

شبیه‌سازی عددی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی نانوسیال درون کانال دارای حفره روباز با استفاده از مدل غیرهمگن بونگیورنو

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، shaker.hadi62@gmail.com
 استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، m.abbasalizadeh@urmia.ac.ir
 استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، sh.khalilarya@urmia.ac.ir
 دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، s.yekani@uut.ac.ir

هادی شاکر
مجید عباسعلیزاده رنجبری*
شهرام خلیل آریا
صابر یکانی مطلق

چکیده

در این مقاله، انتقال گرمای جابجایی ترکیبی نانوسیال مغناطیسی آب-اکسید آهن درون یک کانال دارای حفره روباز با دیواره گرم، مورد مطالعه قرار گرفته است. برای مدل‌سازی نفوذ نانوذرات در سیال پایه از مدل غیر همگن بونگیورنو با فرض تاثیر ترموفورسس و براونی استفاده شده است. تقریب بوزینسک برای مدل-سازی انتقال گرمای جابجایی آزاد بکار گرفته شده است. معادلات حاکم با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم SIMPLE، بصورت عددی حل شده‌اند. در ابتدا مقایسه‌ای مابین نتایج روش تکفازی و مدل غیر همگن حاضر انجام و سپس، تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف مانند عدد رینولدز (۱۰، ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰)، کسر حجمی نانوذرات (۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶) و عدد ریچاردسون (۰/۰۱، ۱ و ۱۰) به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل، با افزودن نانوذرات، بیشترین مقدار افزایش انتقال گرما در رینولدزهای پایین (۰/۶۲٪) اتفاق می‌افتد. به واسطه غالب بودن مکانیزم نفوذ ناشی از اثرات ترموفورسس، کسر حجمی نانوذرات در نزدیکی دیواره گرم، کمتر از سایر نقاط می‌باشد. در عدد رینولدز ۱۰، پدیده ترموفورسس تاثیر بیشتری بر روی نانوذرات نسبت به رینولدزهای بالا دارد.

واژه‌های کلیدی: جابجایی ترکیبی، نانوسیال، مدل غیر همگن بونگیورنو، بوزینسک، حفره روباز.

Numerical Simulation of Mixed Convection Heat transfer of Nanofluid In a Channel Containing an Open Cavity Using Buongiorno's non-homogeneous model

H. Shaker
M. Abbasalizadeh Ranjbari
Sh. Khalilarya
S. Yekani Motlagh

Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran
 Department of Mechanical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran

Abstract

In this paper, mixed convection of water-Fe₃O₄ magnetic nanofluid in a channel containing open cavity is studied. Buongiorno's non-homogenous model, assuming the effect of the Brownian and thermophoresis of nanoparticles is applied for modeling of nanoparticle migration in base fluid. The Boussinesq approximation is used for free convection modeling. The governing equations are solved using finite volume method and SIMPLE algorithm, numerically. First, a comparison is made between the results of the single-phase method and the present Buongiorno's model. Furthermore, the effect of changes in various parameters such as Reynolds number (10, 100, 300 and 600), volume fraction of nanoparticles (0.02, 0.04 and 0.06) and Richardson number (0.01, 1 and 10) on heat and nanofluid flow, have been studied in detail. The results showed that with the addition of nanoparticles, the highest increase in heat transfer occurred in the low Reynolds numbers (10.62%). Due to the dominance of thermophoresis effect, nanoparticle volume fraction is low near the hot wall. In Reynolds 10, the thermophoresis has a greater impact on the local volume fraction of nanoparticles than in high Reynolds.

Keywords: Mixed convection, Nanofluid, Buongiorno's non-homogeneous model, Boussinesq, Open cavity.

الکترونیکی با گرمای تولیدی زیاد، نیست. گرمای تولید شده توسط تجهیزات الکترونیکی بوسیله ترکیبی از انتقال گرمای جابجایی آزاد و اجباری، دفع می‌شود. بنابراین مطالعه بر روی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی در محفظه های باز و بسته جزو زمینه‌های مورد توجه مهندسی و محققین است. این زمینه در شاخه‌های گسترده‌ای از صنایع، از جمله گردآورهای خورشیدی [۱]، صنایع هسته‌ای [۲]، صنایع گرمایشی [۳] و خنک‌کاری سیستم‌های الکترونیکی [۴] و ... کاربرد فراوان دارد. مطالعه انتقال گرمای جابجایی درون حفره‌های باز و بسته از زمان‌های گذشته مورد علاقه محققین بوده است. چان و تین [۵] در سال ۱۹۶۸ جریان سیال حاصل از نیروی شناوری درون یک

۱- مقدمه

پیشرفت‌های روزافزون در صنایع مختلف، با افزایش گرمای تولیدی در حجم‌های کوچک همراه می‌باشد و نیاز به خنک‌کاری تجهیزات مدرن در حجم‌های کوچک به عنوان یک چالش مهم برای مهندسی در این زمینه تبدیل شده است. بر خلاف پیشرفت‌های اخیر در زمینه‌های صنایع الکترونیک و تکنولوژی نیمه رساناها، هنوز برخی مشکلات اساسی مربوط به خنک‌کاری محصولات تولیدی با راندمان بالا، همچنان وجود دارد. به عبارت دیگر، روش‌های سرمایشی معمولی و سرماساز-های مرسوم، جوابگوی نیازهای سرمایشی تجهیزات و چیپ‌های

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m.abbasalizadeh@urmai.ac

حفره باز را مورد مطالعه قرار دادند. پاپانیکولا و جالوریا [۶] انتقال گرمای جابجایی ترکیبی حاصل از یک منبع گرمایی واقع در یک حفره با دیواره‌های هادی گرمایی را بصورت عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که اگر رسانایی گرمایی دیواره جامد بزرگ باشد، انتقال گرما از منبع گرم بیشتر خواهد بود. مطالعه دیگری بر روی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی درون یک حفره باز مربعی شکل توسط بورگس و همکاران [۷] با استفاده از روش لاتیس بولتزن انجام گرفت. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که در ریچاردسون‌های کوچک‌تر از 0.1 ، تاثیر نیروی شناوری ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. ایده اضافه کردن ذرات با ابعاد نانومتر برای اولین بار توسط چویی و ایستمن مطرح شد [۸]. آن‌ها سوسپانسیون حاوی ذرات ریز را نانو سیال نامیدند. مروری بر تحقیقات پژوهشگران و جمع‌بندی آن‌ها توسط داس و همکاران [۹] و وانگ و ماجومدار [۱۰] نشان داد که ضریب هدایت گرمایی نانوسیال‌ها، بیشتر از سیال پایه است و به عواملی همچون اندازه، شکل، غلظت حجمی، نوع نانو ذره‌ها و نیز خصوصیات سیال پایه بستگی دارد. یکانی مطلق و سلطانی‌پور [۱۱] برای مدل سازی عددی جابجایی آزاد نانوسیال آب-آلومینا به صورت دو فازی، در یک مربع مایل با زاویه شیب های متفاوت، از روش بونگیورنو استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، با افزایش زاویه شیب، عدد ناسلت متوسط و درصد افزایش انتقال گرما تقریباً بصورت ثابت می‌ماند. رشیدی و همکاران [۱۲] کنترل ناپایداری‌های جریان ناپایای نانوسیال توسط میدان مغناطیسی را بررسی کردند. در مطالعه آن‌ها جریان نانوسیال عبوری از روی یک جسم مثلی شکل بررسی شد و نتایج نشان داد که برای پایدار کردن جریان نانوسیال‌ها در مقایسه با سیال‌های پایه به میدان مغناطیسی قویتری نیاز است. تاثیر مگنتوهیدرودینامیک در انتقال گرمای جابجایی آزاد درون یک محفظه مربعی شکل که با نانوسیال آب-آلومینیوم پر شده است، توسط الصابری و همکاران [۱۳] مورد پژوهش واقع شد. در مطالعه آن‌ها یک بلوک جامد تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت در وسط محفظه فرض شده بود. انتقال گرمای جابجایی طبیعی فروسیال تحت تاثیر منبع مغناطیسی خارجی درون یک محفظه بسته با یک سیلندر بیضی شکل گرم توسط شیخ‌الاسلامی و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۱۴]. ایمانی مفرد و همکاران [۱۵] بصورت تجربی نشان دادند که استفاده از نانوسیالات سبب افزایش راندمان انتقال گرمای جابجایی می‌شود. بونداریا و همکاران [۱۶ و ۱۷] انتقال گرمای جابجایی آزاد درون حفره با استفاده از نانوسیال را مورد بررسی قرار دادند. انتقال گرمای نانو سیال در حضور میدان و با فرض انتقال گرمای تابشی در طول دو استوانه افقی هم‌محور در حال چرخش توسط پن و همکاران [۱۸] مورد تحقیق قرار گرفت. بر اساس نتایج پژوهش، با افزایش پارامترهای تابشی، عدد هارتمن و نسبت ابعادی، عدد ناسلت افزایش یافته و افزایش عدد رینولدز سبب کاهش آن می‌شود. انتقال گرمای جابجایی نانوسیال درون یک حفره متخلخل توسط شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱۹] مورد مطالعه قرار گرفت. در این پژوهش تولید آنتروپی مورد بحث واقع شد. انتقال گرمای جابجایی طبیعی نانوسیال درون یک محفظه نیم‌حلقه‌ای متخلخل مایل، توسط یکانی مطلق و همکاران [۲۰] مورد تحقیق واقع شد. در این مقاله تاثیر زاویه چرخش، کسر حجمی نانو ذرات و عدد تخلخل بر روی عدد ناسلت، الگوی جریان و خطوط هم‌دما به تفصیل مورد بحث قرار گرفت. یکانی مطلق و

همکاران [۲۱] در پژوهشی دیگر، انتقال گرمای جابجایی طبیعی در یک محفظه مربعی شکل شیب‌دار که حاوی یک ماده متخلخل و با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، پر شده بود را مورد مطالعه قرار دادند. شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل بونگیورنو و با فرض دیواره‌های قائم دارای اختلاف دما در رایلی‌های مختلف و نسبت تخلخل‌های متفاوت و سه زاویه شیب، انجام شد. به دلیل کاربردهای متنوع هندسه کانال دارای حفره روباز با دیواره گرم در خنک کاری بسیاری از تجهیزات، برخی از پژوهش‌گران این هندسه را برای مطالعه انتخاب کرده‌اند [۲۲]. مطالعه جامعی بر روی انتقال گرمای ترکیبی سیال خالص آب درون یک حفره روباز توسط مانکا و همکاران [۲۳] انجام گرفت. در این مطالعه تاثیر موقعیت دیواره گرم و نسبت‌های ابعادی مختلف کانال و حفره بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که دمای بیشینه سیال با افزایش عدد رینولدز و ریچاردسون، کاهش می‌یابد. همچنین در موقعیت‌های مختلف دیواره گرم، نسبت ارتفاع‌ها تاثیر بسزایی در الگوی جریان و توزیع دما دارد. مهریز و همکاران [۲۴] بصورت عددی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی را درون یک کانال شیب‌دار دارای حفره روباز در اعداد رینولدز مختلف و زوایای متفاوت مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق آن‌ها از مدل تکفازی همگن، استفاده شده بود. نتایج پژوهش نشان داد که مقدار تولید آنتروپی، توزیع دما در داخل میدان جریان سیال و انتقال گرما تحت تاثیر زاویه شیب کانال بوده و به اعداد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات وابسته می‌باشد. در مقاله دیگری مهریز و همکاران [۲۵] بصورت عددی و با مدل تکفازی، انتقال گرمای جابجایی ترکیبی و تولید آنتروپی جریان نانوسیال آب-مس را درون یک کانال با حفره باز، مورد بررسی قرار دادند. مروری بر تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که در مورد انتقال گرمای جابجایی آزاد در حفره‌های بسته، مطالعات جامعی انجام گرفته و حالت‌های مختلفی از جمله انتقال گرما توسط سیال خالص و نانوسیال مورد بررسی قرار گرفته است اما مطالعه بر روی انتقال گرمای جابجایی اجباری و علی‌الخصوص ترکیبی در کانال‌های حاوی حفره روباز بسیار محدود است و اکثر مطالعات انجام شده با فرض سیال خالص و یا نانو سیال با شبیه‌سازی بصورت تکفازی می‌باشد. در این مقاله برای اولین بار از مدل غیر همگن بونگیورنو برای بررسی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی نانوسیال درون یک کانال حاوی حفره روباز استفاده شده است و تاثیر پارامترهای مختلف و موثر بر بهبود انتقال گرما به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و بهترین حالت برای افزودن نانوذرات با استفاده از نتایج عددی نشان داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- بیان مسئله و هندسه مورد مطالعه

هندسه مسئله شامل یک کانال افقی با حفره باز مستطیلی دو بعدی با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱ است. در مطالعه حاضر $h=0.2\text{m}$ ، دمای سیال سرد ورودی بصورت ثابت $T_c=307\text{K}$ ، دمای دیواره گرم بصورت یکنواخت $T_h=312\text{K}$ و سایر دیواره‌ها عایق در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم بر مسئله در حالت‌های مختلف بصورت نانوسیال آب و اکسید آهن ($\text{Water-Fe}_3\text{O}_4$) با کسر حجمی مختلف بصورت عددی حل شده‌اند.

K_b ثابت بولتزمن ($1.380648 \times 10^{-23} \text{ J}$) است. مقدار متغیر γ ، بصورت ثابت و تابع ضریب رسانش سیال پایه و نانوذرات جامد است که از رابطه $(\gamma = 0.26 \frac{k_p}{k_p + k_{np}})$ محاسبه می شود.

برای محاسبه خواص نانوسیال از روابط زیر استفاده می شود:

$$J_B = -\rho_{np} D_B \nabla \varphi \quad \rho_{nf} = (1-\varphi) \rho_f + \varphi \rho_{np} \quad (11)$$

$$J_T = -\rho_{np} D_T \frac{\nabla T}{T} \quad (\rho C_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_{np} \quad (12)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1-\varphi)(\rho \beta)_f + \varphi(\rho \beta)_{np} \quad (13)$$

در این مطالعه برای محاسبه لزجت نانوسیال از معادله برینکمن استفاده شده است [۲۸]:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1-\varphi)^{2.5} \quad (14)$$

مدل ماکسول، مدل مورد استفاده برای محاسبه رسانایی گرمایی نانوسیال می باشد [۲۹]:

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

شرایط مرزی حاکم بر این مسئله به شرح زیر تعریف می شود:

$$u = u_0, v = 0, \nabla \varphi \cdot n = 0, T = T_c \quad \text{ناحیه ورودی}$$

$$F = 0, \nabla \varphi \cdot n = 0, \nabla T \cdot n = 0 \quad \text{ناحیه خروجی}$$

$$V = 0, \nabla \varphi \cdot n = \frac{-D_T}{D_B} \nabla T \cdot n, T = T_h \quad \text{دیواره گرم}$$

$$V = 0, \nabla \varphi \cdot n = 0, \nabla T \cdot n = 0 \quad \text{دیواره های عایق}$$

۳-۲- بی بعد سازی معادلات

برای بی بعد سازی معادلات حاکم بر این مسئله از متغیرهای بی-بعد زیر استفاده شده است:

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{l}, Y = \frac{y}{l}, T^* = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, U^* = \frac{u}{u_0}, V^* = \frac{v}{u_0}, P^* = \frac{P l^2}{\rho_f u_0^2}, \\ \varphi^* = \frac{\varphi}{\varphi_{max}}, \psi = LV, \zeta = \frac{z}{T_h - T_c}, D_h^* = \frac{D_h}{D_{np}}, D_T^* = \frac{D_T}{D_{np}}, \\ D_{T0} = \gamma \frac{D_T}{D_{np}}, N_{BT} = \frac{\rho_{np} l c_p}{3 \pi \mu_{np} D_{np}}, Pr = \frac{\rho_f \mu_f}{\rho_f \mu_f}, Ri = \frac{\rho_f (T_h - T_c) h}{\mu_f}, \\ Re = \frac{\rho_f u_0 h}{\mu_f}, N_{RT} = \frac{\rho_{np} D_{np}^2}{D_{np}}, Le = \frac{k_f}{(\rho C_p)_f \mu_{np}}, Sc = \frac{\nu_f}{D_{np}}, \\ \hat{z} = \frac{z}{l} \end{aligned} \quad (16)$$

با جایگذاری و ساده سازی پارامترهای بی بعد بالا در روابط ۱ تا ۴ در نهایت معادلات بی بعد زیر حاصل می شوند:

$$\nabla^* \cdot V^* = 0 \quad (17)$$

معادله ممتموم:

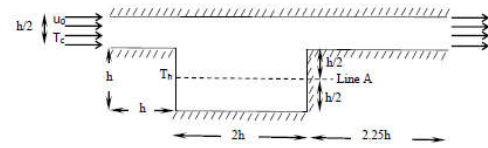
$$\left(\frac{\rho_{nf}}{\rho_f} \right) \nabla^* \cdot \nabla^* V^* = -\frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \nabla^* P^* + \frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \nabla^* \left(\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \right) \nabla^* V^* + \frac{Re}{Pr} Ri \left(\frac{\rho \beta_{nf}}{\rho \beta_f} \right) T^* \hat{z} \quad (18)$$

معادله انرژی:

$$\frac{(\rho C_p)_{nf}}{(\rho C_p)_f} \nabla^* \cdot \nabla^* T^* = \frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \nabla^* \cdot \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \nabla^* T^* - \frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \frac{1}{Le} (D_h^* \nabla^* \varphi^* \cdot \nabla^* T^* \quad (19)$$

$$V^* \cdot \nabla^* \varphi^* = \frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \frac{1}{Sc} \nabla^* \cdot (D_B^* \nabla^* \varphi^* + \frac{1}{N_{RT}} D_T^* \frac{\nabla^* T^*}{1 + \tau^*/\beta}) \quad (20)$$

اعداد بی بعد Re, Ri, Pr, Sc و Le به ترتیب عدد پرانتل، ریچاردسون، رینولدز، لوییس $(\frac{k_f}{(\rho C_p)_f \mu_{np}})$ و اشمیت می باشند. N_{BT} نسبت حرکت براونی به حرکت ترموفورسس است. عدد بی بعد ریچاردسون نشان دهنده نسبت تاثیر جابجایی آزاد به جابجایی اجباری می باشد. در



شکل ۱- هندسه مسئله

۲-۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در این مطالعه جریان نانوسیال به صورت پایا، دوبعدی، تراکم ناپذیر و با فرض انتقال گرمای جابجایی ترکیبی حاصل از جریان اجباری و آزاد در نظر گرفته شده است. خواص سیال پایه و نانوذرات به دلیل وابستگی به دما، از دمای میانگین T_c و T_h محاسبه می شوند. تغییرات چگالی سیال به صورت خطی و متغیر با دما در نظر گرفته شده است. برای انتقال گرمای جابجایی آزاد، از مدل تقریبی بوزینسک استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان نانوسیال (مدل بونگیورنو و با در نظر گرفتن اثرات براونی و ترموفورسس) شامل پیوستگی، ممتموم، انرژی و توزیع نانوذرات بصورت زیر فرمول بندی می شوند:

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (1)$$

معادله ممتموم:

$$\rho_{nf} \nabla \cdot \nabla V = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{nf} \nabla V) + (\rho \beta)_{nf} (T - T_c) \hat{z} \quad (2)$$

در روابط بالا T, P, V و \hat{z} به ترتیب بردار سرعت، فشار، دما و بردار شتاب گرانش زمین می باشد. همچنین μ_{nf} و β_{nf} نیز به ترتیب ضریب انبساط گرمایی موثر، لزجت دینامیکی و ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال است. جمله $(\rho \beta)_{nf} (T - T_c) \hat{z}$ مربوط به تقریب بوزینسک و برای افزودن تاثیر جابجایی آزاد می باشد.

$$(\rho C_p)_{nf} \nabla \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) - C_F J_{nf} \cdot \nabla T \quad (3)$$

معادله توزیع نانوذرات در مدل بونگیورنو [۲۶]:

$$\nabla \cdot \nabla \varphi = -\frac{1}{\rho_{np}} \nabla \cdot (J_{np}) \quad (4)$$

در رابطه فوق J_{np} بردار شار جرمی نانوذرات بوده و از رابطه زیر محاسبه می شود [۲۶]:

$$J_{np} = J_B + J_T \quad (5)$$

در معادله بالا تاثیر حرکت براونی با J_B و اثر مکانیزم ترموفورسس با J_T نشان داده شده است و مطابق با روابط (۶) و (۷) محاسبه می شوند.

$$J_B = -\rho_{np} D_B \nabla \varphi \quad (6)$$

$$J_T = -\rho_{np} D_T \frac{\nabla T}{T} \quad (7)$$

φ کسر حجمی نانوذرات بوده و بصورت زیر تعریف می شود:

$$\varphi = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_f} \quad (8)$$

متغیرهای V_f و V_{np} به ترتیب حجم نانوذرات و حجم سیال پایه می باشند. D_B ضریب نفوذ براونی و D_T ضریب ترموفورسس از روبرط زیر بدست می آیند [۲۷]:

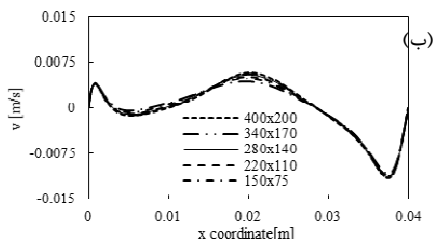
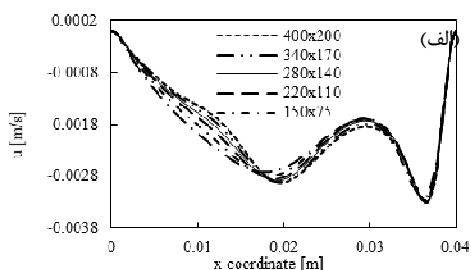
$$D_B = \frac{k_B T}{3 \pi \mu_f d_{np}} \quad (9)$$

$$D_T = \gamma \frac{\mu_f}{\rho_{np}} \varphi \quad (10)$$

جدول ۲- عدد ناسلت میانگین در $Re = 800$ ، $Ri = 1.0$ و $\phi = 0.06$ بر حسب تعداد مش‌های مختلف

تعداد مش $x \times y$	عدد ناسلت میانگین
۴۰۰×۲۰۰	۱۸/۷۸
۳۴۰×۱۷۰	۱۸/۸۳
۲۸۰×۱۴۰	۱۸/۹۱
۲۲۰×۱۱۰	۱۹/۰۵
۱۵۰×۷۵	۱۹/۳۸
۱۰۰×۵۰	۲۰/۰۲

با توجه به تغییرات عدد ناسلت میانگین مطابق جدول ۲ و نیز بررسی منحنی‌های مربوط به مولفه‌های سرعت افقی و عمودی به ترتیب در شکل‌های ۲ (الف) و (ب)، شبکه مورد استفاده در این مطالعه در قسمت حفره 280×140 انتخاب گردید.



شکل ۲- تغییرات سرعت در امتداد خط A برای شبکه‌های مختلف (الف) مولفه افقی (ب) مولفه عمودی

برای اعتبار سنجی کد عددی، نتایج حاصل از این مطالعه با نتایج آزمایشگاهی هو و همکاران [۳۰] و نتایج عددی شیخ زاده و همکاران [۲۷]، در انتقال گرما بر پایه جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در داخل یک حفره مربعی، مورد مقایسه قرار گرفته است. در این مطالعات $2 \leq \Delta T \leq 10$ و $Pr = 4.623$ ، $1.68 \times 10^5 \leq Ra \leq 3.87 \times 10^5$ و $\phi = 0.03$ فرض شده‌اند. در شکل ۳ منحنی تغییرات عدد ناسلت میانگین با تغییر عدد رایلی رسم شده است. نتایج نشان می‌دهند که کد حاضر بر پایه مدل غیر همگن بونگیورنو، به نتیجه تجربی هو و نتایج عددی شیخ زاده بسیار نزدیک است.

این مطالعه، در مواردی که $Ri = 0.01$ است، اثر جابجایی اجباری و در مواردی که $Ri = 10$ است، اثر جابجایی آزاد، غالب می‌باشد. در $Ri = 1$ ، انتظار می‌رود که اثر هر دو انتقال گرمای جابجایی آزاد و اجباری برابر باشند. عدد ناسلت میانگین در مجاورت دیواره گرم از طریق انتگرال-گیری از ناسلت محلی و بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu_{avg} = \int_0^1 \frac{k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}}{k_f} \Big|_{x=0} dy \quad (21)$$

شرایط مرزی بی بعد سازی شده بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$U' = 1, V' = 0, \nabla' \phi' \cdot n = 0, T' = 0$$

ناحیه ورودی

$$U' = 0, V' \phi' \cdot n = 0, \nabla T' \cdot n = 0$$

ناحیه خروجی

$$U' = V' = 0, \nabla' \phi' \cdot n = \frac{-1}{N_{HT} D_H} \frac{\nabla T' \cdot n}{1 + \frac{T'}{8}}, T' = 1$$

دیواره گرم

$$U' = V' = 0, \nabla' \phi' \cdot n = 0, \nabla T' \cdot n = 0$$

دیواره‌های عایق

برای مشخصات ترموفیزیکی آب و نانوذرات اکسید آهن از جدول ۱ استفاده شده است.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب و نانو ذرات اکسید آهن [۱۹ و ۲۱]

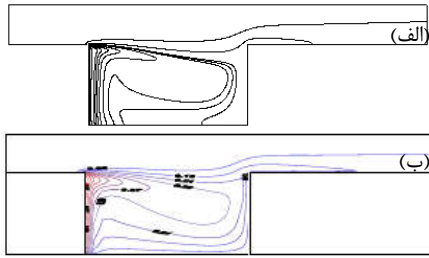
d_{np} (nm)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	C_p ($\frac{J}{kg \cdot K}$)	$\beta \times 10^{-5}$ ($\frac{1}{K}$)	$\mu \times 10^{-6}$ ($\frac{kg}{m \cdot s}$)	k ($\frac{W}{m \cdot K}$)	
۰/۳۸۴	۹۹۳	۴۱۷۸	۳۶/۲	۶۹۵	۰/۶۲۸	آب
۵	۵۲۰۰	۶۷۰	۱/۳	-	۶	اکسید آهن

۴-۲- تنظیمات عددی

در این مطالعه، معادلات مشتق جزئی حاکم بر مسئله به همراه شرایط مرزی با استفاده از روش عددی حجم محدود گسسته‌سازی شده‌اند. کد عددی با زبان ++C شی‌گرا در نرم افزار متن باز Open Foam به منظور بررسی مسئله توسعه داده شده است. برای کوپل سرعت و فشار از الگوریتم SIMPLE استفاده شده است. گسسته‌سازی ترم‌های پخش و جابجایی با روش بالادست با دقت مرتبه دوم انجام گرفته و ضرایب انتشار، حرکت نانو ذرات به دلیل اثرات براونی و ترموفورسس و نیز خواص ترموفیزیکی نانوسیال، وابسته به دما در نظر گرفته شده و روش گوس-سایدل برای حل معادلات جبری انتخاب و مقادیر باقیمانده تمامی معادلات 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۵-۲- مطالعات مش و اعتبار سنجی کد عددی

در مطالعه این مسئله، از مش یکتوایت با ساختار منظم و مربعی شکل برای کل هندسه استفاده شده است. بررسی مش در شرایط بحرانی مسئله با فرض $Re = 800$ ، $Ri = 1$ و $\phi = 0.06$ و نانو سیال عامل آب-مس با مشخصات مرجع [۲۵] و دمای سرد ورودی $T_c = 298.15K$ و دمای دیواره گرم $T_h = 303.15K$ انجام شده است. برای اطمینان از دقت حل و استقلال نتایج عددی، عدد بی‌بعد ناسلت میانگین در مجاورت دیواره گرم، مولفه‌های افقی و عمودی سرعت، در امتداد خط افقی A گذرنده از میانه حفره (به شکل ۱ مراجعه شود) در شبکه‌های مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.



شکل ۶- خطوط هم‌دما درون کانال افقی حاوی حفره روباز در $\phi=0.06$ (الف) کار حاضر (ب) کار مهریز و همکاران [۲۴]

۳- نتایج

۳-۱- مقایسه مدل تکفازی با مدل غیر همگن بونگیورنو

در این بخش مقایسه عدد ناسلت میانگین (با دقت چهار رقم اعشاری) حاصل از مدل تکفازی با مدل غیرهمگن بونگیورنو برای نانوسیال آب-اکسید آهن در کسرهای حجمی مختلف برای دو عدد رینولدز ۱۰ و ۶۰۰ در ریچاردسون ۰/۰۱ و ۱ انجام گرفته است.

جدول ۳- عدد ناسلت میانگین حاصل از مدل تکفازی و مدل غیر

همگن بونگیورنو در $Ri=0.01, Re=10$

ϕ	عدد ناسلت میانگین		درصد خطا
	تکفازی	بونگیورنو	
۰/۰۲	۳/۰۷۲۵	۳/۰۷۲۸	-۰/۰۱
۰/۰۴	۳/۱۸۷۶	۳/۱۶۸۵	۰/۰۶
۰/۰۶	۳/۲۷۳۷	۳/۲۶۵۵	۰/۲۵

جدول ۴- عدد ناسلت میانگین حاصل از مدل تکفازی و مدل غیر

همگن بونگیورنو در $Ri=1, Re=10$

ϕ	عدد ناسلت میانگین		درصد خطا
	تکفازی	بونگیورنو	
۰/۰۲	۳/۰۲۴۷	۳/۰۰۱۱	۰/۷۸
۰/۰۴	۳/۱۴۱۸	۳/۱۰۱۲	۱/۲۹
۰/۰۶	۳/۲۶۱۵	۳/۲۰۴۴	۱/۷۵

جدول ۵- عدد ناسلت میانگین حاصل از مدل تکفازی و مدل غیر

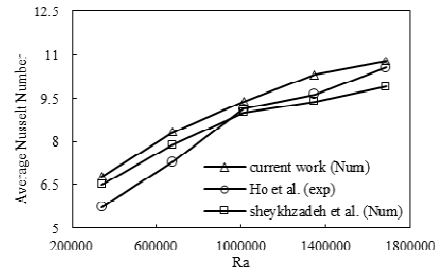
همگن بونگیورنو در $Ri=1, Re=600$

ϕ	عدد ناسلت میانگین		درصد خطا
	تکفازی	بونگیورنو	
۰/۰۲	۷/۹۶۴۷	۷/۹۹۶۷	-۰/۰۴
۰/۰۴	۸/۱۱۳۲	۸/۱۴۲۸	-۰/۳۶
۰/۰۶	۸/۳۱۶۸	۸/۳۰۴۰	۰/۱۵

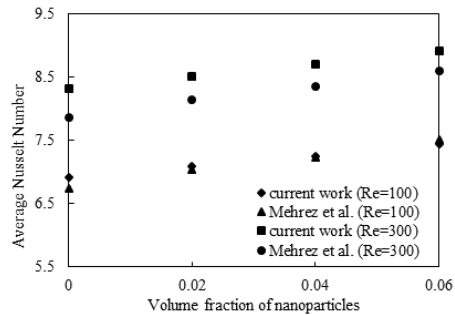
جدول ۶- عدد ناسلت میانگین حاصل از مدل تکفازی و مدل غیر

همگن بونگیورنو در $Ri=0.01, Re=600$

ϕ	عدد ناسلت میانگین		درصد خطا
	تکفازی	بونگیورنو	
۰/۰۲	۱۴/۱۵۰۲	۱۴/۱۳۳۳	۰/۱۲
۰/۰۴	۱۴/۳۳۶۵	۱۴/۳۱۸۰	۰/۱۳
۰/۰۶	۱۴/۵۲۵۱	۱۴/۵۰۲۲	۰/۱۶

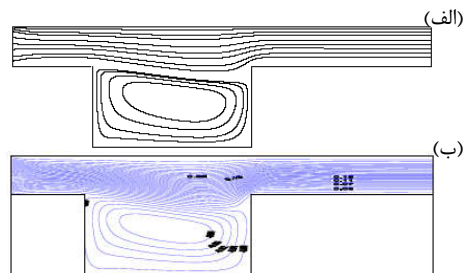


شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت میانگین با تغییرات عدد رایلی کار حاضر با کار عددی شیخزاده و همکاران [۲۷] و کار آزمایشگاهی هوو [۲۰]



شکل ۴- تغییرات عدد ناسلت میانگین با افزایش کسر حجمی نانوذرات کار حاضر با کار عددی مهریز و همکاران [۲۴]

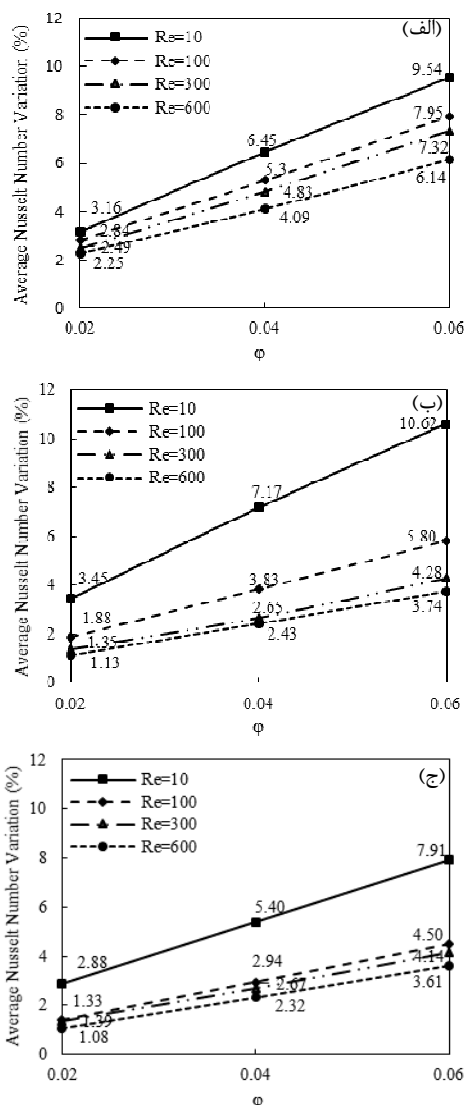
نتایج کد حاضر برای جریان نانوسیال درون کانال دو بعدی افقی دارای حفره روباز، با نتایج کار عددی مهریز و همکاران [۲۴] در رینولدزهای مختلف و چهار کسر حجمی متفاوت از نانوذره، مورد مقایسه و اعتبارسنجی قرار گرفته است. در این مطالعه $Ri=0.01$ و سیال عامل آب-مس انتخاب شده است. براساس شکل ۴ می‌توان به این نتیجه رسید که کد عددی حاضر، مطابقت بسیار کافی با نتایج مرجع [۲۴] دارد.



شکل ۵- الگوی جریان درون کانال افقی حاوی حفره روباز در $\phi=0.06$ (الف) کار حاضر (ب) کار مهریز و همکاران [۲۴]

در شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب الگوی جریان و خطوط هم‌دما حاصل از نتایج کد حاضر با نتایج کار عددی مهریز و همکاران [۲۴] در $Ri=0.01, Re=100$ و $\phi=0.06$ مقایسه شده است. بررسی نتایج، مشابهت بسیار زیاد مابین هر دو مطالعه را تایید می‌نماید.

۱، سبب افزایش ۱۰/۶۲٪ عدد ناسلت نسبت به سیال پایه شده است.



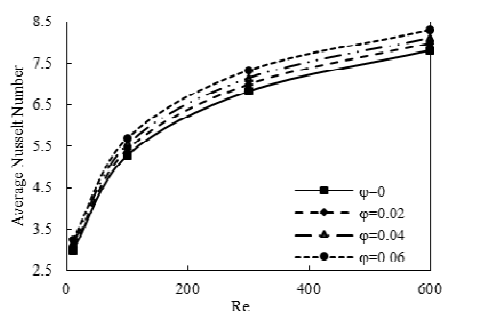
شکل ۸- درصد تغییرات عدد ناسلت میانگین به ازای کسر حجمی و اعداد ریچاردسون مختلف در (الف) $Ri=0.01$ (ب) $Ri=1$ (ج) $Ri=10$

با بررسی شکل ۸ (ب) و (ج) نیز می‌توان به این نتیجه رسید که در رینولدزهای ۳۰۰ و ۶۰۰، درصد افزایش عدد ناسلت میانگین برای هر دو ریچاردسون ۱ و ۱۰ تقریباً نزدیک به هم می‌باشند. بنابراین می‌توان به این نتیجه مهم رسید که در اعداد رینولدز پایین، افزودن نانوذرات به سیال پایه تاثیر بیشتری در بهبود انتقال گرما دارد. به علاوه در رینولدزهای ۳۰۰، ۱۰۰ و ۶۰۰، در اعداد ریچاردسون کوچک‌تر، افزودن نانوذرات به سیال پایه تاثیر بهتری خواهد داشت.

در شکل ۹ خطوط هم‌دما نانو سیال با کسر حجمی $\phi=0.06$ در $Ri=0.01$ برای رینولدزهای مختلف ترسیم شده است. بر اساس نتایج، در رینولدز ۱۰، الگوی این خطوط نسبت به سایر رینولدزها متفاوت بوده و در نزدیکی دیواره گرم، چگالی بسیار کمی نسبت به سایر رینولدزها دارد. در رینولدزهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ خطوط هم‌دما

همانطور که داده‌های جدول‌های ۳ تا ۶ نشان می‌دهند، اختلاف عدد ناسلت میانگین حاصل از هر دو روش بسیار جزئی و قابل صرف نظر می‌باشد. مقایسه نتایج گویای این است که، اختلاف نتایج در عدد ریچاردسون بزرگ‌تر و عدد رینولدز کوچک‌تر، نسبت به سایر موارد مورد بررسی، بیشتر می‌باشد. افزایش کسر حجمی در تمامی حالت‌ها نیز سبب افزایش خطای مابین دو روش شده است. این امر با معادله (۴) و رابطه مستقیم جمله جابجایی با سرعت، قابل توجیه می‌باشد. بنابراین در رینولدزهای پایین و ریچاردسون‌های بالا، اثر ترموفورسس و براونی که باعث نفوذ می‌شوند، بیشتر بوده و سبب توزیع غیریکنواخت‌تر کسر حجمی نانوذرات می‌گردند. شایان ذکر است که با وجود دقت قابل قبول روش‌های هم‌وزن تک‌فازی، امکان بررسی رفتار نانوذرات و توزیع کسر حجمی در آن‌ها وجود ندارد و برای مطالعه موارد مذکور نیاز به استفاده از روش‌های غیر همگن و دوفازی می‌باشد.

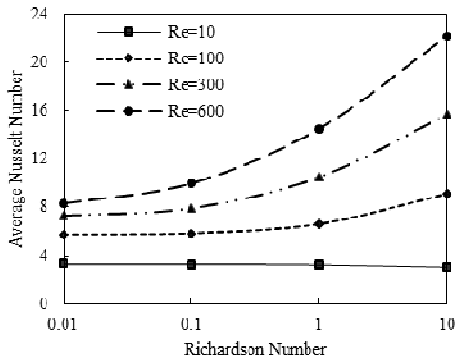
۳-۲- بررسی تاثیر کسر حجمی نانوذرات بر انتقال گرما



شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت میانگین با عدد رینولدز در چهار کسر حجمی مختلف

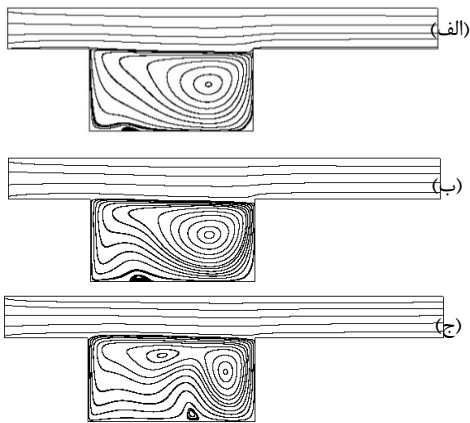
در شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت میانگین با افزایش عدد رینولدز در $Ri=0.01$ و کسرهای حجمی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که ملاحظه می‌شود، افزایش عدد رینولدز (به دلیل افزایش نسبت تاثیر انتقال گرمای جابجایی اجباری به آزاد در انتقال گرمای جابجایی ترکیبی) باعث افزایش عدد ناسلت میانگین می‌گردد. در اعداد رینولدز ثابت، افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش عدد ناسلت میانگین می‌گردد و این افزایش در اعداد رینولدز بزرگتر، محسوس‌تر می‌باشد.

برای بررسی بیشتر در شکل ۸، منحنی‌های درصد افزایش عدد ناسلت میانگین نانوسیال نسبت به عدد ناسلت میانگین سیال پایه به ازای افزایش کسر حجمی نانوذرات، در رینولدزهای مختلف برای سه عدد ریچاردسون (۱، ۱۰ و ۱۰۰) ترسیم شده است. نتایج شکل ۸ (الف) و (ب) و (ج) نشان می‌دهند که در هر سه عدد ریچاردسون، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، درصد افزایش عدد ناسلت میانگین نسبت به سیال پایه، افزایش می‌یابد. تاثیر افزودن نانوذرات و افزایش کسر حجمی بر روی عدد ناسلت میانگین، با افزایش عدد رینولدز، کاهش می‌یابد. بر اساس منحنی‌های شکل، بیشترین تاثیر اضافه نمودن کسر حجمی نانوذرات بر روی افزایش عدد ناسلت میانگین در رینولدز برابر با ۱۰، اتفاق افتاده است. مطابق شکل ۸ (ب)، اضافه نمودن ۶ درصد کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه در رینولدز ۱۰ و ریچاردسون



شکل ۱۰- تاثیر تغییرات عدد ریچاردسون بر روی عدد ناسلت میانگین در مجاورت دیواره نانوسیال با کسر حجمی $\phi=0.06$

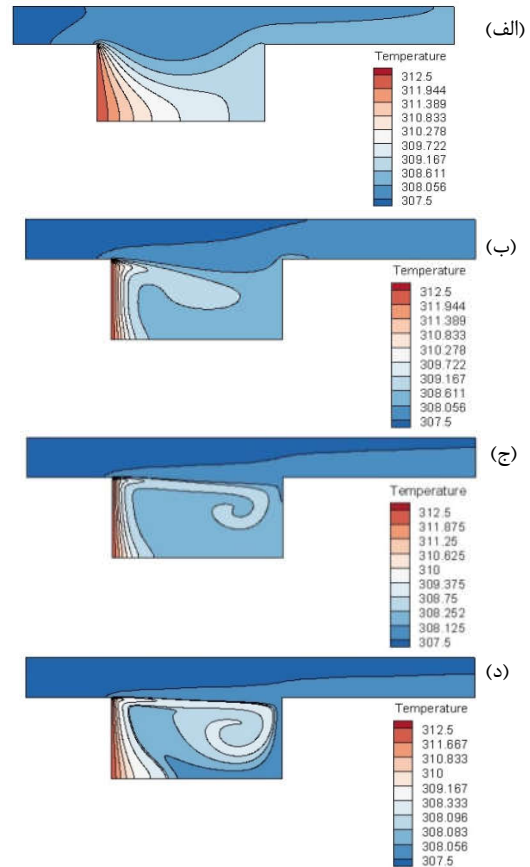
شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش عدد ریچاردسون تک گردابه داخل حفره به جفت گردابه تبدیل می‌شود. خطوط همدمای رسم شده در شکل ۱۲ بیان می‌کنند که با افزایش عدد ریچاردسون، خطوط ایزوترم به دیواره گرم فشرده‌تر می‌شوند. این فشردگی در ریچاردسون ۱۰ بسیار مشهودتر می‌باشد و علت این امر وجود همان جفت گردابه مذکور در شکل ۱۱ (ج) می‌باشد.



شکل ۱۱- الگوی جریان نانوسیال در $\phi=0.06$ و $Re=600$ (الف) $Ri=0.01$ (ب) $Ri=1$ (ج) $Ri=600$

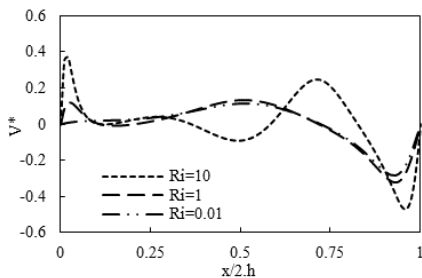
شکل ۱۳ تاثیر عدد ریچاردسون بر روی خطوط جریان نانوسیال با کسر حجمی $\phi=0.06$ در عدد رینولدز ۱۰ را نشان می‌دهد. افزایش عدد ریچاردسون سبب رشد گردابه‌های ایجاد شده در گوشه‌های پایینی حفره می‌شود اما روند رشد گردابه نزدیک به دیواره گرم، مشهودتر است. بزرگتر شدن این گردابه در انتقال گرمای جابجایی ترکیبی، تاثیر منفی داشته و به همین دلیل افزایش عدد ریچاردسون در رینولدز ۱۰، در مقایسه با سایر رینولدزها، تاثیر مثبتی بر انتقال گرما ندارد.

تقریباً الگوی مشابهی داشته و به دلیل افزایش تاثیر اینرسی نانوسیال، نسبت به رینولدز ۱۰، به دیواره گرم فشرده‌تر شده‌اند. در رینولدز ۶۰۰، فشردگی خطوط هم‌دما در مجاورت نیمه پایینی دیواره گرم، نسبت به رینولدزهای ۱۰۰ و ۳۰۰، بصورت جزئی تغییر یافته و در این ناحیه، از چگالی آن‌ها اندکی کاسته شده است. بنابراین این نتیجه حاصل می‌شود که بخش زیادی از گرما در رینولدز ۶۰۰ نسبت رینولدزهای ۱۰۰ و ۳۰۰، از مجاورت نیمه بالایی دیواره گرم انتقال می‌یابد.



شکل ۹- خطوط هم‌دما در $\phi=0.06$ و $Ri=0.01$ (الف) $Re=10$ (ب) $Re=100$ (ج) $Re=300$ (د) $Re=600$

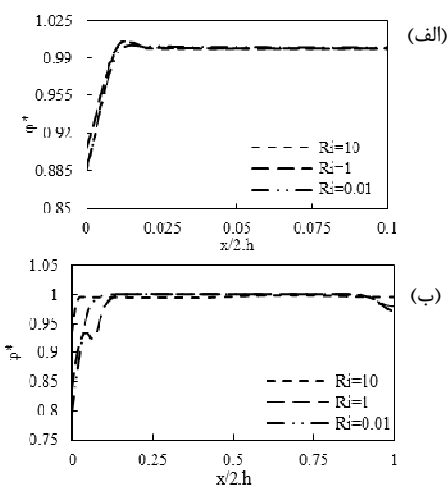
تاثیر تغییرات عدد ریچاردسون بر عدد ناسلت میانگین در مجاورت دیواره گرم، برای نانوسیال با کسر حجمی $\phi=0.06$ برای رینولدزهای مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس نتایج شکل، به غیر از $Re=10$ ، افزایش عدد ریچاردسون در سایر رینولدزها، به دلیل افزایش تاثیر جابجایی آزاد، سبب افزایش عدد ناسلت میانگین می‌گردد و این افزایش در رینولدزهای بالا، بسیار قابل ملاحظه می‌باشد. در ادامه برای تفسیر شکل ۱۰، الگوی جریان و خطوط همدمای نانوسیال با کسر حجمی $\phi=0.06$ برای رینولدز برابر با ۶۰۰، در ریچاردسون‌های مختلف به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مورد بحث قرار گرفته است.



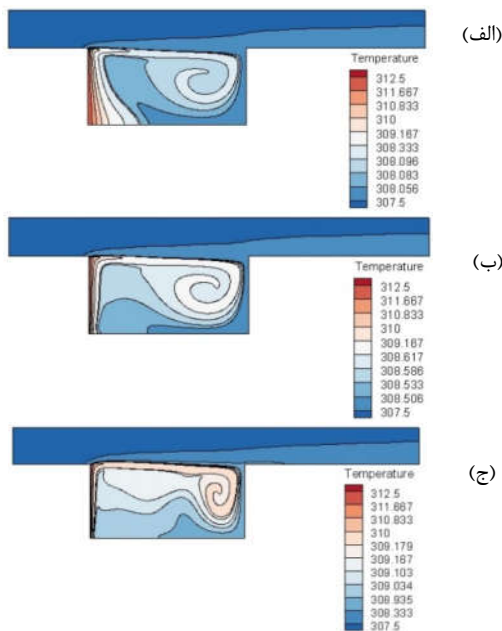
شکل ۱۴- تغییرات مولفه عمودی سرعت بی بعد نانوسیال با $\phi=0.06$ در اعداد ریچاردسون متفاوت در راستای خط A در $Re=600$

تغییرات کسر حجمی بی بعد در امتداد خط افقی A (به شکل ۱ مراجعه شود) به ازای اعداد ریچاردسون مختلف برای اعداد رینولدز ۶۰۰ و ۱۰ به ترتیب در شکل ۱۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است. بر اساس منحنی‌های شکل می‌توان مشاهده نمود که در تمامی اعداد ریچاردسون مورد مطالعه، توزیع کسر حجمی در نزدیکی دیواره گرم به دلیل تاثیر ترموفورسس، کمتر بوده و با افزایش فاصله از دیواره گرم، توزیع کسر حجمی بی بعد افزایش می‌یابد و به بالاتر از عدد ۱ می‌رسد و سپس تقریباً مساوی با عدد ۱ می‌شود. مقایسه منحنی‌های شکل (الف) و (ب) نشان می‌دهد که تاثیر ترموفورسس بر روی توزیع کسر حجمی نانوذرات در رینولدز ۱۰ نسبت به رینولدز ۶۰۰ بیشتر است.

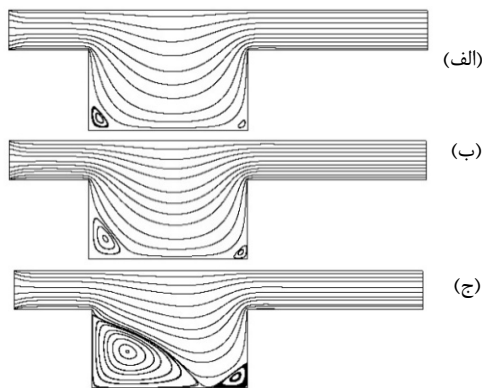
شکل ۱۶ گزارش تصویری از توزیع کسر حجمی نانوذرات در داخل نانوسیال با کسر حجمی میانگین $\phi=0.06$ در رینولدز ۱۰ را برای اعداد ریچاردسون مختلف نشان می‌دهد. اثر ترموفورسس در نزدیکی دیواره گرم در هر سه عدد ریچاردسون قابل مشاهده می‌باشد. از طرفی نیز با بررسی هم‌زمان شکل ۱۳ می‌توان به راحتی دریافت که گردابه‌های موجود در جریان به دلیل تاثیر ترم جابجایی معادله انتقال کسر حجمی، بر روی توزیع کسر حجمی نانوسیال موثر می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پدیده براونی کمترین تاثیر را در نفوذ نانوذرات در سیال پایه دارد و این موضوع با نتایج بونگیورنو [۲۶] سازگاری دارد.



شکل ۱۵- تغییرات کسر حجمی بعد در امتداد خط افقی A در اعداد ریچاردسون مختلف (الف) $Re=600$ (ب) $Re=10$



شکل ۱۲- خطوط هم‌دمای نانوسیال در $\phi=0.06$ و $Re=600$ (الف) $Ri=10$ (ب) $Ri=1$ (ج) $Ri=0.01$



شکل ۱۳- الگوی جریان در $\phi=0.06$ و $Re=10$ (الف) $Ri=0.01$ (ب) $Ri=1$ (ج) $Ri=10$

در شکل ۱۴ منحنی‌های توزیع مولفه عمودی سرعت نانوسیال در امتداد خط افقی A (به شکل ۱ مراجعه شود) در عدد رینولدز ۶۰۰ برای اعداد ریچاردسون مختلف رسم شده است. منحنی‌های شکل نشان می‌دهند که در ریچاردسون ۱۰، مقدار مولفه عمودی سرعت در نزدیکی دیواره گرم، بسیار بزرگتر از سرعت متناظر در ریچاردسون ۱ می‌باشد. در ضمن همین روند در مقایسه سرعت عمودی در مجاورت دیواره گرم مابین ریچاردسون ۱ و ۰/۰۱ نیز قابل مشاهده است. بنابراین سرعت چرخش گردابه‌ها در ریچاردسون بزرگ‌تر، بیشتر بوده و همین امر سبب افزایش انتقال گرما و افزایش معنادار عدد ناسلت میانگین در رینولدز ۶۰۰ می‌گردد.

-افزایش عدد ریچاردسون در رینولدزهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ به دلیل افزایش نسبت تاثیر جابجایی آزاد، سبب افزایش عدد ناسلت میانگین می‌گردد و این افزایش در رینولدزهای بالا، محسوس‌تر می‌باشد.

- افزایش عدد رینولدز، سبب افزایش عدد ناسلت میانگین می‌گردد.

- توزیع کسر حجمی در نزدیکی دیواره گرم به دلیل پدیده ترموفورسس، کمتر از سایر قسمت‌ها می‌باشد. به علاوه اثر پدیده مذکور بر روی نانوذرات، در رینولدز ۱۰ نسبت به رینولدز ۶۰۰، بیشتر است.

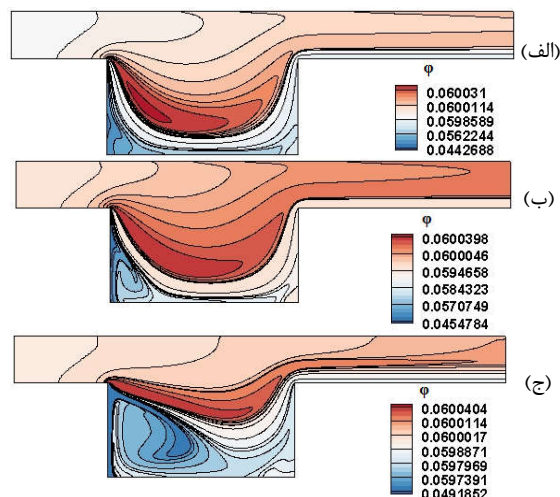
- در رینولدز برابر با ۱۰، مکانیزم جابجایی و ترموفورسس بیشترین و برآونی، کمترین تاثیر را بر روی توزیع کسر حجمی نانوسیال دارد.

۵- نمادها

T	دما (°C)
h	ارتفاع حفره (m)
p	فشار (Pa)
C_p	گرمای ویژه ($J/kg \cdot K$)
Pr	عدد پرانتل ($= \nu/\alpha_f$)
Re	عدد رینولدز ($= \rho u_0 h/\mu_f$)
Sc	عدد اشویت ($= \nu_f/D_{eff}$)
ϕ	کسر حجمی
ρ	چگالی (kg/m^3)
D_B	ضریب براونی (m^2/s)
D_T	ضریب ترموفورسس ($m^2 \cdot s^{-1} \cdot k^{-1}$)
u,v	مولفه عمودی و افقی سرعت
v	بردار سرعت
Nu_{ave}	عدد نوسلت میانگین
g	بردار شتاب جاذبه (m/s^2)
k	رسانایی گرمایی ($W/m \cdot K$)
Ri	عدد ریچاردسون ($= g\beta(T_h - T_c)h/u_0^2$)
x,y	مختصات دکارتی (m)
α	پخشندگی گرمایی (m^2/s)
J_{np}	بردار شار نانوذرات ($kg/m^2 \cdot s$)
K_b	ثابت بولتزمن ($= 1.380648 \times 10^{-23} J$)
*	نماد بی‌بعدسازی

زیرنویس‌ها

c	سیال سرد
h	سیال گرم
ave	میانگین
f	سیال پایه
nf	نانو سیال
np	نانوذره
B,T	ترموفورسس و براونی
0	مقیاس مشخصه بی‌بعد سازی پارامترهای بی‌بعد



شکل ۱۶- کانتورهای کسر حجمی نانوذرات در $\phi=0.06$ و $Re=10$ (الف) $Ri=10$ (ب) $Ri=1$ (ج)

در پایان لازم به ذکر است که کامپیوتر مورد استفاده در این تحقیق، یک لپ‌تاپ با پردازنده Core(TM) i7-7500 CPU@ 2.70 GHz و حافظه 8.00 GB می‌باشد. مدت زمان همگرایی نتایج کد عددی حاضر در یک تکرار بطور متوسط حدود ۱ ثانیه می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، انتقال گرمای جابجایی ترکیبی جریان نانوسیال درون یک کانال دارای حفره روباز با دیواره گرم بصورت عددی و با استفاده از مدل غیر همگن بونگیورنو مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات حاکم با تکنیک حجم محدود حل شده‌اند. در ابتدا مقایسه‌ای مابین مدل غیر همگن مذکور با روش تکفازی انجام گرفته و در ادامه به تفصیل تاثیر تغییرات پارامترهای مختلف بر روی انتقال گرما مورد بحث قرار گرفته است. از جمله نتایج مهم می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- در هندسه موجود نتایج روش تکفازی به مدل غیر همگن بونگیورنو بسیار نزدیک می‌باشد. در رینولدزهای پایین و ریچاردسون‌های بالا، به دلیل تاثیر ترموفورسس و براونی، اختلاف نسبتاً جزئی مابین نتایج قابل مشاهده است.

-افزودن کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه در تمامی حالت‌ها، سبب افزایش انتقال گرما می‌شود و این افزایش در اعداد رینولدز پایین، مشهودتر می‌باشد (در رینولدز ۱۰ و ریچاردسون ۱، افزودن ۶ درصد کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش ۱۰/۶۲٪ عدد ناسلت نسبت به سیال پایه شد).

- در رینولدزهای ۱۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰، افزودن نانوذرات به سیال پایه در ریچاردسون‌های کوچک‌تر، تاثیر بیشتری در بهبود انتقال گرما دارد.

- در رینولدز برابر با ۱۰ افزایش عدد ریچاردسون تاثیری در عدد ناسلت میانگین (نانوسیال با ۶ درصد کسر حجمی) نداشته و حتی در ریچاردسون برابر با ۱۰، عدد ناسلت میانگین، یک کاهش جزئی را نشان می‌دهد.

- nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 175-186, 2017.
- [18] Pen Y., Alsagri A. S., Afrand M., Moradi R., A numerical simulation for magnetohydrodynamic nanofluid flow and heat transfer in rotating horizontal annulus with thermal radiation. *RSC Advances*, Vol. 39, pp. 22185-22197, 2019.
- [19] Sheikholeslami M., Shafee A., Zareei A. S., RizwanulHaq, Zhixiong L., Heat transfer of magnetic nanoparticles through porous media including exergy analysis. *Journal of molecular liquids*, Vol. 279, pp. 719-732, 2019.
- [20] Motlagh S. Y., Golab E., Sadr A. N., Two-phase modeling of the free convection of nanofluid inside the inclined porous semi-annulus enclosure. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 164, 105183, 2019.
- [21] Motlagh S. Y., Taghizadeh S., Soltanipour H. Natural convection heat transfer in an inclined square enclosure filled with a porous medium saturated by nanofluid using Buongiorno's mathematical model. *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, No. 6, pp. 2526-2540, 2016.
- [22] Rahman M.M., Öztop H. F., Saidur R., Mekhilef S., Al-Salem K., Finite element solution of MHD mixed convection in a channel with a fully or partially heated cavity. *Comput. Fluids*, Vol. 79, pp. 53-64, 2013.
- [23] Manca O., Nardini S., Khanafer K., Vafai K., Effect of Heated Wall Position On Mixed Convection in a Channel With an Open Cavity. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications: An International Journal of Computation and Methodology*, Vol. 43, No. 3, pp. 259-282, 2003.
- [24] Mehrez Z., ElCafsi A., Belghith A., Le Quéré P., The entropy generation analysis in the mixed convective assisting flow of Cu-water nanofluid in an inclined open cavity. *Advanced Powder Technology*, Vol. 26, pp. 1442-1451, 2015.
- [25] Mehrez Z., ElCafsi A., Belghith A., LeQuéré P., MHD effects on heat transfer and entropy generation of nanofluid flow in an open cavity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 374, pp. 214-224, 2015.
- [26] Buongiorno J., Convective transport in nanofluids. *Journal of heat transfer*, Vol. 128, No. 3, pp. 240-250, 2006.
- [27] Sheikhzadeh G.A., Dastmalchi M., Khorasanizadeh H., Effects of nanoparticles transport mechanisms on Al₂O₃-water nanofluid natural convection in a square enclosure. *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 66, pp. 51-62, 2013.
- [28] Brinkman, H. C., The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, pp. 571-581, 1952.
- [29] Maxwell J.C., *A Treatiseo Electricity and Magnetism seconded*. Oxford University Press, Cambridge, 1904.
- [30] Ho C. J., Liu W. K., Chang Y. S., Lin C. C., Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 8, pp.1345-1353, 2010.
- [1] Mansour R. B., Nguyen C. T., Galanis N., Numerical study of transient heat and mass transfer and stability in a salt-gradient solar pond. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 43, No.8, pp. 779-790, 2004.
- [2] Selimefendigil F., Öztop H. F., Mixed convection in a partially heated triangular cavity filled with nanofluid having a partially flexible wall and internal heat generation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 70, pp. 168-178, 2017
- [3] Alves T. A., Altemani C. A., An invariant descriptor for heaters temperature prediction in conjugate cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 58, pp. 92-101, 2012.
- [4] Kuznetsov G. V., Sheremet M. A., New approach to the mathematical modeling of thermal regimes for electronic equipment. *Russian Microelectronics*, Vol. 37, No. 2, pp. 131-138, 2008.
- [5] Chan Y., Tien C., Laminar natural convection in shallow open cavities. *Journal of heat transfer*, Vol. 108, No. 2, pp. 305-309, 1986.
- [6] Papanicolaou E., Jaluria Y., Transition to a periodic regime in mixed convection in a square cavity. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 239, pp. 489-509, 1992.
- [7] Burgos J., Cuesta I., Salueña C., Numerical study of laminar mixed convection in a square open cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 99, pp. 599-612, 2016.
- [8] Choi S. U., Eastman J. A., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME FED 231*, 1995.
- [9] Das S. K., Choi S. U., Patel H. E., Heat transfer in nanofluids; a review. *Heat transfer engineering*, Vol. 27, No. 10, pp. 3-19, 2006.
- [10] Wang X. Q., Mujumdar A. S., Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International journal of thermal sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-19, 2007.
- [11] Motlagh S. Y., Soltanipour H., Natural convection of Al₂O₃-water nanofluid in an inclined cavity using Buongiorno's two-phase model. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 111, pp. 310-320, 2017.
- [12] Rashidi S., Bovand M., Esfahani J. A., Opposition of magnetohydrodynamic and Al₂O₃-water nanofluid flow around a vertex facing triangular obstacle. *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 215, pp. 276-284, 2016.
- [13] Alsabery A. I., Sheremet M. A., Chamkha A. J., Hashim I., MHD convective heat transfer in a discretely heated square cavity with conductive inner block using two-phase nanofluid model. *Scientific reports*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-23, 2018.
- [14] Sheikholeslami M., Ellahi R., Vafaei K. Study of Fe₃O₄-water nanofluid with convective heat transfer in the presence of magnetic source. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, pp. 565-575, 2018.
- [15] Imani-Mofrad P., Heris S. Z., Shanbedi M., Experimental investigation of the effect of different nanofluids on the thermal performance of a wet cooling tower using a new method for equalization of ambient conditions. *Energy conversion and management*, Vol. 158, pp. 23-35, 2018.
- [16] Bondareva N. S., Sheremet M. A., Oztop, H. F., Abu-Hamdeh N., Entropy generation due to natural convection of a nanofluid in a partially open triangular cavity. *Advanced Powder Technology*, Vol. 28, No.1, pp. 244-255, 2017.
- [17] Bondareva N. S., Sheremet M. A., Oztop H. F., Abu-Hamdeh N., Heatline visualization of natural convection in a thick walled open cavity filled with a