است. از شکل (۱۰) نیز دیده می‌شود که در رایلی‌های ۱۰۴ و ۱۰۵، افزودن 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

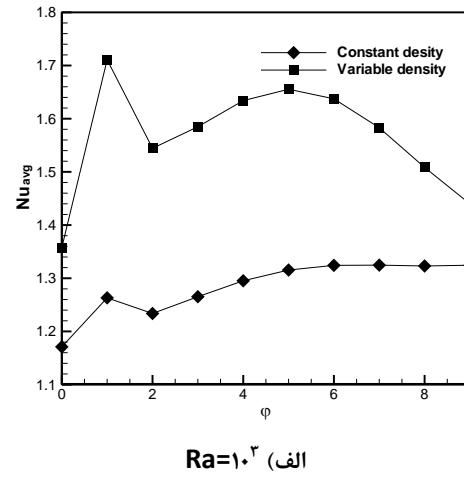
برای نشان دادن اثر وجود نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رایلی برای نانوسیال ($\varphi=10\%$) و سیال پایه (آب) و مقدار نسبت عدد ناسلت در شکل (۱۱) مقایسه شده است. دیده می‌شود که عدد ناسلت متوسط نانوسیال در رایلی‌های 10^3 ، 10^4 و 10^5 بترتیب ۲۶، ۲۶، ۲۴ و ۲۳ درصد افزایش می‌یابد.



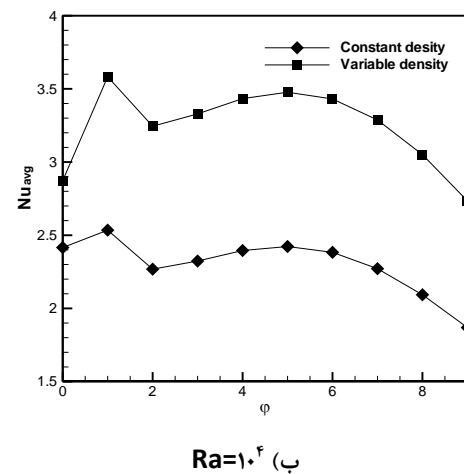
شکل (۱۱): مقایسه تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال و سیال پایه بر حسب عدد رایلی

۵- نتیجه‌گیری

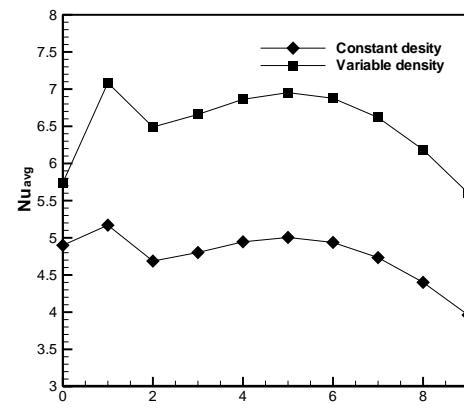
مطالعه عددی برای آب خالص و نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم در رایلی‌های 10^3 - 10^5 و درصد حجمی ۹-۱۰٪ با چگالی ثابت و متغیر و مقایسه این دو انجام شد. براساس مطالعه انجام شده، نتایج عبارتند از:



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 $\varphi=10\%$ 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 10^3 رخ می‌دهد.

با افزودن نانوذرات به مقدار ۹٪ در رایلی‌های 10^4 و 10^5 ، عدد ناسلت متوسط نسبت به سیال پایه کمی کاهش می‌یابد.

بیشترین افزایش نسبی عدد ناسلت نانوسیال ($\varphi = 10\%$) در رایلی‌های 10^3 و 10^4 بترتیب 26 ، 24 و 23 درصد است.

۶- تشرکر و قدردانی

نویسنده‌گان مایلند از پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان بخاطر حمایت از این تحقیق تشرکر و قدردانی نمایند.

برای آب خالص با در نظر گرفتن دمای مرجع در دمای متوسط دیوار سرد و گرم، تغییرات چگالی با درنظر 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

- [۱] 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.
- [۲] 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.
- [۳] 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.
- [۴] 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.
- [۵] Darbandi, M.; Hosseiniزاده, س.ف.; "A general strategy to include density variation in incompressible algorithms", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 39 (3), pp. 372–380, 2003.
- [۶] Darbandi, M.; Hosseiniزاده, س.ف.; "Numerical simulation of thermobuoyant flow with large temperature variation", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 20 (2) pp. 285–296, 2006.
- [۷] 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.
- [۸] 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.
- [۹] Bijan, A.; "Convection heat transfer", third edition, Wily, 1984.
- [۱۰] 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.
- [۱۱] Trisaksri, V.; Wongwises, S.; "Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids", *Ren. Sust. En. Rev.*, vol. 11, pp. 512–523, 2007.
- [۱۲] J.C. Maxwell; "A Treatise on Electricity and Magnetism", second Ed., Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.
- [۱۳] 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.
- [۱۴] 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.
- [۱۵] 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.
- [۱۶] 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.
- [۱۷] 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.
- [۱۸] 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.
- [۱۹] Wen, D.; Ding, Y.; "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 47, pp. 5181–5188, 2004.
- [۲۰] 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.
- [۲۱] 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

| | |
|-----------------------|--|
| علائم یونانی | |
| α | ضریب پخش گرما ($m^2 s^{-1}$) |
| β | ضریب انبساط گرمایی (K^{-1}) |
| φ | کسر حجمی نانوذرات |
| θ | دماهی بی بعد |
| ν | ویسکوزیته سینماتیک ($m^2 s^{-1}$) |
| ψ | تابع جریان بابعد ($m^2 s^{-1}$) |
| Ψ | تابع جریان بی بعد |
| ρ | دانسیته ($kg m^{-3}$) |
| μ | ویسکوزیته دینامیک ($N m s^{-1}$) |
| زیرنویس ها | |
| avg | متوسط |
| c | سرد |
| f | سیال |
| H | گرم |
| nf | نانوسیال |
| p | نانوذرات |
| w | دیوار |
| | |
| ۸- فهرست علائم | |
| c_p | گرمای ویژه در فشار ثابت ($kJ kg^{-1} K^{-1}$) |
| H | ارتفاع محفظه (m) |
| d | قطر (m) |
| g | شتاب گرانش (ms^{-2}) |
| h | ضریب انتقال حرارت محلی (m) |
| k | ضریب هدایت حرارتی ($W m^{-1} K^{-1}$) |
| Nu | عدد ناسلت |
| Pr | عدد پرانتل |
| q_w | شار حرارتی ($W m^{-2}$) |
| Ra | عدد رابلی |
| Re | عدد رینولدز |
| T | دماهی با بعد (K) |
| u, v | مولفه‌های سرعت در جهت‌های X و Y ($m s^{-1}$) |
| U, V | سرعت‌های بدون بعد |
| | $U = \frac{u}{\alpha_{f_0}/H}, \quad V = \frac{v}{\alpha_{f_0}/H}$ |
| W | عرض محفظه (m) |
| X, Y | مختصات بدون بعد |
| x, y | مختصات با بعد (m) |