

جابه‌جایی آزاد آشفته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص متغیر درون یک محفظه با وجود منبع گرم و منبع سرد روی دیواره‌های عمودی آن

قنبرعلی شیخ زاده^{*}، مجتبی سپهرنیا، محمد رضایی، مهدی ملامهدی

دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ آذر ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۵ خرداد ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۱ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۱۹ تیر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

نانوسیال
مطالعه عددی
جابه‌جایی آزاد
خواص متغیر
جریان آشفته

چکیده: انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص متغیر در جریان آشفته درون یک محفظه مربعی با منابع حرارتی گرم و سرد برجسته روی دیواره‌های عمودی آن به صورت عددی بررسی شده است. لزجت سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال تابع دما و کسر حجمی نانوذرات می‌باشند. معادلات حاکم در حالت دو بعدی با استفاده از روش حجم محدود بر مبنای المان محدود گسسته‌سازی شده‌اند و معیار همگرایی در آن‌ها 10^{-6} می‌باشد. برای مدل‌سازی آشفته‌گی نیز از مدل k-w-SST استفاده شده است. بر اساس نتایج، مشاهده می‌شود که تغییر محل قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها و عدد رایلی باعث تغییر الگوی خطوط جریان و هم‌دما می‌شوند. در اعداد رایلی 10^7 و 10^8 عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات تا ۱ درصد افزایش و سپس کاهش می‌یابد. برای بعضی از حالت‌ها عدد ناسلت متوسط نانوسیال نسبت به سیال پایه کم‌تر می‌باشد و لذا در هندسه مذکور، به‌کارگیری نانوسیال برای افزایش انتقال حرارت در این حالت‌ها مطلوب نمی‌باشد. به ازای هر دو عدد رایلی 10^7 و 10^8 ، کم‌ترین و بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای حالت‌های بالا-پایین و پایین-پایین رخ می‌دهد.

۱- مقدمه

امروزه مدل‌سازی پدیده‌های انتقال حرارت در طبیعت و بسیاری از پدیده‌های صنعتی، اهمیت بسیاری دارند. انواع فرآیندهای انتقال حرارت شامل جابه‌جایی طبیعی، اجباری و ترکیبی می‌باشند که در بین آن‌ها، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی به دلیل کاربرد گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله تهویه مطبوع، خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی، مبدل‌های حرارتی و کلکتورهای خورشیدی از اهمیت بیشتری برخوردار است. همچنین به دلیل این‌که این نوع فرآیند انتقال حرارت بیشتر در محفظه‌های بسته موردنظر می‌باشد، تاکنون راهکارهای مختلفی برای بهبود آن توسط محققان ارائه شده است. این راهکارها شامل بهبود خواص حرارتی سیال پایه با اضافه نمودن نانوذرات به آن، تغییر هندسه مورد بررسی و استفاده از رژیم جریان آشفته می‌باشد.

در مطالعه حاضر انتقال حرارت در محفظه‌های بسته که بخشی از یک دیواره آن سرد و بخشی از دیواره روبه‌روی آن گرم بوده، مورد نظر می‌باشد. تاکنون محققان زیادی در مطالعات خود، حالت‌های مختلف چنین مساله‌ای را بررسی نموده‌اند که در ادامه تعدادی از آن‌ها ذکر می‌گردد. فردریک و والنسیا [۱]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی هوا درون محفظه مربعی که روی دیواره‌های آن منبع گرم و سرد وجود دارند را بررسی نمودند. آن‌ها محل

قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها را در موقعیت‌های مختلف و به ازای اعداد رایلی 10^3 تا 10^7 در نظر گرفتند. آن‌ها نشان دادند که بیشترین انتقال حرارت زمانی اتفاق می‌افتد که منبع گرم در وسط دیواره قرار دارد. نیتیادی و همکاران [۲]، انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد هوا در یک محفظه مربعی با وجود منبع گرم و سرد روی دیواره‌های آن را به روش حجم محدود بررسی کردند. آن‌ها اثر نسبت طول به عرض محفظه و محل قرارگیری منابع حرارتی روی دیواره‌ها را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که انتقال حرارت در حالتی که منابع حرارتی در وضعیت پایین-وسط قرار دارند، بیشترین مقدار و در حالتی که در وضعیت بالا-پایین قرار دارند، کم‌ترین مقدار است. کانداسوامی و همکاران [۳]، جابه‌جایی طبیعی گذرای هوای داخل یک محفظه مربعی را به روش عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که نرخ انتقال حرارت با افزایش عدد گراشسف افزایش پیدا می‌کند زیرا نیروی شناوری افزایش می‌یابد و همچنین نرخ انتقال حرارت با افزایش تولید حرارت، روند کاهشی دارد. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که با قرار گرفتن منابع سرد و گرم در وسط دیواره‌های عمودی، میزان انتقال حرارت بیشینه می‌شود. در بررسی دیگری سانکار و همکاران [۴]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی را در یک محفظه متخلخل با وجود منبع گرم و سرد روی دیواره‌های آن، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر اهمیت موقعیت دیواره‌های سرد و گرم بر الگوهای جریان و میزان انتقال حرارت است. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sheikhz@kashanu.ac.ir

از مقادیر پیش‌بینی شده به دست می‌آید. آنالا و همکاران [۱۱]، جابه‌جایی طبیعی جریان آشفته در یک محفظه مربعی شیب‌دار که دیواره گرم آن به صورت موجی می‌باشد را بررسی نمودند. آن‌ها در مدل‌سازی خود از مدل‌های $k-\varepsilon$ رینولدز پایین، $k-w$ ، $k-w-SST$ و مدل‌سازی مستقیم استفاده نمودند و معادلات حاکم بر جریان سیال در حالت آشفته را با نتایج تجربی موجود مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مدل $k-w-SST$ نزدیک‌ترین نتایج را به مدل تجربی دارد و نتایج حاصل از مدل‌سازی مستقیم در این حالت، مطابقت کمتری با نتایج تجربی دارد. کارزنسوف و شرم [۱۲]، با استفاده از روش دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ استاندارد، جابه‌جایی طبیعی جریان آشفته هوا در داخل محفظه مستطیلی با دیواره‌های ضخیم را بررسی نمودند. آن‌ها افزایش دمای متوسط هوای داخل محفظه را با افزایش ضریب هدایت حرارتی دیواره گزارش نمودند. در ضمن آن‌ها با کاهش نسبت ضریب هدایت حرارتی گاز به دیواره، کاهش و افزایش میزان انتقال حرارت را در مکان‌های مختلف داخل محفظه مشاهده نمودند. حسین و آکبیر [۱۳]، جابه‌جایی طبیعی و تشعشع هوای داخل محفظه مربعی را به روش عددی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها مشاهده نمودند که نتایج به دست آمده با نتایج سایر محققان هم‌خوانی دارند و لذا پیشنهاد نمودند که از این روش مدل‌سازی برای سایر جریان‌های پیچیده نیز استفاده شود. کاگاو و همکاران [۱۴] اثر تشعشع را بر جریان آشفته سه‌بعدی جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مکعبی با وجود منابع حرارتی روی دیواره‌های عمودی در دمای معمول گازهای اتمسفری بررسی نمودند. آن‌ها مدل‌سازی جریان آشفته را با استفاده از روش مدل‌سازی گردابه‌های بزرگ^۱ انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که تولید تنش برشی جریان آشفته سیال با وجود تشعشع سطحی تسهیل می‌شود.

همان‌طور که در مطالعات مربوط به جابه‌جایی طبیعی مشاهده گردید، برای افزایش انتقال حرارت در آن‌ها از روش‌هایی مانند اضافه نمودن نانوسیال و جابه‌جایی منابع سرد و گرم روی دیواره‌های عمودی استفاده شده است. اما یکی از روش‌های به ظاهر مناسب برای بهبود انتقال حرارت، استفاده همزمان از نانوسیال و آشفته‌نمودن جریان می‌باشد. در مطالعه حاضر، اثر استفاده از این روش‌ها در بهبود انتقال حرارت هندسه معرفی شده بررسی شده است. این بررسی با استفاده از مدل جریان آشفته $k-w-SST$ برای اعداد رایلی 10^7 و 10^8 و کسر حجمی ۰ تا ۴ درصد نانوذرات اکسید آلومینیوم در سیال پایه آب انجام شده است. تاکنون در تحقیقات انجام شده منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها دارای ضخامت نبوده و جریان آشفته با خواص متغیر در این هندسه که حالت‌های مختلف قرارگیری منبع گرم و سرد را روی دیواره‌های عمودی محفظه بررسی کرده باشند، انجام نشده است و از مدل‌های توربولانسی غیر از $k-w-SST$ استفاده شده است. اما نوآوری این مقاله این است که منبع گرم و سرد دارای ضخامت می‌باشند و حالت‌های مختلف قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌های عمودی بررسی شده و جریان خواص متغیر می‌باشد. هدف این تحقیق مشخص کردن محل بهینه

که میزان انتقال حرارت در اعداد داری پایین، مقدار ثابتی دارد. در بررسی دیگری، شیخ‌زاده و همکاران [۵]، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس در یک محفظه مربعی که منبع گرم و سرد در دیواره‌های آن قرار داشت را به صورت عددی مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رایلی افزایش می‌یابد. در بیشترین و کم‌ترین مقدار عدد رایلی، بیشینه عدد ناسلت متوسط به ترتیب در حالتی که منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها در وضعیت پایین-وسط و وسط-وسط قرار دارند، اتفاق می‌افتد. همچنین، شیخ‌زاده و همکاران [۶] جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را با خواص متغیر در یک محفظه مربعی با دیواره‌های عمودی سرد و گرم، با لحاظ تقریب بوزینسک و بدون آن بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که مقدار تابع جریان بیشینه و عدد ناسلت متوسط در حالت چگالی متغیر نسبت به چگالی ثابت، بیشتر است. جی مای و همکاران [۷]، انتقال حرارت و جریان نانوسیال‌های متفاوت در یک محفظه با منابع گرمایی شار ثابت روی دیواره‌های عمودی آن را بررسی نمودند. آن‌ها گزارش نمودند که با قرار گرفتن منابع گرم در حالت بالا-پایین و وسط به ترتیب بیشترین و کم‌ترین میزان انتقال حرارت رخ می‌دهد. نانوسیال آب-مس نیز نسبت به سایر نانوسیال‌های مورد بررسی در مطالعه آن‌ها دارای بیشترین میزان انتقال حرارت می‌باشد. ویو و همکاران [۸]، با استفاده روش غیر تعادلی گرمایی، جابه‌جایی طبیعی یک جسم متخلخل در یک محفظه مربعی با دیواره‌های سرد جزئی قرار گرفته روی دیواره‌های عمودی را بررسی کردند. آن‌ها افزایش میزان انتقال حرارت را با افزایش عدد رایلی و عدد داری گزارش نمودند. نیکبختی و خداخواه [۹]، پدیده پخش مضاعف نیروی شناوری ناشی از انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی را در یک محفظه با منابع گرم و سرد قرار گرفته روی دیواره‌های عمودی آن به روش عددی بررسی نمودند. آن‌ها در نتایج اصلی خود، مشاهده نمودند که مکان قرارگیری منابع سرد و گرم بر میزان انتقال حرارت، انتقال جرم و جریان تاثیر فراوان دارد.

در رژیم جریان آشفته برخلاف جریان آرام که در آن لایه‌های سیال با سرعت‌های متفاوت در راستای جریان حرکت می‌کنند، جریان تحت تاثیر بی‌نظمی و حرکات‌های نوسانی شدید قرار گرفته و در حالت کلی موجب اختلاط سیال در همه راستاها می‌گردد. با وجود پیشرفت‌های اخیر انجام شده در بررسی جریان‌های متفاوت، هنوز هم مدل‌سازی جریان‌های آشفته در محفظه‌های بسته یکی از مسائل مورد علاقه محققان می‌باشد که به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفته می‌گیرد. در ادامه به تعدادی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

باراکوس و همکاران [۱۰]، جابه‌جایی طبیعی جریان‌های آرام و آشفته هوا در یک محفظه مربعی با دیواره‌های عمودی سرد و گرم را به روش عددی بررسی نمودند. آن‌ها در بررسی جریان آشفته، از مدل $k-\varepsilon$ به همراه تابع دیواره استفاده نمودند. آن‌ها گزارش نمودند که در صورت استفاده از تابع دیواره، مقادیر مربوط به عدد ناسلت، به صورت قابل توجهی بیش‌تر

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) - \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\lambda + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + u_i (\tau_{ij})_{eff} \quad (3)$$

که E انرژی کل و $(\tau_{ij})_{eff}$ تانسور تنش مشتق پذیر است که به صورت زیر تعریف می شود:

$$E = cpT - \left(\frac{P}{\rho} \right) + \left(\frac{u^2}{2} \right) \quad (4)$$

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \quad (5)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال شامل چگالی، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت به ترتیب از روابط زیر به دست می آیند [۱۶ و ۱۷]:

$$\rho_{nf} = 1001.064 + 2738.6191\phi - 0.2095T_f \quad (6)$$

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p}{(1-\phi)(\rho)_f + \phi(\rho)_p} \quad (7)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4 Re^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.3} \phi^{0.66} \quad (8)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (9)$$

که در رابطه (۸)، T_{fr} برابر با 0.1 درجه سلسیوس می باشد. در معادلات بالا، Pr (عدد پراتل) و Re (عدد رینولدز) به صورت زیر تعریف می شوند [۱۷]:

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (10)$$

منبع گرم و سرد، برای حالتی است که ماکزیم انتقال حرارت وجود داشته باشد.

۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

شکل شماتیک محفظه در شکل ۱ نشان داده شده است. روی دیواره‌های سمت چپ و راست محفظه به ترتیب یک منبع گرم و سرد با دماهای ثابت T_h و T_c قرار دارد. طول منبع گرم و سرد با هم برابر بوده و برابر با نصف و عرض آن‌ها 0.1 ارتفاع محفظه می باشد. محفظه با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم که نیوتنی می باشد پر شده است. جریان آشفته، دائم، تراکم ناپذیر می باشد. فرض می شود که نانوذرات دارای شکل و اندازه یکسان و یکنواخت بوده و هیچ لغزشی بین سیال و نانوذرات وجود ندارد و جریان به صورت تک فاز همگن است.

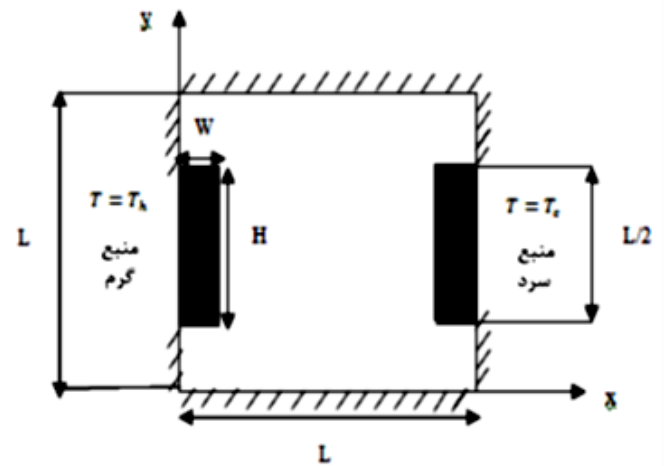


Fig. 1. Geometry and boundary conditions for the square enclosure with the source and the sink on the wall

شکل ۱: هندسه حل و شرایط مرزی برای محفظه مربعی با وجود منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها

وضعیت‌های قرارگیری منبع گرم و منبع سرد روی دیواره‌ها نسبت به خط مرکزی افقی محفظه برای حالت نشان داده شده در شکل ۱ متقارن هستند و این حالت از قرارگیری منبع گرم و سرد به اختصار وسط-وسط تعریف می شود و حالت‌های دیگر با تغییر دادن محل منبع گرم و سرد روی دیواره‌ها ایجاد می شوند و دیواره‌های بالا و پایین محفظه عایق می باشند. لزجت سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال وابسته به دما در نظر گرفته می شوند.

معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای جریان دو بعدی، دائم و معشوش نانوسیال با ضریب هدایت حرارتی و لزجت متغیر درون محفظه به صورت زیر می باشند [۱۵]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\alpha_{\infty} = F_1 \alpha_{\infty,1} + (1 - F_1) \alpha_{\infty,2} \quad (18)$$

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (19)$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_{\infty}^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2} \sqrt{\beta_{\infty}^*}} \quad (20)$$

که $\beta_i = 0.072$ و $\kappa = 0.41$ می‌باشد. همچنین در اعداد رینولدز بالا $\alpha = \alpha_{\infty} = 1$ می‌باشد.

در معادلات (۱۲) و (۱۳) جملات Γ_{ω} و Γ_k ضریب پخش مؤثر k و ω را بیان می‌کنند. این ضرایب با معادلات زیر بیان می‌شوند:

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (21)$$

$$\Gamma_{\omega} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega}} \quad (22)$$

که σ_k و σ_{ω} به ترتیب اعداد پراختل جریان مغشوش برای k و ω هستند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{k,2}}} \quad (23)$$

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{1 - F_1}{\sigma_{\omega,2}}} \quad (24)$$

و μ_t لزجت مغشوش است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho \kappa}{\omega} \quad (25)$$

ضریب α^* لزجت مغشوش را تعدیل می‌کند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha^* = \alpha_{\infty}^* \frac{\left(\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_k} \right)}{\left(1 + \frac{Re_t}{R_k} \right)} \quad (26)$$

در رابطه (۲۵) $\alpha_0^* = \beta_i / 3$ ، $R_k = 6$ ، $Re_t = (\rho k) / (\mu \omega)$ و $\beta_i = 0.072$ است. در اعداد رینولدز بالا $\alpha^* = \alpha_{\infty}^* = 1$ می‌باشد. معادله F_1 توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$Re = \frac{2 \rho_f k_B T}{\pi \mu_f^2 d_p} \quad (11)$$

چون در کار حاضر از روابط کورشیونه [۱۷] برای ضریب هدایت حرارتی و لزجت استفاده شده است، محدوده قابل بررسی دما و کسر حجمی هم، همان محدوده مربوط به روابط کورشیونه می‌باشد.

لزجت سیال پایه با برازش منحنی بر مقادیر موجود در مرجع [۱۸]، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\mu_f = 562.77 [\ln(T + 62.756)]^{-8.9137} \quad (12)$$

در مدل k-w-SST معادلات انتقال انرژی جنبشی آشفتگی (k) و فرکانس آشفتگی (ω) توسط متر بسط داده شده‌اند [۱۵] و این معادلات عبارتند از:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega} + S_{\omega} \quad (14)$$

کمیت‌های مورد نیاز در روابط (۱۲) و (۱۳) از روابط (۱۴) و (۱۵) به دست می‌آیند.

$$G_k = \min(G_k, 10 \beta^* k \omega), G_k = \left(-\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (15)$$

$$G_{\omega} = \frac{\alpha}{v_t} G_k \quad (16)$$

که G_k تولید انرژی جنبشی مغشوش به دلیل گرادیان سرعت متوسط می‌باشد. G_{ω} بیانگر تولید ω است. v_t لزجت سینماتیک مغشوش است و β^* یک مدل ثابت است. α نیز با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \alpha_{\infty} \frac{\left(\alpha_0^* + \frac{Re_t}{R_{\omega}} \right)}{\left(1 + \frac{Re_t}{R_{\omega}} \right)} \quad (17)$$

در رابطه (۱۶)، $R_{\omega} = 2/95$ می‌باشد و جمله α_{∞} توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

جدول ۲: خواص ترموفیزیکی آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم [۱۹]

Table 2. Thermo-physical properties of water and Al₂O₃ [19]

اکسید آلومینیوم	آب	خواص ترموفیزیکی
۷۶۵	۴۱۷۹	گرمای ویژه (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)
۳۹۷۰	۹۹۷/۸	چگالی (kg m ⁻³)
۴۰	۰/۵۹	ضریب هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)
۰/۸۵×۱۰ ^{-۴}	۲/۳×۱۰ ^{-۴}	ضریب انبساط حرارتی (K ⁻¹)
۳۳×۱۰ ^{-۹}	۰/۳۸۴×۱۰ ^{-۹}	قطر مولکولها (m)

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} = 0 \quad \text{روی منبع سرد:}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} = 1 \quad \text{روی منبع گرم:}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial n} = 0 \quad \text{روی دیواره‌های عایق:}$$

که در آن، n جهت عمودی بر دیواره‌های عایق است. عدد ناسلت متوسط از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Nu_{ave} = \frac{hL}{k_f} = 2 \frac{k_{nf}}{k_f} \int_0^s \frac{\partial \theta}{\partial n} dS \quad (۳۴)$$

که در آن، S مجموع طول و عرض قسمت‌هایی از منبع گرم است که درون محفظه با نانوسیال در تماس است که در وضعیت وسط، $S=2W+H$ و در وضعیت بالا و پایین، $S=W+H$ می‌باشد.

۳- روش عددی

معادلات مربوطه همراه با شرایط مرزی با استفاده از روش حجم محدود بر مبنای المان محدود به صورت عددی حل شده‌اند. برای حل معادلات از نرم افزار تجاری CFX و برای گسسته‌سازی آن‌ها از روش بالادست مرتبه دوم و الگوریتم کاپل استفاده شده است. حل معادلات با روش تکرار تا زمانی انجام شده است که مقادیر مجموع باقیمانده‌ها به اندازه کافی به ۶-۱۰ نزدیک شوند. لازم به ذکر است که با استفاده از کامپیوتری با قدرت پردازش ۲/۸ GHz، زمان محاسباتی حدود ۴ ساعت برای هر حالت مورد نیاز است.

۴- بررسی استقلال نتایج از شبکه

برای پیدا کردن یک شبکه مناسب در فرآیند عددی و مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت درون یک محفظه مربعی که روی دیواره‌های عمودی آن منبع گرم و سرد وجود دارند و حاوی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم می‌باشد، آزمایش‌هایی با چهار شبکه غیر یکنواخت $M \times N$ با تعداد گره‌های مختلف ۶۶۵۶، ۱۴۹۷۶، ۳۱۳۵۶ و ۶۹۳۰۰ برای حالت وسط- وسط انجام

$$F_1 = \tan(\phi_1^4) \quad (۲۷)$$

$$\phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_{\omega}^+ y^2}\right] \quad (۲۸)$$

$$D_{\omega}^+ = \max\left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right] \quad (۲۹)$$

در رابطه بالا، y فاصله بین سطح بعدی و D_{ω}^+ قسمت مثبت پخش عرضی است. Y_{ω} و Y_k اتلاف k و ω در اثر اغتشاش را بیان می‌کنند و به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega \quad (۳۰)$$

$$Y_{\omega} = \rho \beta \omega^2 \quad (۳۱)$$

در رابطه بالا، β و β^* ثابت‌های مدل هستند که β_i به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\beta_i = F_1 \beta_{i,1} + (1 - F_1) \beta_{i,2} \quad (۳۲)$$

D_{ω} جمله مربوط به پخش عرضی را بیان می‌کند در حالی که S_{ω} و S_k جملات مربوط به منابع ممکن هستند. به ویژه D_{ω} توسط رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$D_{\omega} = 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (۳۳)$$

ثابت‌های مدل $k-\omega$ -SST در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱: ثابت‌های مدل $k-\omega$ -SST [۱۵]

Table 1. $k-\omega$ model constants [15]

$\sigma_{\omega,1} = 2$	$\sigma_{k,2} = 1$	$\sigma_{k,1} = 1/176$
$\beta_{i,1} = 0/075$	$\alpha_0 = 0/31$	$\sigma_{\omega,2} = 1/168$
$\alpha_{\infty} = 0/52$	$\alpha_{\infty}^* = 1$	$\beta_{i,2} = 0/0828$
$\alpha_0 = 1/9$	$\beta_i = 0/072$	$\beta_{\infty}^* = 0/09$
$R_{\omega} = 2/95$	$R_k = 6$	$R_{\beta} = 8$
$\sigma_{\omega} = 2$	$\sigma_k = 2$	$\zeta^* = 1/5$

خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در دمای ۲۹۵ کلون در جدول ۲، آورده شده‌اند.

شرایط مرزی معادلات بالا در شکل بی‌بعد به صورت زیر می‌باشند،

$$U = V = 0 \quad \text{روی دیواره‌های محفظه و منبع گرم و سرد:}$$

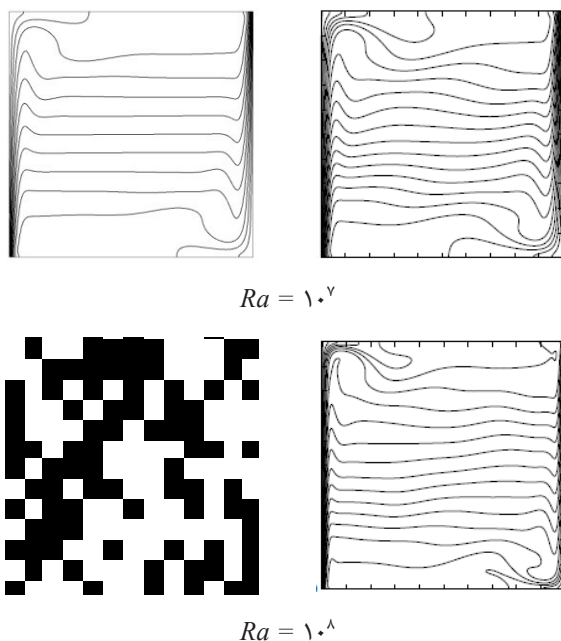
شده است.

در جدول ۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم بر حسب تعداد نقاط شبکه برای عدد رایلی 10^7 و کسر حجمی $0/01$ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات عدد ناسلت متوسط از شبکه غیریکنواخت با تعداد گره 31356 به بالا بسیار کم بوده و به خوبی استقلال نتایج از شبکه را تأمین می‌کند و در کلیه محاسبات از آن استفاده شده است. به عنوان نمونه شبکه محاسباتی مورد استفاده در حالت وسط-وسط شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۳: تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم بر حسب تعداد نقاط شبکه برای حالت وسط - وسط، $\phi=0/01$ و رایلی 10^7

Table 3. The average Nusselt number on the hot source in middle-middle case for different grids at $Ra=10^7$ and $\phi=0.01$

تعداد گره‌ها	عدد ناسلت
۶۶۵۶	۳۳/۸۵
۱۴۹۷۶	۳۰/۱۵
۳۱۳۵۶	۲۸/۵۰
۶۹۳۰۰	۲۸/۲۱



کار حاضر دیکسیت و بابو [۳۴]

Fig. 3. Comparison the isotherms for the turbulent flow at $Ra=10^7$ and 10^8 in the present work and Ref. [20]

شکل ۳: خطوط دما در جریان مغشوش به ازای رایلی 10^7 و 10^8 مقایسه نتایج کار حاضر با کار دیکسیت و بابو [۲۰]

جدول ۴: عدد ناسلت متوسط دیواره گرم: مقایسه نتایج کار حاضر با مطالعات دیگران

Table 4. The average Nusselt number of hot walls: comparing the results of present work with other studies

Ra				
10^8	10^7			
خطا با کار حاضر (%)	نتایج	خطا با کار حاضر (%)	نتایج	
-	۲۹/۷۳۵	-	۱۶/۵۲۸	کار حاضر
۷/۷	۳۲/۰۴۵	-	-	مارکاتوس و پریکلوس [۲۱]
۱/۶	۳۰/۲۲۵	۰/۰۳	۱۶/۵۲۳	لی [۲۳]
۲/۶	۳۰/۵۰۶	۱/۵	۱۶/۷۹	دیکسیت و بابو [۲۰]

۶- نتایج و بحث

در شکل‌های ۴ و ۵ خطوط جریان برای نه حالت قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره‌های عمودی محفظه به ازای کسر حجمی $0/03$ ، با اعداد رایلی 10^7 و 10^8 نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در تمام حالات، یک گردابه اصلی در جهت عقربه‌های ساعت ایجاد شده و همچنین در داخل گردابه مرکزی در بعضی از حالت‌ها گردابه ثانویه تشکیل می‌شود. البته اندازه و محل گردابه‌های ثانویه به آرایش منبع گرم و سرد بستگی دارد. نحوه قرارگیری منبع گرم و سرد، تأثیر قابل توجهی

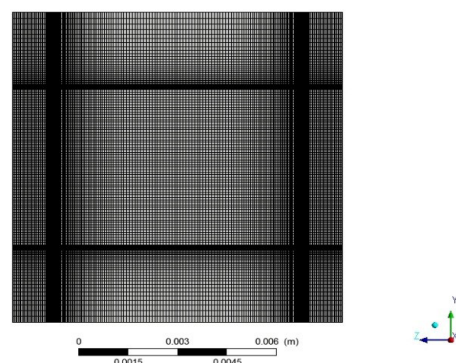


Fig. 2. Computational grid in middle-middle case

شکل ۲: شبکه محاسباتی در حالت وسط-وسط

۵- بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری

برای مطمئن شدن از صحت فرآیند حل عددی دو نوع آزمایش انجام شده و نتایج آن با نتایج موجود در مقالات مقایسه شده‌اند. کانتورهای دما در جریان مغشوش حاصل از کار حاضر با مرجع [۲۵] در شکل ۳ مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین نتایج وجود دارد. در بررسی دیگری انتقال حرارت در جریان آشفته درون یک محفظه مربعی که با هوا پر شده است و دیواره‌های سمت چپ و راست آن در دماهای ثابت T_c و T_h ($T_h > T_c$) قرار دارند و دیواره‌های بالایی و پایینی هم عایق هستند، بررسی شده است. در فرآیند حل عددی از یک شبکه غیر یکنواخت با تعداد گره 31356 استفاده شده است. مشاهده می‌شود که مطابقت خوبی بین عدد ناسلت گزارش شده از کار حاضر و نتایج دیگران وجود دارد.

نیروی شناوری می‌شوند. البته باید توجه نمود که دبی سیال جریان یافته به حاصل ضرب سرعت و چگالی وابسته است، با افزودن نانوذرات یکی کاهش و یکی افزایش می‌یابد و لذا قدرت جریان نانوسیال به میزان تاثیر هریک از این دو عامل بستگی دارد.

در شکل‌های ۸ و ۹ خطوط هم‌دما برای نه حالت قرارگیری منبع گرم و سرد در دیواره‌های عمودی محفظه به ازای کسر حجمی ۰/۰۳ و اعداد رایلی ۱۰^۷ و ۱۰^۸، نشان داده شده‌است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است، در تمامی حالت‌ها خطوط هم‌دما در نزدیکی منابع گرم و سرد نسبت به دیگر نواحی دارای تراکم بیشتری هستند که بیانگر گرادبان شدید دما در این نواحی است.

همچنین خطوط هم‌دما در ناحیه مرکزی به‌صورت افقی وجود دارند، که بیانگر لایه‌بندی حرارتی در این نواحی می‌باشند. همچنین برای بعضی از حالت‌ها یک ناحیه گرم در بالای محفظه و یا یک ناحیه سرد در پائین محفظه شکل می‌گیرد. البته نحوه قرارگیری منابع گرم و سرد بر فشردگی خطوط هم‌دما در نزدیکی این منابع و اندازه نواحی هم‌دما تاثیر می‌گذارد. با مقایسه حالت‌های مشابه در شکل‌های ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که در عدد رایلی بزرگتر، خطوط هم‌دما فشردگی بیشتری دارند و لایه‌های مرزی حرارتی باریک‌تر می‌شوند که بیانگر انتقال گرمای بیشتر می‌باشد.

بر الگوی خطوط جریان دارد. با مقایسه حالت‌های مشابه در این شکل‌ها، مشاهده می‌شود که در عدد رایلی بزرگتر به دلیل تسلط پیدا کردن رژیم انتقال حرارت جابه‌جایی، خطوط جریان در نزدیکی منبع گرم و سرد دارای فشردگی بیشتری می‌باشند، که بیانگر جابه‌جایی قوی و سرعت بالا در این نواحی می‌باشد.

در تمامی حالت‌های آرایش منبع گرم و سرد در عدد رایلی ۱۰^۷ (شکل ۴) در مقایسه با عدد رایلی ۱۰^۸ (شکل ۵)، ناحیه مرکزی در جهت افقی بیشتر کشیده شده‌اند.

برای مقایسه بهتر تاثیر افزودن نانوذرات بر میدان سرعت، در شکل‌های ۶ و ۷، پروفیل مولفه افقی سرعت در وسط محفظه برای اعداد رایلی ۱۰^۷ و ۱۰^۸ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها پیداست با به‌کارگیری نانوسیال، در بعضی از حالت‌ها از مقادیر سرعت به خصوص قله سرعت کاسته می‌شود. بیشترین کاهش در عدد رایلی ۱۰^۷ برای حالت پایین-پایین بوده و مقدار آن حدود ۵۰ درصد است. در رایلی ۱۰^۸ بیشترین میزان کاهش برای حالت وسط-پایین بوده و مقدار آن حدود ۲۵ درصد است. این کاهش در سرعت، به واسطه افزایش چگالی و لزجت نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزودن نانوذرات چگالی و لزجت نانوسیال افزایش می‌یابد که باعث مقاومت بیشتر در جریان یافتن سیال به واسطه

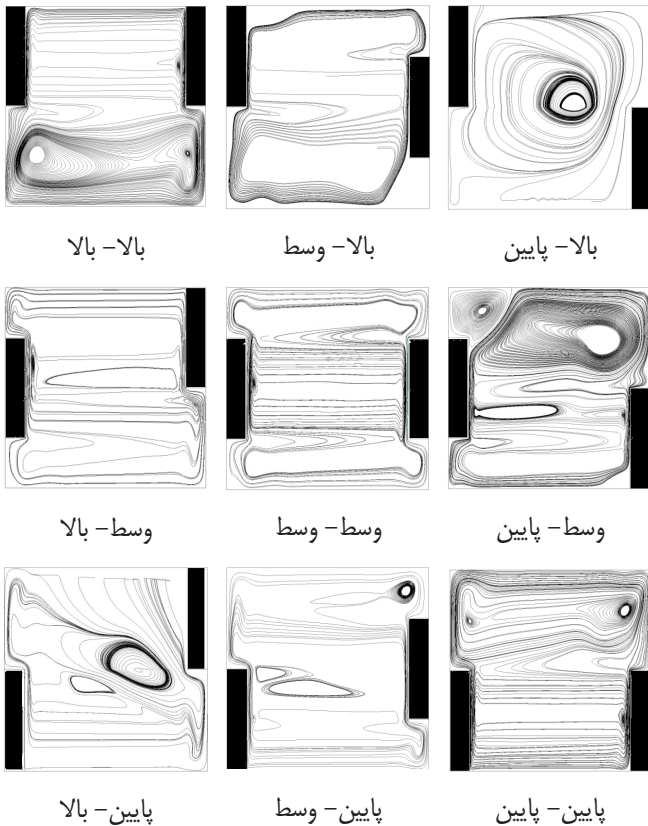


Fig. 5. Streamlines for different cases at $Ra=10^8$ and $\phi=0.03$

شکل ۵: خطوط جریان برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد برای $\phi=0/03$ و $Ra=10^8$

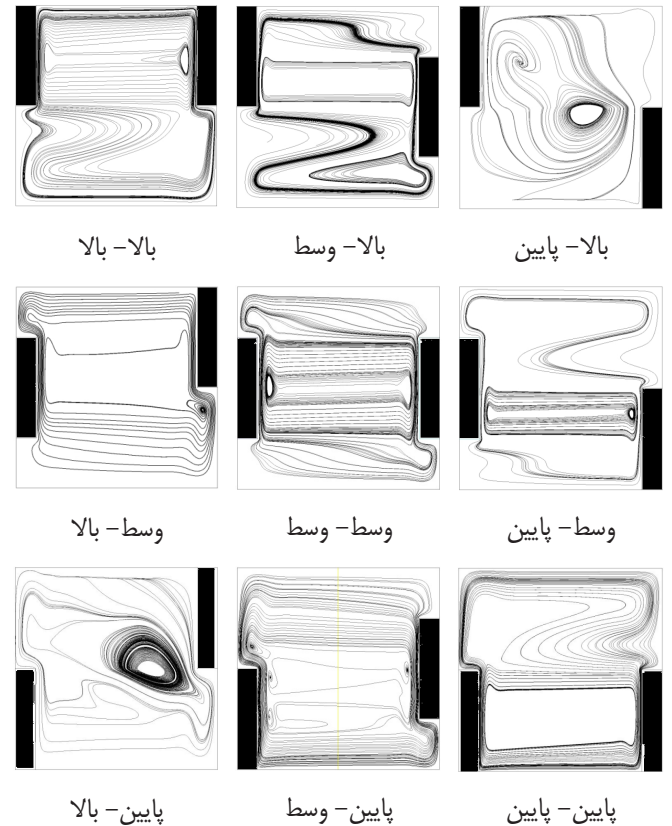


Fig. 4. Streamlines for different cases at $Ra=10^7$ and $\phi=0.03$

شکل ۴: خطوط جریان برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد برای $\phi=0/03$ و $Ra=10^7$

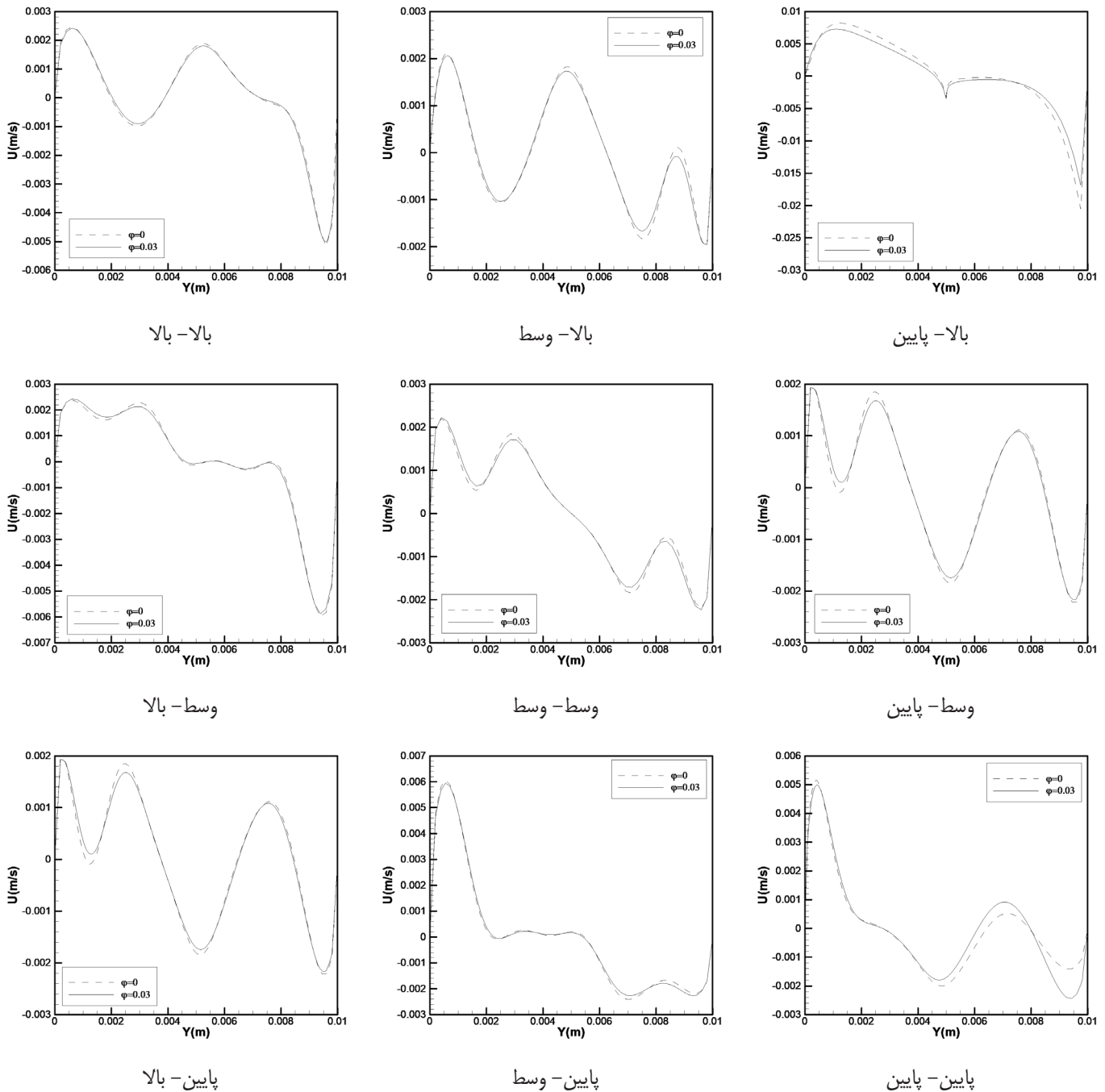


Fig. 6. Velocity in direction x for different cases at $Ra=10^7$ and $\phi=0.03$

شکل ۶: مولفه افقی سرعت برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد به ازای $Ra=10^7$ و $\phi=0$ و $\phi=0.03$

انتقال حرارت در این حالت‌ها مناسب نمی‌باشد. این در حالی است که در اکثر کارهای عددی که خواص نانوسیال تابع کسر حجمی ولی مستقل از دما در نظر گرفته شده است، افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات گزارش شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، افزودن نانوذرات باعث افزایش لزجت نانوسیال می‌شود و شایان ذکر است که مدل‌های ارزیابی لزجت نانوسیال مستقل از دما، مقادیر کمتری را نسبت به مدل‌های وابسته به دما برای لزجت پیش‌بینی می‌کنند. این موضوع در کارهای قبلی در رابطه با جریان آرام نیز برای نانوسیالات و هندسه‌های

در شکل ۱۰ تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم برحسب کسر حجمی نانوذرات برای حالت‌های مختلف در اعداد رایلی 10^7 و 10^8 نشان داده شده است.

در شکل ۱۰ می‌توان دید که به ازای هر دو عدد رایلی 10^7 و 10^8 در تمام حالت‌ها با افزایش کسر حجمی تا ۱ درصد، عدد ناسلت متوسط افزایش یافته و سپس با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت روند کاهشی دارد. لازم به ذکر است که در بعضی از کسرهای حجمی، عدد ناسلت متوسط کمتر از عدد ناسلت متوسط سیال پایه است. بنابراین به‌کارگیری نانوسیال برای افزایش

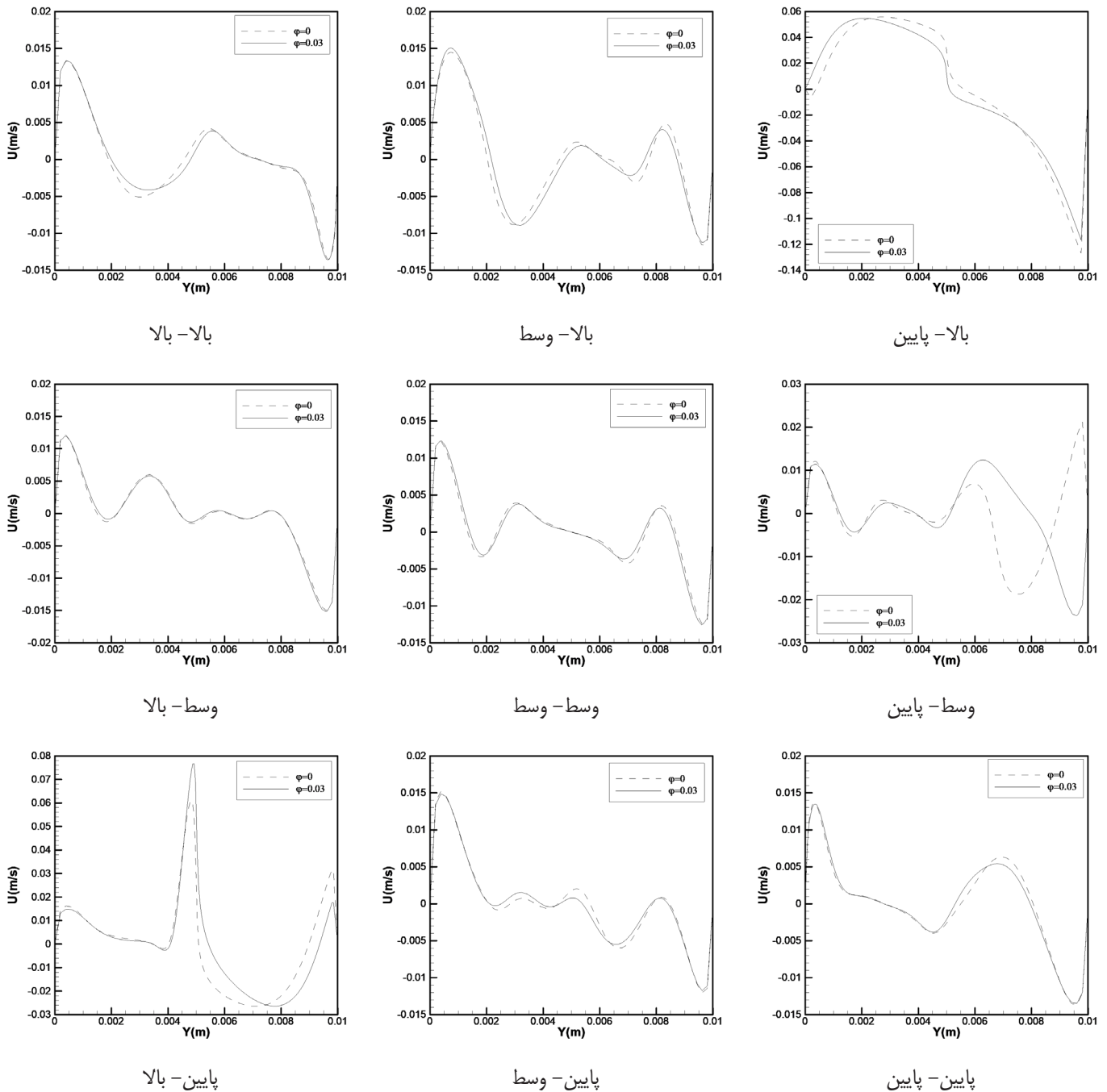


Fig. 7. Velocity in direction x for different cases at $Ra=10^8$ and $\phi=0.03$

شکل ۷: مولفه افقی سرعت برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد به ازای $Ra=10^8$ و $\phi=0$ و $\phi=0.03$

و پایین-بالا رخ می‌دهند. قابل ذکر است که در رایلی 10^7 و 10^8 انتقال حرارت ماکزیمم (عدد ناسلت ماکزیمم) برای حالت پایین-پایین و انتقال حرارت مینیمم (عدد ناسلت مینیمم) برای حالت بالا-پایین اتفاق می‌افتد. نحوه قرارگیری و فاصله منابع گرم و سرد نیز بر انتقال حرارت اثر گذار است. به عنوان مثال حالت‌هایی که منابع حرارتی فاصله بیشتری دارند (حالت‌های بالا-پائین و پائین-بالا)، دارای مقاومت حرارتی هدایتی بیشتری می‌باشند. لذا مشاهده می‌شود که عدد ناسلت ماکزیمم در این حالت رخ نمی‌دهد، بلکه در حالت‌های بالا-بالا، وسط-وسط و پایین-پایین رخ می‌دهند. در

متفاوت گزارش شده است و با افزایش کسر حجمی نانوذررات عدد ناسلت کاهش یافته است [۲۳ و ۲۴].

از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود به ازای هر دو عدد رایلی 10^7 و 10^8 در حالتی که منبع گرم در بالا قرار گیرد، عدد ناسلت متوسط ماکزیمم در حالتی رخ می‌دهد که منبع سرد نیز در بالا باشد و منبع گرم در وسط و پایین باشد. عدد ناسلت متوسط ماکزیمم در حالتی که منبع سرد به ترتیب در وسط و پایین قرار دارند رخ می‌دهد. در هر دو عدد رایلی برای هر سه حالت منبع گرم، عدد ناسلت کمتر برای حالت‌های بالا-پایین، وسط-پایین

این حالت‌ها اعداد ناسلت حدود ۲ برابر حالت‌های بالا-پایین و پایین-بالا می‌باشند.

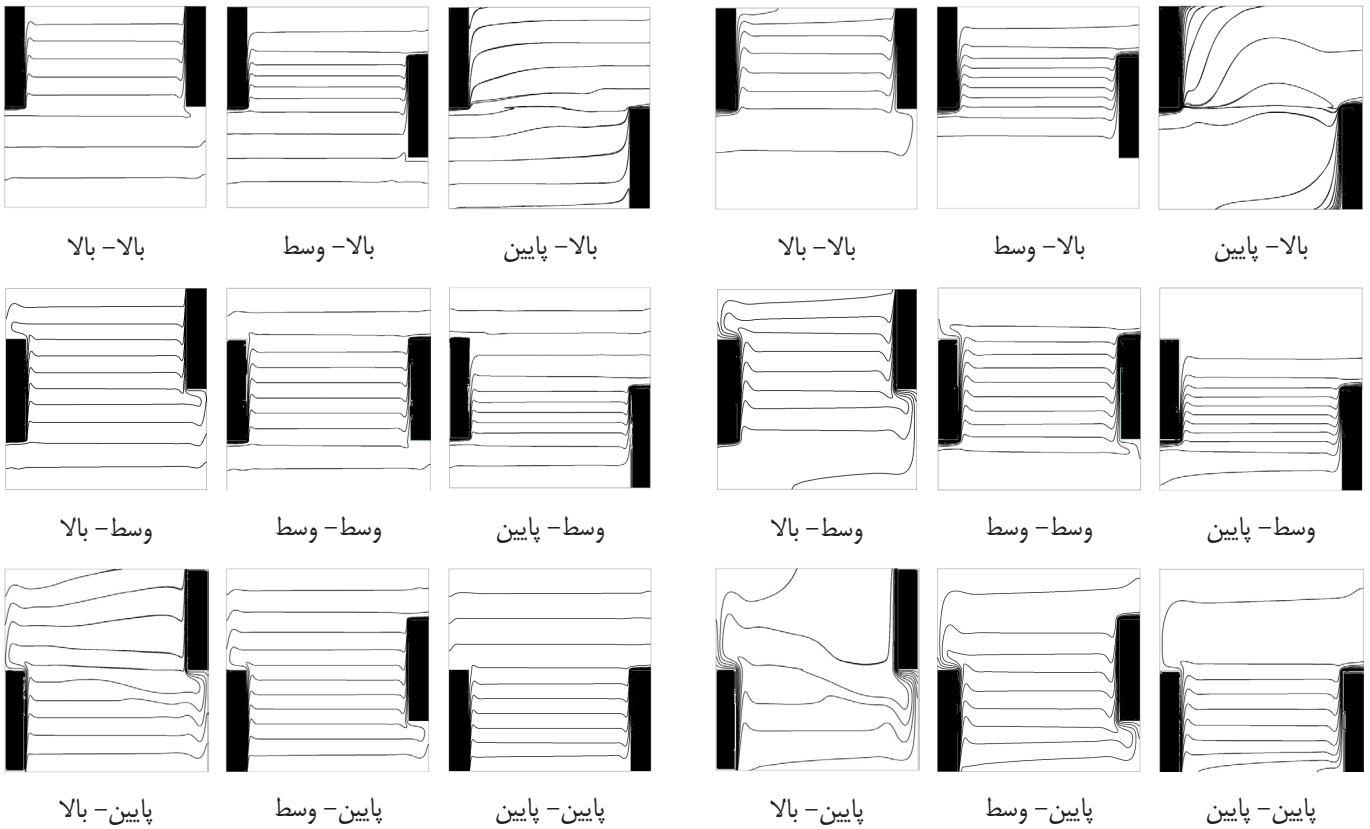


Fig. 9. Isotherms for different cases at $Ra=10^8$ and $\phi=0.03$

Fig. 8. Isotherms for different cases at $Ra=10^7$ and $\phi=0.03$

شکل ۹: خطوط هم‌دما برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد برای $\phi=0.03$ و $Ra=10^8$

شکل ۸: خطوط هم‌دما برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد برای $\phi=0.03$ و $Ra=10^7$

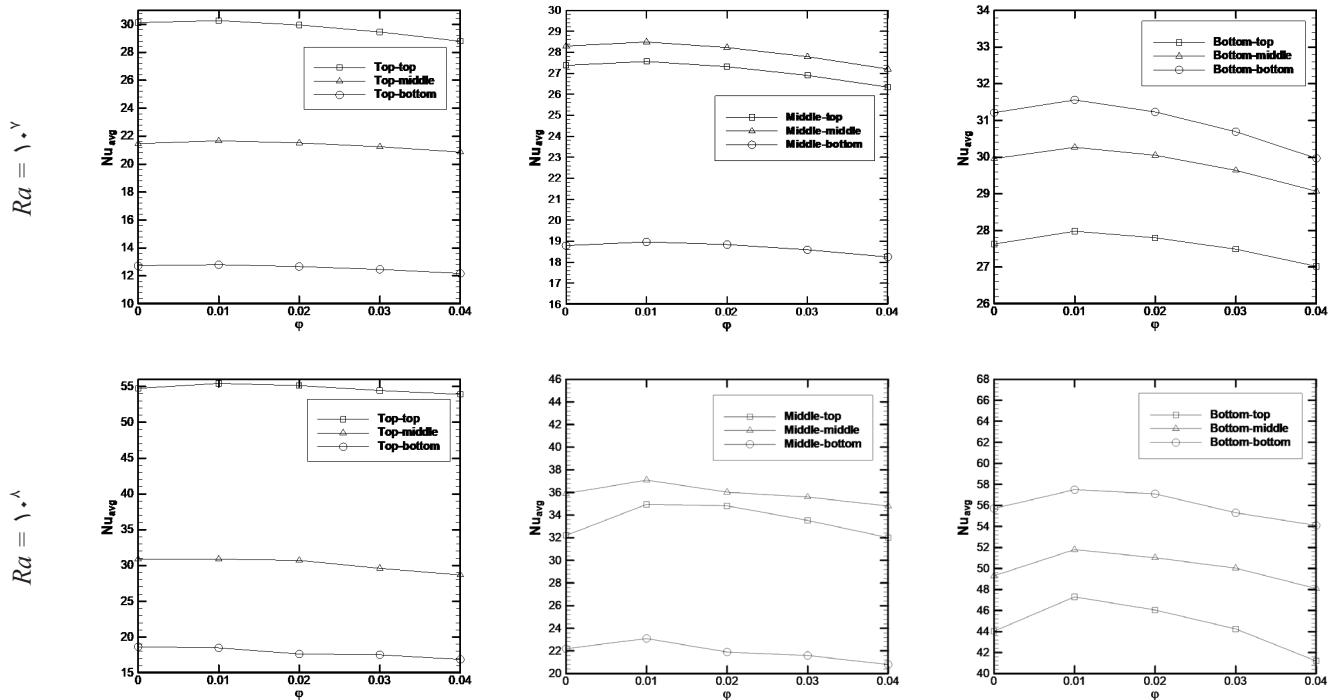


Fig. 10. Variation of the average Nusselt number in terms of the volume fraction of nanoparticles for different cases and Rayleigh numbers

شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی نانوذرات برای موقعیت‌های مختلف منبع گرم و سرد به ازای رایلی‌های مختلف

۷- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم با خواص متغیر در جریان آشفته درون یک محفظه مربعی با منابع حرارتی گرم و سرد برجسته روی دیواره های عمودی آن که طول آن ها برابر با نصف طول محفظه و عرض آن ها برابر با ۰/۱ ارتفاع محفظه می باشند به صورت عددی مدل سازی و مطالعه شده است. محل قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره ها، تغییر کسر حجمی نانوذرات و تغییر عدد رایلی با در نظر گرفتن خواص متغیر بر جریان و انتقال حرارت درون محفظه بررسی شده است. براساس نتایج عددی به دست آمده موارد زیر قابل ذکر است:

- محل قرارگیری منبع گرم و سرد روی دیواره ها و تغییر عدد رایلی، الگوی خطوط جریان و خطوط هم دما را تغییر می دهند.
- در هر دو عدد رایلی 10^7 و 10^8 ، کم ترین مقدار عدد ناسلت متوسط برای حالت بالا- پایین و بیشترین مقدار آن برای حالت پایین- پایین رخ می دهد که در رایلی 10^7 حدود ۱/۵ برابر حالت بالا- پایین و در رایلی 10^8 حدود دو برابر این حالت است. همان طور که مشخص است، با افزایش عدد رایلی، تاثیر قرارگیری منابع روی انتقال حرارت با اهمیت تر می باشد. بنابراین اگر در سیستم حرارتی مورد نظر، کاهش یا افزایش انتقال حرارت مطلوب باشد، می توان از این وضعیت های قرارگیری برای منبع گرم و منبع سرد استفاده کرد.
- به ازای رایلی 10^7 و 10^8 در تمام حالت ها با افزایش کسر حجمی تا ۱ درصد عدد ناسلت متوسط افزایش یافته و سپس با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت روند کاهشی دارد. همچنین در بعضی از حالت ها عدد ناسلت متوسط نسبت به سیال پایه کمتر می باشد. بنابراین به نظر می رسد که به کارگیری نانوسیال در هندسه مورد مطالعه برای افزایش انتقال حرارت در این حالت ها مطلوب نمی باشد.

عدد ناسلت متوسط	Nu_{avg}
فشار (Nm^{-2})	p
فشار بی بعد	P
عدد پراتل	Pr
تعداد گره ها در هر راستا	N
عدد رایلی	Ra
دما (K)	T
دمای مرجع سیال پایه (K)	T_r
نقطه انجماد سیال پایه (K)	T_{fp}
مولفه های سرعت در راستای x,y (ms^{-1})	u, v
مولفه های سرعت بی بعد در راستای x,y	U, V

علامت یونانی

ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})	α
ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	β
ضریب پخش موثر	Γ
کسر حجمی نانوذرات	ϕ
لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})	ν
دمای بی بعد	θ
تنش (Pa)	τ
تابع جریان (m^2s^{-1})	ψ
عدد پراتل جریان معشوش	σ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
لزجت دینامیکی (Nsm^{-2})	μ
لزجت دینامیکی نانوسیال (Nsm^{-2})	μ_{eff}

اندیس ها

نانوسیال	nf
سیال	f
نانوذرات	p
گرم	h
سرد	c
جامد	s
معشوش	t
موثر	eff

فهرست علائم

c_p	گرمای ویژه ($kJkg^{-1}K^{-1}$)
d	قطر مولکول ها (m)
E	انرژی کل (J)
g	شتاب گرانشی (ms^{-2})
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی ($Wm^{-2}K^{-1}$)
k	ضریب هدایت حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
k_b	ثابت بولتزمن (JK^{-1})
k_{eff}	ضریب هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال ($Wm^{-1}K^{-1}$)
l	طول و عرض محفظه (m)
Nu	عدد ناسلت

- turbulent natural convection in an inclined square cavity with a hot wavy wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(9-10) (2007) 1683-1693.
- [12] G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet, Numerical simulation of turbulent natural convection in a rectangular enclosure having finite thickness walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3) (2010) 163-177.
- [13] M.H. Hasanen, H.J. Akeiber, Laminar and Turbulent Natural Convection Simulation with Radiation in Enclosure, in: *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ*, 2016, pp. 3-11.
- [14] T. Kogawa, J. Okajima, A. Sakurai, A. Komiya, S. Maruyama, Influence of radiation effect on turbulent natural convection in cubic cavity at normal temperature atmospheric gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104 (2017) 456-466.
- [15] F.R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32(8) (1994) 1598-1605.
- [16] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International journal of heat and mass transfer*, 46(19) (2003) 3639-3653.
- [17] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 52(1) (2011) 789-793.
- [18] A. Bejan, *Convection heat transfer*, John wiley & sons, 2013.
- [19] Z. Alloui, P. Vasseur, M. Reggio, Natural convection of nanofluids in a shallow cavity heated from below, *International journal of Thermal sciences*, 50(3) (2011) 385-393.
- [20] H. Dixit, V. Babu, Simulation of high Rayleigh number natural convection in a square cavity using the lattice Boltzmann method, *International journal of heat and mass transfer*, 49(3-4) (2006) 727-739.
- [21] N.C. Markatos, K. Pericleous, Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(5) (1984) 755-772.
- [22] P. Le Quéré, Accurate solutions to the square thermally driven cavity at high Rayleigh number, *Computers & Fluids*, 20(1) (1991) 29-41.
- [23] E. Abu-Nada, A.J. Chamkha, Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO-EG-water nanofluid, *International*
- [1] A. Valencia, R.L. Frederick, Heat transfer in square cavities with partially active vertical walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 32(8) (1989) 1567-1574.
- [2] N. Nithyadevi, P. Kandaswamy, J. Lee, Natural convection in a rectangular cavity with partially active side walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(23-24) (2007) 4688-4697.
- [3] P. Kandaswamy, N. Nithyadevi, C. Ng, Natural convection in enclosures with partially thermally active side walls containing internal heat sources, *Physics of Fluids*, 20(9) (2008) 097104.
- [4] M. Sankar, M. Bhuvaneswari, S. Sivasankaran, Y. Do, Buoyancy induced convection in a porous cavity with partially thermally active sidewalls, *International journal of heat and mass transfer*, 54(25-26) (2011) 5173-5182.
- [5] G. Sheikhzadeh, A. Arefmanesh, M. Dastmalchi, H. Ardeshiri, Numerical Study of Natural Convection of Al₂O₃-Water Nanofluid in a cavity, *Amirkabir Journal of Science and Research*, 45(1) (2013) 39-49. (In Persian)
- [6] G. Sheikhzadeh, A. Arefmanesh, M. Kheirkhah, R. Abdollahi, Natural convection of Cu-water nanofluid in a cavity with partially active side walls, *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 30(2) (2011) 166-176.
- [7] R. Jmai, B. Ben-Beya, T. Lili, Heat transfer and fluid flow of nanofluid-filled enclosure with two partially heated side walls and different nanoparticles, *Superlattices and Microstructures*, 53 (2013) 130-154.
- [8] F. Wu, G. Wang, W. Zhou, A thermal nonequilibrium approach to natural convection in a square enclosure due to the partially cooled sidewalls of the enclosure, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 67(7) (2015) 771-790.
- [9] R. Nikbakhti, J. Khodakhah, Numerical investigation of double diffusive buoyancy forces induced natural convection in a cavity partially heated and cooled from sidewalls, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(1) (2016) 322-337.
- [10] G. Barakos, E. Mitsoulis, D. Assimacopoulos, Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 18(7) (1994) 695-719.
- [11] M. Aounallah, Y. Addad, S. Benhamadouche, O. Imine, L. Adjlout, D. Laurence, Numerical investigation of

enhancement in natural convection, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30(4) (2009) 679-690.

Journal of Thermal Sciences, 49(12) (2010) 2339-2352.
[24] E. Abu-Nada, Effects of variable viscosity and thermal conductivity of Al_2O_3 -water nanofluid on heat transfer

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

G. A. Sheikhzadeh, M. Sepehrnia, M. Rezaie, M. Mollamahdi, Natural Convection of Turbulent Al_2O_3 -Water Nanofluid with Variable Properties in a Cavity with a Heat Source and Heat Sink on Vertical Walls, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(6) (2018) 1237-1250.
DOI: 10.22060/mej.2017.12256.5291



