



جابه‌جای توام درون یک محفظه دوزنقه‌ای حاوی نانوسیال آب-مس

علی اکبر عباسیان آرانی^{۱*}، نرگس حاتمی نصار^۲، محمد رضایی^۳

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۳- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

* کاشان، کد پستی ۸۷۳۱۷-۵۱۱۶۷، abbasian@kashanu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۰۷ اردیبهشت ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۲ خرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۲ تیر ۱۳۹۳

کلید واژگان:

نانوسیال

مطالعه عددی

جابه‌جایی ترکیبی

محفظة دوزنقه‌ای

دریچه ورودی و خروجی

در این تحقیق انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال آب-مس در یک محفظه دوزنقه‌ای با منابع حرارتی روی دیواره‌های جانبی آن به‌صورت عددی بررسی شده است. منابع حرارتی روی دیواره‌های قائم در دماهای T_c و T_h واقع شده‌اند و دیواره‌های افقی عایق می‌باشند. جریان جابه‌جایی اجباری توسط عبور سیال از آن و جابه‌جایی طبیعی با قرار دادن دیواره چپ در دمایی بالاتر از دیواره راست ایجاد می‌شود. برای بررسی اثر مکان دریچه ورودی و خروجی، دو حالت بررسی شده است. مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت در حالتی که ورودی به دیواره سرد نزدیک‌تر است بیشتر از حالتی است که دیواره گرم نزدیک‌تر می‌باشد. نتایج برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات، عدد ریچاردسون و عدد رینولدز ارائه شده‌اند. براساس نتایج مشاهده شد که به‌ازای اعداد رینولدز و ریچاردسون مورد بررسی، در یک عدد رینولدز و کسر حجمی مشخص با افزایش عدد ریچاردسون، عدد ناسلت افزایش می‌یابد و همچنین در یک ریچاردسون و کسر حجمی مشخص افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. برای عدد ریچاردسون و رینولدز بالاتر، نانوسیال بر افزایش عملکرد انتقال گرما تأثیر بیشتری دارد.

Mixed convection in a trapezoidal enclosure filled with Cu-water nanofluid

AliAkbar Abbasian Arani^{1*}, Narges Hatami Nesar², Mohammad Rezaee²

1- Department of Mechanical Engineering, Kashan Univ., Kashan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Kashan Univ., Kashan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Kashan Univ., Kashan, Iran

* P.O.B. 87317-51167 Kashan, Iran, abbasian@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 April 2013

Accepted 02 June 2013

Available Online 13 July 2014

Keywords:

Nanofluid

Numerical Method

Mixed Convection

Trapezoid Cavity

Inlet And Outlet Ports

ABSTRACT

In this work, mixed convection of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure with heat source on lateral walls has been numerically investigated. Vertical walls of the enclosure are kept at constant temperatures of T_h and T_c , while horizontal walls are insulated. The mixed convection flow has been generated by passing the fluid through the enclosure and natural convection has been, also, investigated by holding the left wall at a temperature higher than the right wall. In order to examine the effect of the ports position, two cases were considered. Comparison between the results indicates that the rate of heat transfer is higher when the inlet port is near the cold wall than the hot wall. The results have been presented for various volume fractions, Richardson and Reynolds numbers. It was observed that for the considered Reynolds numbers and Richardson number, at a given Reynolds number and solid volume fraction, the Nusselt number increases with increasing the Richardson number. Moreover, at a given Richardson number and solid volume fraction, increasing the Reynolds number results in an increase in the Nusselt number. For the higher Richardson and Reynolds numbers, the nanofluid has more effect on the increase of the heat transfer performance.

۱- مقدمه

حرارتی پایین سیالات متداول از قبیل هوا، آب و روغن است که برای کاهش این محدودیت استفاده از نانوسیال مورد توجه قرار گرفته است [۲-۴]. فرهاد طالبی و همکاران [۵]، مطالعاتی روی جابه‌جایی ترکیبی (طبیعی و اجباری) نانوسیال آب-مس در یک محفظه مربعی که دیواره‌های بالا و پایین آن عایق بوده و دیوار سمت چپ و راست به‌ترتیب در دماهای T_c و T_h می‌باشند و دیوار بالا حرکت می‌کند، انجام دادند. آن‌ها به‌ازای یک عدد رینولدز ثابت، اثرات کسر حجمی نانوسیال را بر رفتار حرارتی و الگوی جریان در رایلی‌های بالا بررسی کردند و مشاهده کردند که با افزایش عدد رایلی، تأثیر کسر حجمی

جابه‌جایی ترکیبی در بسیاری از فرآیندهای صنعتی و انتقال حرارت مانند مبدل‌های حرارتی، سیستم‌های گندزدایی و خورشیدی، و در جاهایی که جابه‌جایی طبیعی به تنهایی قادر به خنک‌کاری مورد نیاز نیست، به‌کار می‌رود [۱]. کاربرد این نوع از مسئله را می‌توان به خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، خنک‌کاری قطعات مکانیکی، پنجره‌های دو جداره، خشک کن‌های که از جریان‌های توام استفاده می‌کنند و مبدل‌های حرارتی نسبت داد. محدودیت عمده افزایش انتقال حرارت در تجهیزات حرارتی، هدایت

Please cite this article using:

A.A. Abbasian Arani, N. Hatami Nesar, M. Rezaee, Mixed convection in a trapezoidal enclosure filled with Cu-water nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 41-51, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

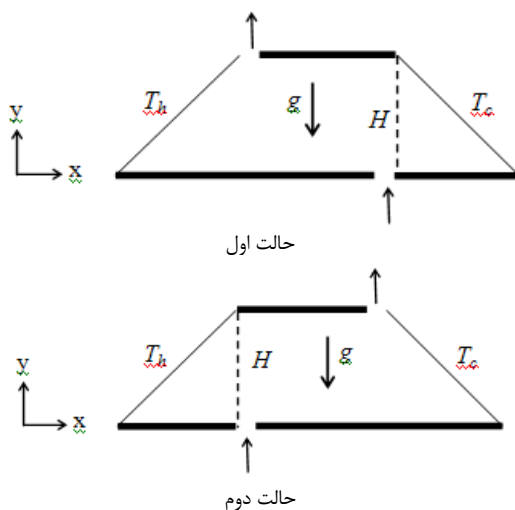
انتقال حرارت درون یک محفظه دوزنقه‌ای که قسمتی از آن متخلخل بوده و حاوی سیال می‌باشد پرداخت. پارامترهایی از قبیل عدد رابلی، محل قرارگیری و ضخامت قسمت متخلخل و نرخ انتقال حرارت هدایت بین سیال و قسمت جامد متخلخل را بررسی نمود و مشاهده کرد که رژیم انتقال حرارت هدایت درون محفظه به‌ازای ضخامت زیاد قسمت متخلخل، اعداد رابلی پایین و نرخ حرارتی پایین غالب می‌شود. مصطفی علامی و همکاران [۱۳]، جابه‌جایی ترکیبی را درون یک دوزنقه قائم‌الزاویه در دو حالت بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در حالت اول که ورودی و خروجی به‌ترتیب روی دیواره پایینی و دیواره سمت راست قرار دارند یک مقدار رینولدز بحرانی وجود دارد که به‌ازای آن جریان طبیعی از بین رفته و جریان اجباری ایجاد می‌شود و مقدار رینولدز بحرانی به عدد رابلی وابسته است و در حالت دوم که ورودی و خروجی روی دیوار پایین قرار دارند، جت عمودی ورودی باعث تبادل حرارت به‌سمت خروجی می‌شود.

بررسی کارهای انجام شده در زمینه جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه‌ها نشان می‌دهد تحقیقات کافی روی دوزنقه انجام نشده است. به‌نظر می‌رسد خروج دیواره‌های قائم از حالت عمودی می‌تواند تاثیر شگرفی روی میدان جریان و انتقال حرارت بر جای گذارد. بر این اساس در این تحقیق به مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت درون یک دوزنقه پرداخته می‌شود. در کار حاضر جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه دوزنقه‌ای حاوی نانوسیال آب-مس که منبع گرم در طرف چپ و دیواره سرد طرف راست آن قرار دارند، بررسی شده است. نتایج با درنظر گرفتن اثر تغییر محل ورودی و خروجی، کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدسون و رینولدز ارائه شده‌اند.

۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

شکل شماتیک محفظه در شکل (۱) نشان داده شده است. روی دیواره‌های سمت چپ و راست محفظه به‌ترتیب یک منبع گرم با دمای T_h و یک دیواره سرد با دمای ثابت T_c که $T_h > T_c$ می‌باشد قرار دارند. محفظه با نانوسیال آب-مس که نیوتنی فرض می‌شود پر شده است. فرض می‌شود که نانوذرات دارای شکل و اندازه یکسان و یکنواخت بوده و هیچ لغزشی بین سیال و نانوذرات وجود ندارد. معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی برای جریان دائم نانوسیال درون محفظه به‌صورت زیر می‌باشند:

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



شکل ۱ هندسه مساله با دو حالت ورودی و خروجی

نانوذرات کاهش می‌یابد. در یک تحقیق دیگر پیشکار و قاسمی [۶] نشان دادند استفاده از نانوسیال در انتقال حرارت ترکیبی باعث پخش بهتر حرارت و افزایش دمای میانگین می‌شود. به‌علاوه تحقیق اخیر نشان می‌دهد استفاده از درصد‌های بالاتر نانوذره باعث افزایش انتقال حرارت خصوصاً در اعداد رینولدز بالاتر می‌شود. قاسمی و امین‌الساداتی [۷]، مطالعه‌ای بر روی جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه مثلثی حاوی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم که دیواره پایین آن عایق بوده و دیواره عمودی آن در دمای T_c به‌سمت بالا و پایین حرکت می‌کند و وتر آن هم در دمای T_h باقی می‌ماند انجام دادند. آن‌ها اثرات عدد ریچاردسون، کسر حجمی و جهت حرکت دیواره قائم را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش کسر حجمی به‌ازای تمام اعداد ریچاردسون، میزان انتقال حرارت در جهت حرکت دیواره قائم افزایش می‌یابد. همچنین وقتی که دیواره قائم به‌سمت پایین حرکت می‌کند جریان چرخشی قوی‌تری تشکیل شده و میزان انتقال حرارت هم افزایش می‌یابد.

امیرھوشنگ محمودی و همکاران [۸]، میدان جریان ترکیبی و دما و اثر تغییر محل ورودی و خروجی را در یک محفظه مربعی که ورودی روی دیواره سمت چپ و خروجی روی دیواره سمت راست می‌باشد و دیواره پایین آن تحت شار ثابت قرار دارد را بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بیشترین و کمترین میزان انتقال حرارت زمانی به‌وجود می‌آید که ورودی و خروجی به‌ترتیب در وضعیت پایین-پایین و بالا-بالا قرار دارند. آن‌ها نشان دادند که در رینولدز و ریچاردسون بالا و در حالتی که ورودی و خروجی در پایین-بالا قرار دارند در مقایسه با بقیه حالت‌ها، کسر حجمی نانوذرات اثرات بیشتری بر افزایش انتقال حرارت دارد و در حالتی که ورودی و خروجی در وضعیت بالا-بالا قرار دارند افزایش کسر حجمی تأثیر کمتری در افزایش انتقال حرارت دارد. صالح و همکاران [۹]، افزایش انتقال حرارت را با به‌کارگیری نانوسیال در یک محفظه دوزنقه‌ای با توجه به پارامترهای مختلف مربوطه بررسی کردند. آن‌ها اثرات عدد گرافش، زاویه شیب دیوار و کسر حجمی نانوذرات را روی الگوهای جریان و دما و همچنین نرخ انتقال حرارت درون محفظه برای دو نانوسیال آب-مس و آب-اکسید آلومینیوم بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که دیوار با شیب تند و نانوذرات مس با غلظت بالا برای افزایش نرخ انتقال حرارت مؤثرتر هستند و همچنین یک رابطه جدید برای عدد ناسلت متوسط به‌صورت تابعی از زاویه شیب دیوار، رسانش گرمایی مؤثر، ویسکوزیته و عدد گرافش ارائه دادند.

ازتوپ و همکاران [۱۰]، اثر میدان مغناطیسی را روی جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه دوزنقه‌ای بررسی کردند. آن‌ها دیوارهای شیب‌دار و دیوار پایین را دما ثابت و دیوار بالا را آدیاباتیک درنظر گرفتند و دمای دیوار پایین را بالاتر از دمای دیوارهای شیب‌دار قرار دادند و اثرات پارامترهای مختلف مانند عدد رابلی، عدد هارتمن و زاویه شیب دیوار محفظه را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که برای رابلی‌های مختلف با افزایش کسر حجمی و عدد هارتمن، انتقال حرارت کاهش می‌یابد. سیلوا و همکاران [۱۱]، جابه‌جایی طبیعی را در یک محفظه دوزنقه‌ای شکل با دو مانع داخلی روی دیواره پایین بررسی کردند. آن‌ها اثر سه زاویه شیب سطح بالای دوزنقه و همچنین اثر عدد رابلی، عدد پرانتل و ارتفاع موانع را روی توابع جریان و پروفیل‌های دما و عدد ناسلت متوسط و محلی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در رابلی ثابت، انتقال حرارت با افزایش ارتفاع مانع کاهش می‌یابد و از طرف دیگر برای یک ارتفاع مشخص، انتقال حرارت با افزایش عدد رابلی افزایش یافته در حالی که عدد ناسلت متوسط با افزایش زاویه شیب به آرامی افزایش پیدا می‌کند. یاسین وارل [۱۲]، به بررسی جریان و

شرط مرزی در خروجی شرط توسعه یافته حرارتی و سرعت است [۱۷-۱۹]. ضریب جابه‌جایی حرارتی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h_{nf} = \frac{q}{T_h - T_c} \quad (۱۶)$$

و از آنجا عدد ناسلت روی دیواره گرم محفظه دوزنقه‌ای از رابطه زیر به‌دست می‌آید.

$$Nu = \frac{h_{nf} L}{k_f} \quad (۱۷)$$

شارحرارتی دیواره برای واحد سطح به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$q = -k_{nf} \frac{T_h - T_c}{L} \frac{\partial \theta}{\partial n} \bigg|_{wall} \quad (۱۸)$$

با استفاده از معادلات فوق عدد ناسلت به‌صورت زیر در می‌آید:

$$Nu = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial n} \bigg|_{wall} \quad (۱۹)$$

برای عدد ناسلت متوسط از رابطه زیر استفاده شده است:

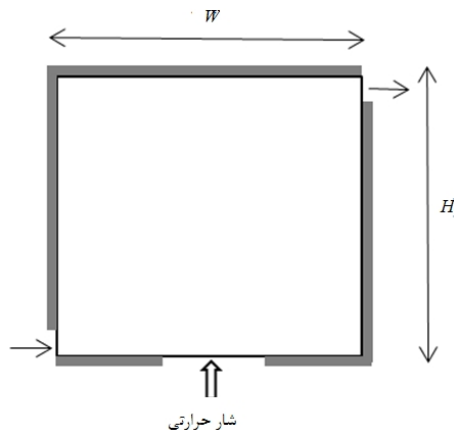
$$Nu_{avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dx \quad (۲۰)$$

۳- بررسی صحت عملکرد برنامه کامپیوتری

جهت اطمینان از صحت برنامه کامپیوتری در یک حالت مشخص نتایج حاصل با نتایج موجود در مقاله شاهی و همکاران [۱۷]، مقایسه شده است. در مقایسه، مطابق شکل (۲)، جریان سیال و انتقال حرارت درون یک محفظه مربعی حاوی نانوسیال آب-مس بررسی شده است. دیواره پایین تحت شار ثابت قرار دارد و بقیه دیواره‌ها عایق می‌باشند. در فرآیند حل از یک شبکه با تعداد گره ۷۳×۸۵ استفاده شده است. جدول (۲) اعداد ناسلت متوسط به-دست آمده در دیواره گرم را به‌ازای اعداد ریچاردسون ۱۰ و رینولدزهای ۵۰، ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ در حل حاضر نشان می‌دهد. از این جدول می‌توان مشاهده کرد که مطابقت خوبی بین نتایج به‌دست آمده از حل حاضر و حل شاهی و همکاران [۲۰] وجود دارد.

جدول ۲ مقایسه کار حاضر با کار شاهی و همکاران [۲۰]

ناسلت در کار حاضر	ناسلت در کار شاهی و همکاران [۲۰]	
۱۰/۳۴	۱۰/۳	Re=۵۰
۱۳/۵۷	۱۳/۵	Re=۱۰۰
۳۹/۷۶	۳۹	Re=۵۰۰
۵۹/۷۵	۵۸	Re=۱۰۰۰



شکل ۲ هندسه حل و شرایط مرزی برای بررسی صحت برنامه کامپیوتری

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۱۴]

خواص ترموفیزیکی	آب	مس
گرمای ویژه	۴۱۷۹	۳۸۳
چگالی	۹۹۷/۱	۸۹۵۴
ضریب هدایت حرارتی	۰/۶	۴۰۰
ضریب انبساط حرارتی	۱۰-۴x۲/۱	۱۰-۵x۱/۶۷

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (۲)$$

$$\rho_{nf} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + g(\rho\beta)_{nf}(T - T_c) \quad (۳)$$

$$(\rho c_p)_{nf} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (۴)$$

خواص ترموفیزیکی نانوسیال شامل دانسیته، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته به‌ترتیب از روابط زیر به‌دست می‌آیند [۱۴-۱۶]:

$$\rho_{nf,o} = (1 - \phi) \rho_{f,o} + \phi \rho_{s,o} \quad (۵)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho c_p)_f + \phi (\rho c_p)_s \quad (۶)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f - \phi(k_f - k_s)} \quad (۷)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 + \phi)^{2.5}} \quad (۸)$$

خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات در دمای ۳۰۰ کلین در جدول ۱ آورده شده‌اند.

بی‌بعدسازی توسط پارامترهای زیر انجام می‌شود:

$$(X, Y) = \frac{(x, y)}{H}, \quad (U, V) = \frac{(u, v)}{V_0}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (۹)$$

شکل بی‌بعد معادلات به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۱۰)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (۱۱)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ri \theta \quad (۱۲)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (۱۳)$$

که در آن اعداد بی‌بعد به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Ra = \frac{g \beta (T_h - T_c) H^3}{\alpha \nu}, \quad Gr = \frac{g \beta L^3 (T_h - T_c)}{g_f^2}, \quad Re = \frac{U_0 L}{g_f}, \quad Ri = \frac{Gr}{Re^2}, \quad Pr = \frac{g_f}{\alpha_f} \quad (۱۴)$$

شرایط مرزی معادلات بالا در شکل بی‌بعد به‌صورت زیر می‌باشند:

$$U=V=0, \theta=1 \quad \text{دیواره سمت چپ} \quad (۱۵-الف)$$

$$U=V=0, \theta=0 \quad \text{دیواره سمت راست} \quad (۱۵-ب)$$

$$U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{دیواره‌های افقی} \quad (۱۵-ج)$$

$$U=0, V=1, \theta=0 \quad \text{دریچه ورودی} \quad (۱۵-د)$$

$$U = \frac{\partial V}{\partial Y} = \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{دریچه خروجی} \quad (۱۵-ه)$$

۴- بررسی استقلال نتایج از شبکه

به‌منظور یافتن یک شبکه مناسب در فرآیند حل و مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت درون یک محفظه دوزنقه‌ای دارای منبع گرم و دیواره سرد در طرف چپ و راست محفظه حاوی نانوسیال آب-مس، عدد ناسلت متوسط با شش شبکه $M \times N$ با تعداد سلول مختلف 15×20 ، 30×40 ، 45×60 ، 60×80 ، 75×100 ، 90×120 محاسبه شده است. در جدول (۳) تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم برحسب تعداد سلول به‌ازای $\phi=0$ ، $Ri=10$ و $Re=500$ نشان داده شده‌اند.

از این نتایج مشاهده می‌شود که شبکه یکنواخت 60×80 به‌خوبی استقلال نتایج از شبکه را تأمین می‌کند و در کلیه محاسبات از آن استفاده شده است.

۵- نتایج و بحث

در کار حاضر، جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه دوزنقه‌ای حاوی نانوسیال آب-مس با منابع گرم و دیواره سرد در چپ و راست آن بررسی شده است.

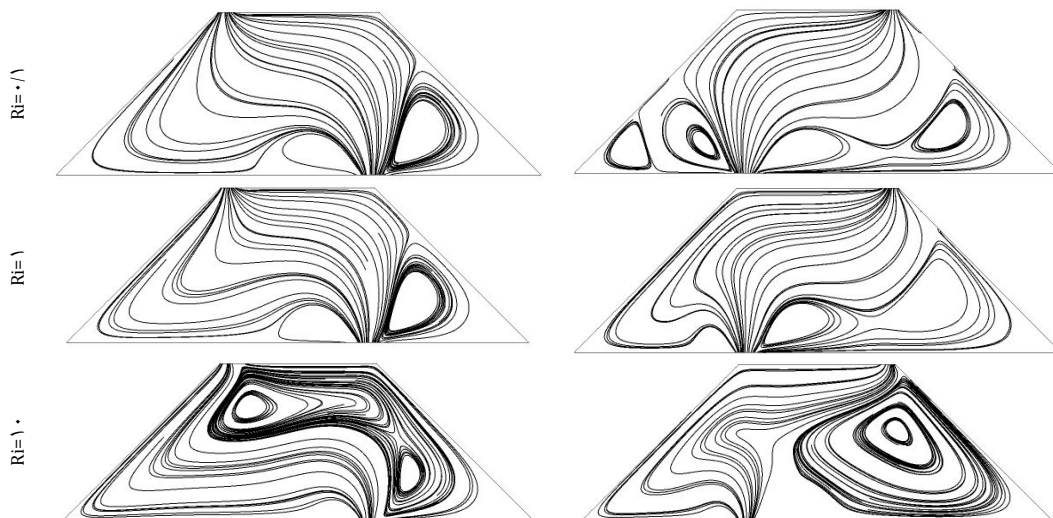
منابع گرم و دیواره سرد به‌ترتیب روی دیواره‌های چپ و راست قرار دارند، دیواره‌های بالا و پایین عایق بوده و محل ورودی و خروجی به‌ترتیب روی دیواره‌های پایین و بالا قرار دارند. در این کار، اثر تغییر محل ورودی و خروجی،

کسر حجمی نانوذرات، عدد ریچاردسون و عدد رینولدز بررسی شده‌اند. چون ماهیت جریان و خواص ترموفیزیکی سیال به‌شدت روی نرخ انتقال حرارت اثر می‌گذارند بررسی‌های عددی برای محدوده‌ای از اعداد رینولدز، ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات ($Re=50-500$ ، $Ri=0.1-10$ و $\phi=(0-5)\%$) انجام شده است. برای هر مقدار عدد رینولدز، عدد ریچاردسون از ۱ تا ۱۰ تغییر می‌کند به‌علاوه تأثیر نانوسیال روی عدد ناسلت بررسی شده است. در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) خطوط جریان برای حالت اول (راست) که ورودی به دیوار گرم نزدیک است و حالت دوم (چپ) به‌ازای ریچاردسون‌ها و کسر حجمی‌های مختلف برای مقادیر رینولدز ۵۰ و ۱۰۰ و ۵۰۰ نشان داده شده است.

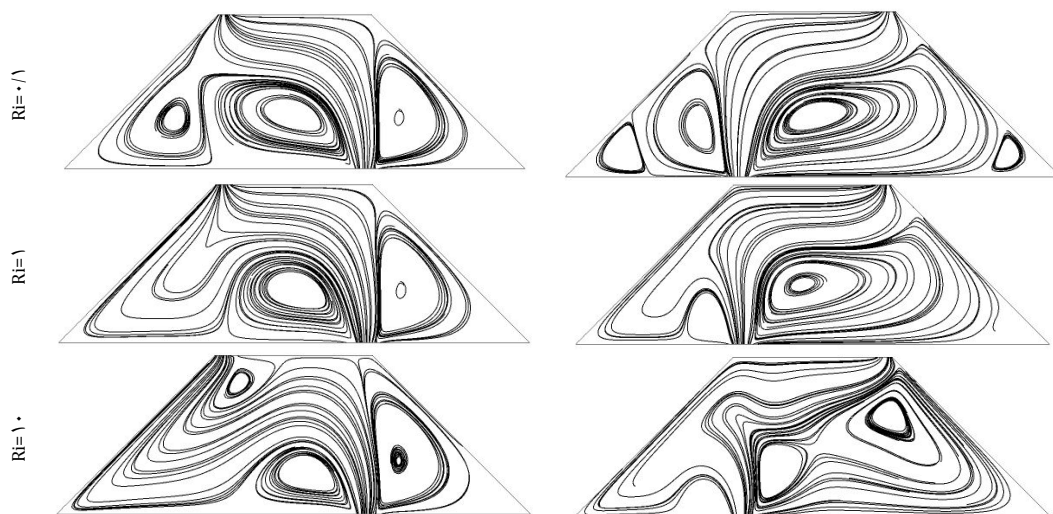
جدول ۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط روی منبع گرم برحسب تعداد سلول

به‌ازای، $\phi=0$ ، $Ri=10$ ، $Re=500$.

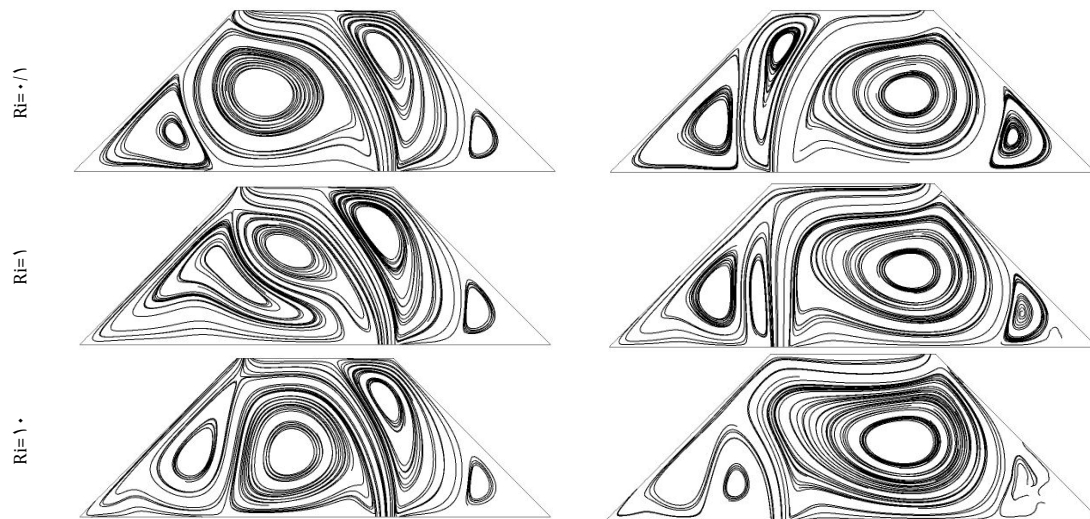
$M \times N$	Nu_{avg}
15×20	۱۴/۳۱۹۵
30×40	۲۶/۲۶۶۸
45×60	۳۱/۰۹۸۴
60×80	۳۲/۳۲۰۹
75×100	۳۲/۵۵۳۹
90×120	۳۲/۷۰۳۹



شکل ۳ خطوط جریان برای حالت اول (ستون راست) و دوم (ستون چپ) به‌ازای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی ۰/۰۵ در $Re=50$.



شکل ۴ خطوط جریان برای حالت اول (ستون راست) و دوم (ستون چپ) به‌ازای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی ۰/۰۵ در $Re=100$.



شکل ۵ خطوط جریان برای حالت اول (ستون راست) و دوم (ستون چپ) به‌ازای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی ۰/۰۵ در $Re=500$

علت تشکیل گردابه‌های سمت چپ محل ورودی، انبساط ناگهانی جریان می‌باشد که در یک رینولدز ثابت با افزایش عدد ریچاردسون و افزایش عدد گرافش اندازه آن‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز به دلیل افزایش سرعت، این انبساط ناگهانی شدیدتر بوده در نتیجه گردابه‌های بزرگ‌تری تشکیل می‌شوند. در $Re=500$ به دلیل سرعت بالای جریان ورودی، گردابه ناشی از انبساط ناگهانی در سمت چپ ورودی رشد شدیدی داشته و جریان با عبور از روی این گردابه به سمت دیوار گرم رفته و به سمت محل خروجی حرکت می‌کند و گردابه‌ای در نزدیکی دیواره گرم تشکیل می‌شود. در صورت مقایسه خطوط جریان برای حالت اول و دوم مشاهده می‌شود که گردابه‌های تشکیل شده در حالت اول در نزدیکی دیواره سرد بزرگتر از گردابه‌های تشکیل شده در حالت دوم می‌باشد زیرا علت عمده تشکیل گردابه‌ها در سمت راست محل ورودی در حالت دوم هندسه مساله بوده ولی در حالت اول بیشتر ناشی از جابه‌جایی طبیعی است. تراکم خطوط در سمت چپ محل ورودی در حالت دوم در نزدیکی دیواره گرم بیشتر از حالت اول می‌باشد زیرا در حالت دوم خروجی در نزدیکی دیواره گرم بوده و جریان ابتدا از روی دیواره گرم عبور کرده و سپس به سمت خروجی می‌رود.

در شکل‌های (۶) و (۷) و (۸) خطوط هم‌دما را برای حالت اول (ستون راست) و حالت دوم (ستون چپ) به‌ازای ریچاردسون‌ها و کسر حجمی‌های مختلف و برای همه مقادیر رینولدز بررسی شده، نشان داده‌اند. همان‌طور که از این شکل‌ها مشخص است در یک عدد رینولدز و کسر حجمی مشخص با افزایش عدد ریچاردسون، تراکم خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره گرم بیشتر شده‌اند زیرا با افزایش عدد ریچاردسون و در نتیجه افزایش عدد گرافش میزان جابه‌جایی طبیعی بیشتر شده لذا اختلاف دما هم زیاد می‌شود و باعث انتقال گرمای قوی‌تر می‌شود و این اختلاف دما و انتقال گرمای بیشتر باعث تراکم خطوط در نزدیکی دیواره گرم می‌شود.

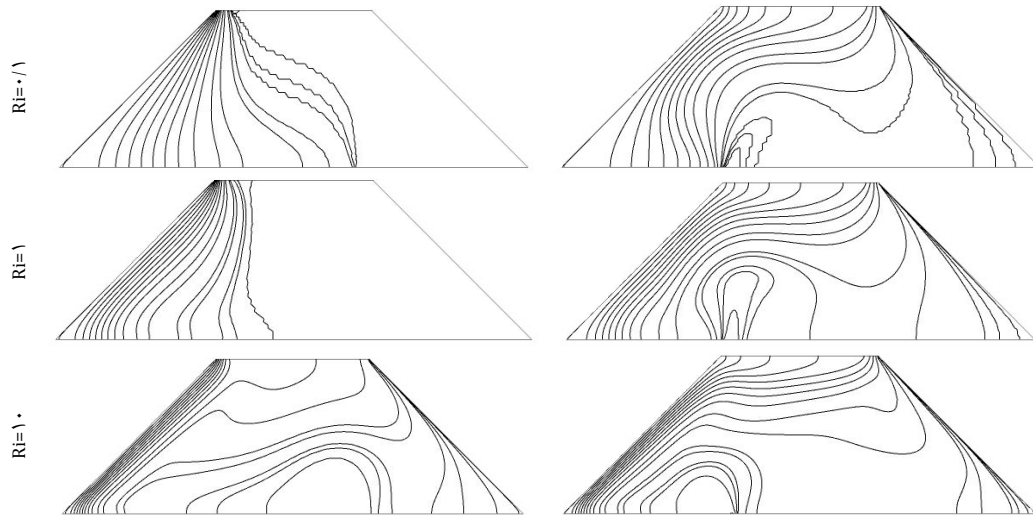
به‌ازای یک عدد رینولدز و عدد ریچاردسون مشخص با افزایش کسر حجمی نانوذرات، خطوط متراکم‌تر می‌شود و در واقع اضافه کردن نانوسیال باعث انتقال گرمای بیشتری می‌شود. در یک رینولدز و کسر حجمی مشخص با افزایش عدد ریچاردسون اندازه ناحیه سرد هم بزرگتر شده است زیرا همان‌طور که در قسمت تحلیل خطوط جریان بیان شد چون با افزایش عدد ریچاردسون، جابه‌جایی طبیعی بیشتر شده در نتیجه اندازه گردابه‌ها در سمت راست محل ورودی بزرگتر شده‌اند و لذا اندازه ناحیه سرد هم بیشتر شده است.

خطوط جریان اثر متقابل بین جابه‌جایی طبیعی و اجباری را توصیف می‌کنند. برای عدد رینولدزهای کمتر، جریان القا شده انرژی کمتری دارد. در شکل ۳ (راست) گردابه‌ای در گوشه سمت راست و پایین محفظه تشکیل شده است و نشان می‌دهد در تمامی حالت‌ها به‌ازای یک عدد رینولدز ثابت با افزایش عدد ریچاردسون گردابه‌های بزرگ‌تری در سمت راست تشکیل می‌شوند زیرا با افزایش عدد ریچاردسون مقدار عدد گرافش افزایش یافته در نتیجه جابه‌جایی طبیعی بیشتر می‌شود. افزایش عدد ریچاردسون باعث افزایش اثر بویانسی می‌شود و انتقال انرژی را که منجر به افزایش قدرت جریان می‌شود بهبود می‌دهد.

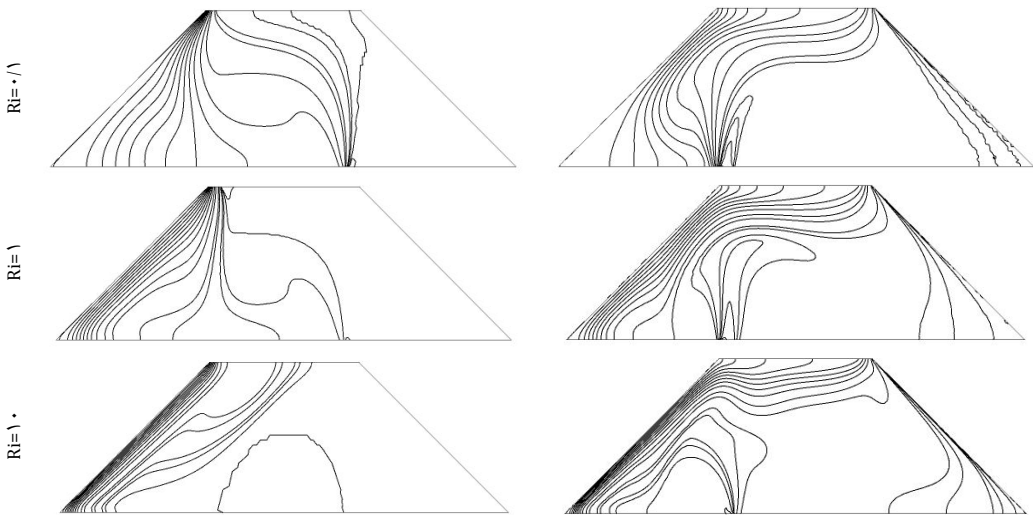
با افزایش عدد رینولدز در یک عدد ریچاردسون و کسر حجمی مشخص، اندازه گردابه‌ها بزرگ‌تر شده‌اند زیرا در صورت ثابت بودن عدد ریچاردسون با افزایش عدد رینولدز عدد گرافش نیز افزایش یافته در نتیجه اندازه گردابه‌ها بیشتر می‌شوند. همچنین علاوه بر سمت راست محفظه، در سمت چپ هم گردابه‌هایی تشکیل شده‌اند اما با افزایش عدد ریچاردسون در یک عدد رینولدز ثابت بر خلاف گردابه‌های تشکیل شده در سمت راست، اندازه آن‌ها کوچک‌تر شده‌اند. علت تشکیل این گردابه‌ها انبساط ناگهانی است و در یک عدد رینولدز ثابت با افزایش عدد ریچاردسون و عدد گرافش، از آنجایی که جابه‌جایی طبیعی افزایش یافته، انبساط خطوط جریان بر این گردابه‌ها اثر گذاشته و اندازه آن‌ها کوچک‌تر می‌شوند.

در شکل (۵) (راست) به‌ازای $Re=500$ در مقایسه با شکل‌های (۳) و (۴) در تمامی مقادیر عدد ریچاردسون اندازه گردابه‌های تشکیل شده در سمت راست بیشتر شده‌اند زیرا افزایش عدد رینولدز باعث افزایش سرعت شده است. اما در سمت چپ هم به علت افزایش سرعت و قوی‌تر بودن انبساط ناگهانی، گردابه‌ها بزرگ‌تر هستند. به‌ازای یک کسر حجمی و عدد ریچاردسون مشخص هر چقدر که عدد رینولدز افزایش می‌یابد تراکم خطوط بیشتر می‌شود که نشان دهنده جابه‌جایی قوی‌تر می‌باشد.

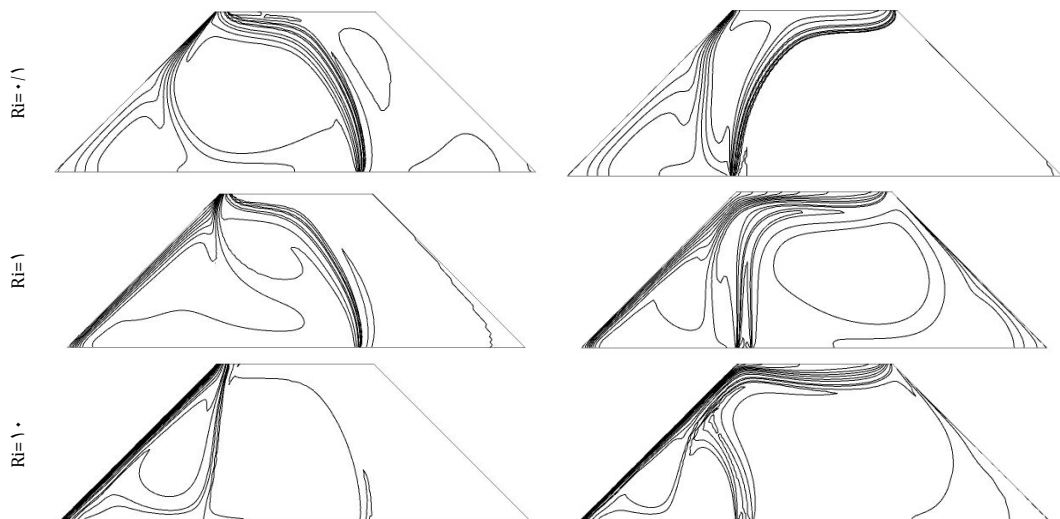
شکل‌های (۳) و (۴) و (۵) ستون سمت چپ خطوط جریان را برای حالت دوم و به‌ازای ریچاردسون‌ها و کسر حجمی‌های مختلف برای مقادیر رینولدز ۵۰ و ۱۰۰ و ۵۰۰ نشان می‌دهند. در این حالت محل قرارگیری منابع گرم و دیواره سرد مشابه ستون راست (حالت اول) بوده و فقط محل ورودی و خروجی تغییر کرده است. همان‌طور که از شکل (۳) ستون چپ مشخص است هم در سمت راست و هم در سمت چپ محل ورودی گردابه‌هایی تشکیل شده است. گردابه‌های تشکیل شده در سمت راست که ناشی از هندسه مساله می‌باشد با افزایش عدد رینولدز بزرگ‌تر شده‌اند.



شکل ۶ خطوط دما برای حالت اول (ستون راست) و حالت دوم (ستون چپ) به‌ازای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف در $Re=50$.



شکل ۷ خطوط دما برای حالت اول (ستون راست) و حالت دوم (ستون چپ) به‌ازای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف در $Re=100$.



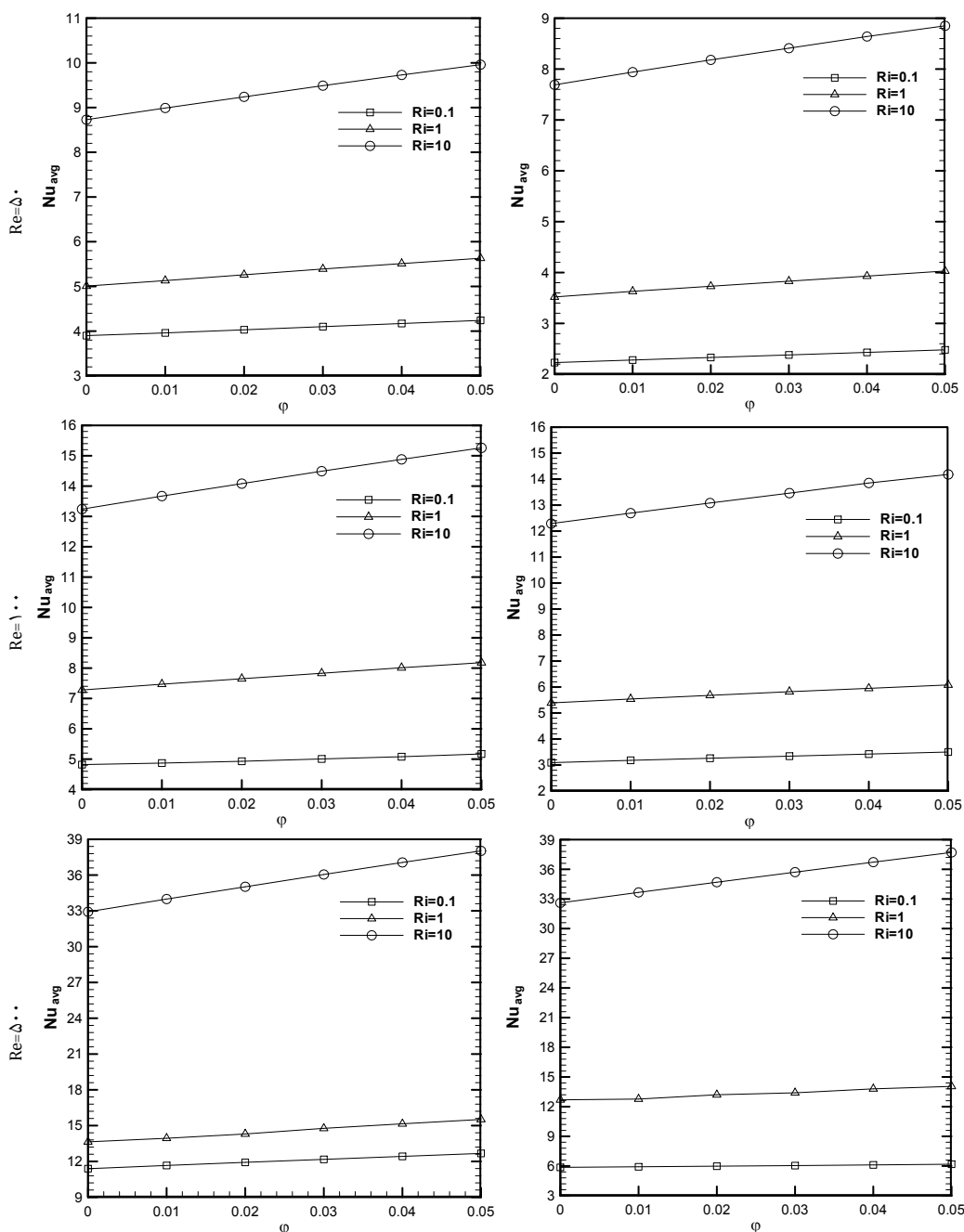
شکل ۸ خطوط دما برای حالت اول (ستون راست) و حالت دوم (ستون چپ) به‌ازای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف در $Re=500$.

جریان فشرده‌تر شدند و این خطوط جریان متراکم نشان‌دهنده قدرت جابه‌جایی بیشتری می‌باشد در نتیجه انتقال حرارت و گرادیان دما بیشتر می‌شود و لذا خطوط هم‌دما فشرده‌تر می‌شود و همچنین اندازه ناحیه سرد هم بزرگتر می‌شود

به‌ازای یک ریچاردسون و کسر حجمی مشخص با افزایش عدد رینولدز تراکم خطوط در نزدیکی دیواره گرم بیشتر می‌شود زیرا با افزایش عدد رینولدز جریان بیشتری با سرعت بالاتر به سمت دیواره گرم حرکت کرده به‌طوری که خطوط

افزایش یافته‌اند. در صورت مقایسه شکل‌های متناظر همدیگر در حالت اول و دوم (ستون‌های طرف راست و چپ) مشاهده می‌شود که در بعضی از شکل‌های حالت دوم اندازه ناحیه سرد نسبت به شکل‌های متناظر در حالت اول بیشتر است زیرا در حالت دوم تعداد و اندازه گردابه‌ها بیشتر می‌باشد. همچنین در حالت دوم تراکم خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره گرم بیشتر است زیرا در حالت دوم خروجی در سمت چپ و در نزدیکی دیواره گرم قرار دارد و جریان بیشتری به سمت دیواره گرم حرکت کرده و خطوط جریان فشرده‌تر هستند و این فشرده‌گی بیشتر نشان‌دهنده قدرت بیشتر جابه‌جایی است و از آنجایی که سیال بیشتری با دیواره گرم در تماس است در نتیجه انتقال گرما و گرادیان دمایی افزایش یافته لذا تراکم خطوط در نزدیکی دیواره بیشتر می‌شود. شکل‌های (۹) تا (۱۱) تغییرات عدد ناسلت را برحسب پارامترهای جریان نشان می‌دهد.

زیرا با افزایش عدد رینولدز سرعت بیشتر شده در نتیجه جریان با سرعت بالاتری به سمت خروجی می‌رود و همین جریان دارای سرعت بالا، مانع انتقال حرارت از سمت چپ به راست محفظه شده و در نتیجه در سمت راست ناحیه سرد بزرگتری تشکیل می‌شود. در شکل‌های (۶) و (۷) و (۸) سمت چپ خطوط هم‌دما را برای حالت دوم به‌ازای اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف و برای همه مقادیر اعداد رینولدز بررسی شده نشان داده‌اند. همان‌طور که این شکل‌ها نشان می‌دهند در حالت دوم با توجه به جابه‌جا شدن محل ورودی و خروجی بنا به دلایل ذکر شده در حالت اول با افزایش عدد ریچاردسون و همچنین در مورد عدد رینولدز با افزایش آن در صورت ثابت بودن بقیه پارامترها تراکم خطوط در نزدیکی دیواره گرم بیشتر شده و اندازه ناحیه سرد هم بزرگتر می‌شود. همچنین به‌ازای یک عدد رینولدز و عدد ریچاردسون مشخص با افزایش کسر حجمی نانوذرات، انتقال گرما بیشتر شده و تراکم خطوط هم

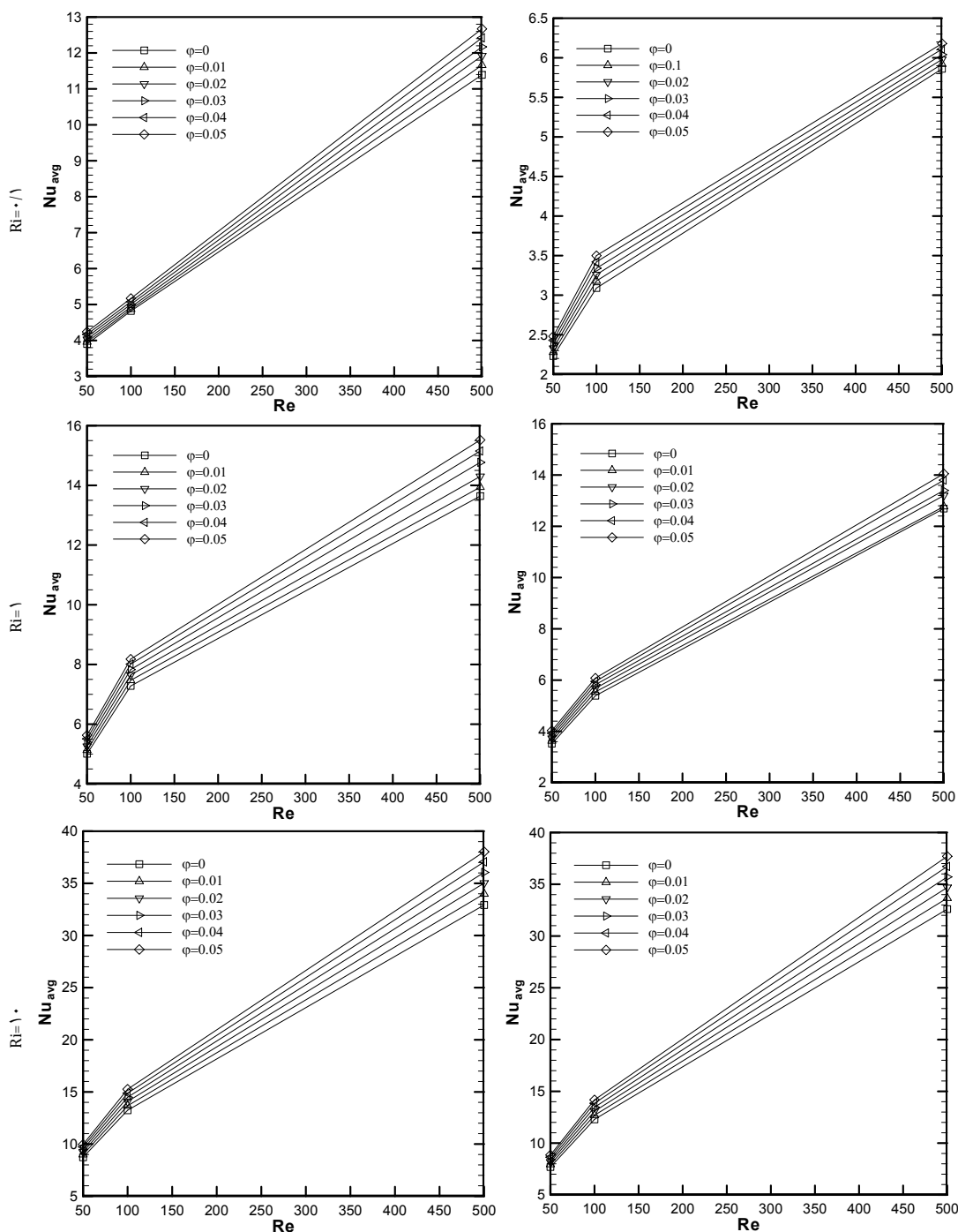


شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم برحسب کسر حجمی نانو ذرات به‌ازای رینولد و ریچاردسون‌های مختلف در حالت اول (راست) و حالت دوم (چپ)

با مقایسه نمودارهای متناظر مشخص است که میزان عدد ناسلت متوسط در حالت دوم (ستون سمت چپ) بیشتر است. زیرا در حالت دوم تراکم خطوط در نزدیکی دیواره‌های سرد و گرم بیشتر بوده و این فشردگی نشان‌دهنده جابه‌جایی قویتر می‌باشد.

در شکل (۱۰) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم برحسب عدد رینولدز به‌ازای کسر حجمی‌ها و عدد ریچاردسون‌های مختلف برای حالت اول (سمت راست) و حالت دوم (سمت چپ) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است در یک عدد ریچاردسون و کسر حجمی مشخص با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد زیرا با افزایش عدد رینولدز سرعت جریان بیشتر شده و در نتیجه جابه‌جایی قویتر می‌شود.

در شکل (۹) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم برحسب کسر حجمی نانوذرات به‌ازای اعداد رینولدز و اعداد ریچاردسون مختلف و به‌ترتیب برای حالت اول (ستون راست) و حالت دوم (ستون چپ) رسم شده‌اند. همان‌طور که از این نمودارها مشخص است در هر دو حالت با افزایش کسر حجمی نانوذرات در هر مقدار عدد ریچاردسون و عدد رینولدز عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. حضور نانوذرات منجر به افزایش هدایت گرمایی مؤثر می‌شود و از این رو انرژی بیشتری از دیوار گرم جذب می‌شود. بنابراین حضور نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت از دیوار گرم می‌شود. در عدد ریچاردسون‌های بالاتر نرخ انتقال حرارت بیشتر است و بنابراین عدد ناسلت مقادیر بالاتری را دارد.

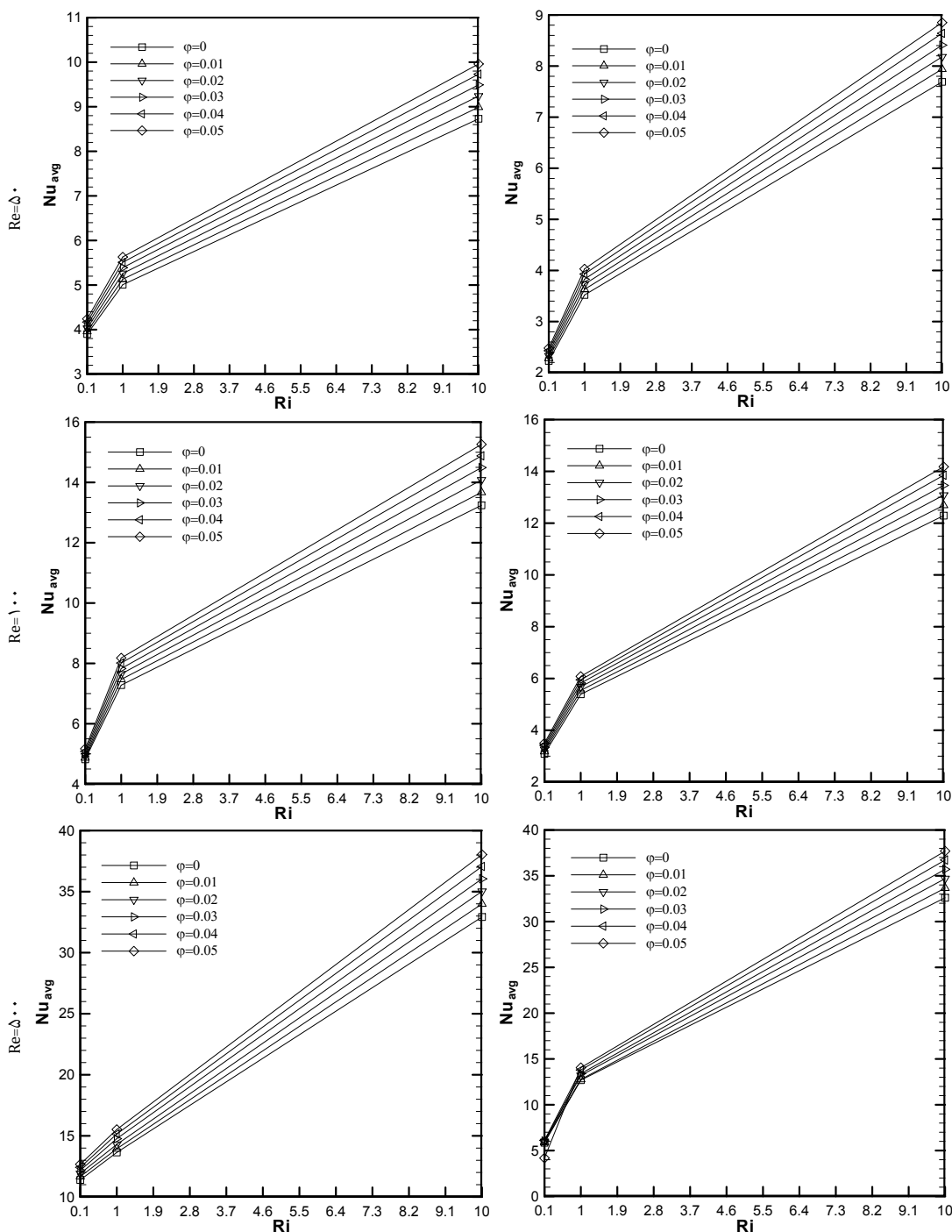


شکل ۱۰ نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم برحسب عدد رینولدز به‌ازای کسر حجمی و ریچاردسون مختلف در حالت اول (راست) و دوم (چپ)

نانوذرات به سیال باعث افزایش عدد ناسلت می‌گردد. این افزایش با افزایش درصد حجمی نانوذرات بیشتر می‌شود و با افزایش عدد ریچاردسون بیشتر می‌گردد. با توجه به اینکه افزایش عدد ریچاردسون به معنی افزایش سهم جابه‌جایی طبیعی در انتقال حرارت توام می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که در جابه‌جایی طبیعی اثر افزودن نانوذرات محسوس‌تر است. این مطلب در دیگر مراجع نیز مورد اشاره و تاکید قرار گرفته است. با افزایش عدد رینولدز عدد رینولدز افزایش می‌یابد ولی درصد افزایش عدد ناسلت ثابت و یا کاهش می‌یابد. مطلب اخیر را می‌توان به این موضوع که تاثیر نانوذرات بر عدد ناسلت در اعداد رینولدز پایین بیشتر می‌باشد ربط داد. مقایسه افزایش عدد ناسلت برای حالت اول و دوم نشان از عدم تفاوت زیاد بین دو حالت است.

شکل (۱۱) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم برحسب عدد ریچاردسون به‌ازای کسر حجمی‌ها و اعداد رینولدز مختلف برای حالت اول (ستون راست) و حالت دوم (ستون چپ) نشان داده شده‌اند. از این نمودارها می‌توان دریافت که به‌ازای یک کسر حجمی و رینولدز مشخص با افزایش عدد ریچاردسون، عدد ناسلت افزایش می‌یابد زیرا تراکم خطوط در نزدیکی دیواره گرم بیشتر شده و گرادیان دمایی افزایش یافته و در نتیجه عدد ناسلت هم افزایش می‌یابد.

مقادیر عدد ناسلت به‌صورت عددی در جداول (۴) و (۵) برای حالت اول و دوم و در جداول (۶) و (۷) درصد تغییر عدد ناسلت نسبت به سیال پایه برای حالت اول و دوم آورده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود افزودن



شکل ۱۱ نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم برحسب عدد ریچاردسون به‌ازای کسر حجمی و اعداد رینولدز مختلف در حالت اول (ستون راست) و حالت دوم (ستون چپ)

جدول ۴ مقدار عدد ناسلت برای کسر حجمی‌های مختلف در اعداد رینولدز و ریچاردسون مختلف در حالت اول

		$\phi=0$	$\phi=0/01$	$\phi=0/02$	$\phi=0/03$	$\phi=0/04$	$\phi=0/05$
$Re=50$	$Ri=0/1$	۲/۲۳	۲/۲۸	۲/۳۳	۲/۳۸	۲/۴۳	۲/۴۸
	$Ri=1$	۳/۵۲	۳/۶۳	۳/۷۳	۳/۸۳	۳/۹۳	۴/۰۳
	$Ri=10$	۷/۶۹	۷/۹۴	۸/۱۸	۸/۴۱	۸/۶۴	۸/۸۵
$Re=100$	$Ri=0/1$	۳/۰۹	۳/۱۸	۳/۲۶	۳/۳۴	۳/۴۲	۳/۵۰
	$Ri=1$	۵/۳۹	۵/۵۴	۵/۶۸	۵/۸۲	۵/۹۵	۶/۰۸
	$Ri=10$	۱۲/۲۹	۱۲/۶۹	۱۳/۰۸	۱۳/۴۶	۱۳/۸۵	۱۴/۱۸
$Re=500$	$Ri=0/1$	۵/۸۶	۵/۹۲	۵/۹۸	۶/۰۴	۶/۱۱	۶/۱۸
	$Ri=1$	۱۲/۶۹	۱۲/۷۷	۱۳/۲۰	۱۳/۴۰	۱۳/۸۰	۱۴/۰۵
	$Ri=10$	۳۲/۶۰	۳۳/۶۶	۳۴/۶۹	۳۵/۷۱	۳۶/۷۲	۳۷/۷۰

جدول ۵ مقدار عدد ناسلت برای کسر حجمی‌های مختلف در اعداد رینولدز و ریچاردسون مختلف در حالت دوم

		$\phi=0$	$\phi=0/01$	$\phi=0/02$	$\phi=0/03$	$\phi=0/04$	$\phi=0/05$
$Re=50$	$Ri=0/1$	۳/۹۰	۳/۹۶	۴/۰۳	۴/۱۰	۴/۱۷	۴/۲۴
	$Ri=1$	۵/۰۰۷	۵/۱۳	۵/۲۶	۵/۳۹	۵/۵۱	۵/۶۳
	$Ri=10$	۸/۷۳	۸/۹۹	۹/۲۴	۹/۴۹	۹/۷۳	۹/۹۶
$Re=100$	$Ri=0/1$	۴/۸۲	۴/۸۷	۴/۹۳	۵/۰۰۶	۵/۰۸	۵/۱۷
	$Ri=1$	۷/۲۸	۷/۴۷	۷/۶۵	۷/۸۳	۸/۰۱۲	۸/۱۸
	$Ri=10$	۱۳/۲۴	۱۳/۶۷	۱۴/۰۸	۱۴/۴۹	۱۴/۸۸	۱۵/۲۶
$Re=500$	$Ri=0/1$	۱۱/۳۹	۱۱/۶۶	۱۱/۹۲	۱۲/۱۷	۱۲/۴۲	۱۲/۶۷
	$Ri=1$	۱۳/۶۴	۱۳/۹۴	۱۴/۳۰	۱۴/۷۷	۱۵/۱۵	۱۵/۵۲
	$Ri=10$	۳۲/۹۲	۳۳/۹۹	۳۵/۰۲	۳۶/۰۵	۳۷/۰۶	۳۸/۰۳

جدول ۶ درصد افزایش عدد ناسلت نسبت به سیال خالص برای کسر حجمی‌های مختلف در اعداد رینولدز و ریچاردسون مختلف در حالت اول

	$Re=50$			$Re=100$			$Re=500$		
	$Ri=0/1$	$Ri=1$	$Ri=10$	$Ri=0/1$	$Ri=1$	$Ri=10$	$Ri=0/1$	$Ri=1$	$Ri=10$
$\phi=0/01$	۲/۲۵	۳/۱۳	۳/۲۶	۲/۹۲	۲/۷۹	۳/۲۶	۱/۰۳	۰/۶۴	۳/۲۶
$\phi=0/02$	۴/۴۹	۵/۹۷	۶/۳۸	۶/۴۸	۵/۳۹	۶/۴۳	۲/۰۵	۴/۰۲	۶/۴۲
$\phi=0/03$	۶/۷۳	۸/۸۱	۹/۳۷	۸/۹۰	۷/۹۸	۹/۵۲	۳/۰۸	۵/۶	۹/۵۴
$\phi=0/04$	۸/۹۷	۱۱/۶۵	۱۲/۳۶	۱۰/۶۸	۱۰/۳۹	۱۲/۷۰	۴/۲۷	۸/۷۵	۱۲/۶۴
$\phi=0/05$	۱۱/۲۲	۱۴/۴۹	۱۵/۰۹	۱۳/۲۷	۱۲/۸۱	۱۵/۳۸	۵/۴۷	۱۰/۷۲	۱۵/۶۵

جدول ۷ درصد افزایش عدد ناسلت نسبت به سیال خالص برای کسر حجمی‌های مختلف در اعداد رینولدز و ریچاردسون مختلف در حالت دوم

	$Re=50$			$Re=100$			$Re=500$		
	$Ri=0/1$	$Ri=1$	$Ri=10$	$Ri=0/1$	$Ri=1$	$Ri=10$	$Ri=0/1$	$Ri=1$	$Ri=10$
$\phi=0/01$	۱/۵۴	۲/۴۶	۲/۹۸	۱/۰۴	۲/۶۱	۳/۲۵	۲/۳۸	۲/۲۰	۳/۲۶
$\phi=0/02$	۳/۳۴	۵/۰۶	۵/۸۵	۲/۲۹	۵/۰۹	۶/۳۵	۴/۶۶	۴/۸۴	۶/۳۸
$\phi=0/03$	۵/۱۳	۷/۶۵	۸/۷۱	۳/۸۶	۷/۵۶	۹/۴۵	۶/۸۵	۸/۲۹	۹/۵۱
$\phi=0/04$	۶/۹۳	۱۰/۰۵	۱۱/۴۶	۵/۴	۱۰/۰۶	۱۲/۳۹	۹/۰۵	۱۱/۰۸	۱۲/۵۸
$\phi=0/05$	۸/۷۲	۱۲/۴۵	۱۴/۰۹	۷/۲۷	۱۲/۳۷	۱۵/۲۶	۱۱/۲۴	۱۳/۷۹	۱۵/۵۳

در حالت دوم بیشتر است.

- در هر دو حالت به‌ازای کسر حجمی و ریچاردسون‌های یکسان با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت هم افزایش می‌یابد.

- در هر دو حالت به‌ازای کسر حجمی و رینولدز یکسان با افزایش عدد ریچاردسون، مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

- به‌ازای اعداد رینولدز و ریچاردسون مختلف، اضافه کردن نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود.

۷- فهرست علائم اختصاری

c_p	ظرفیت گرمایی ویژه
Gr	عدد گرافش

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال آب-مس در یک محفظه دوزنقه‌ای با منابع حرارتی گرم و دیواره سرد روی دیواره‌های جانبی آن به‌صورت عددی بررسی شده است. برای بررسی اثر مکان درپچه ورودی و خروجی، دو حالت بررسی شد. مقایسه بین نتایج نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت در حالتی که ورودی به دیواره سرد نزدیک‌تر است بیشتر از حالتی است که ورودی به دیواره گرم نزدیک‌تر می‌باشد. سایر نتایج را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود:

- در هر دو حالت با افزایش کسر حجمی نانوذرات در هر مقدار ریچاردسون و رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

- مقدار عدد ناسلت متوسط به‌ازای رینولدز، ریچاردسون و کسر حجمی یکسان

- [3] A. Malekpour, B. Ghasemi, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid filled triangular enclosure, *Modares Journal of Mechanics Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 10-21, 2013 (in Persian)
- [4] S. Karimi, B. Ghasemi, Water alumina convection heat transfer in an inclined L shape cavity, *Modares Journal of Mechanics Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 133-144, 2013. (in Persian)
- [5] F. Talebi, A. H. Mahmoudi, M. Shahi, Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 79-90, 2010.
- [6] A. Pishkar, B. Ghasemi, Effect of nanoparticles on mixed convection in a horizontal channel with heat source, *Modares Journal of Mechanics Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 95-108, 2012. (in Persian)
- [7] B. Ghasemi, S. M. Aminossadati, Mixed convection in a lid-driven triangular enclosure filled with nanofluids, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1142-1148, 2010.
- [8] A. H. Mahmoudi, M. Shahi, F. Talebi, Effect of inlet and outlet location on the mixed convective cooling inside the ventilated cavity subjected to an external nanofluid, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1158-1173, 2010.
- [9] H. Saleh, R. Roslan, I. Hashim, Natural convection heat transfer in a nanofluid-filled trapezoidal enclosure, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 194-201, 2011.
- [10] M. Hasanuzzaman, H. F. Öztop, M. M. Rahman, N. A. Rahim, R. Saidur, Y. Varol, Magneto-hydrodynamic natural convection in trapezoidal cavities, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 1384-1394, 2012.
- [11] A. Da Silva, E. Fontana, V. C. Mariani, F. Marcondes, Numerical investigation of several physical and geometric parameters in the natural convection into trapezoidal cavities, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 6808-6818, 2012.
- [12] Y. Varol, Natural convection in divided trapezoidal cavities filled with fluid saturated porous media, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1350-1358, 2010.
- [13] I. Tmartnhad, M. El Alami, M. Najam, A. Oubarra, Numerical investigation on mixed convection flow in a trapezoidal cavity heated from below, *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 3205-3210, 2008.
- [14] J. C. A. Maxwell, *Treatise on Electricity and Magnetism*, Second Ed., Oxford, UK: Clarendon Press, 1881.
- [15] H. C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 20, pp. 571-581, 1952.
- [16] K. Khanafer, K. Vafai, A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, pp. 4410-4428, 2011.
- [17] S. M. Saeidi, J. M. Khodadadi, Forced convection in a square cavity with inlet and outlet ports, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 1896-1906, 2006.
- [18] E. Sourtiji, S. F. Hosseinizadeh, M. Gorji-Bandpy, D. D. Ganji, Heat transfer enhancement of mixed convection in a square cavity with inlet and outlet ports due to oscillation of incoming flow, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 806-814, 2011.
- [19] A. H. Mahmoudi, M. Shahi, F. Talebi, Effect of inlet and outlet location on the mixed convective cooling inside the ventilated cavity subjected to an external nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1158-1173, 2010.
- [20] M. Shahi, A. H. Mahmoudi, F. Talebi, Numerical study of mixed convective cooling in a square cavity ventilated and partially heated from the below utilizing nanofluid, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 201-213, 2010.

g	شتاب گرانشی
H	ارتفاع محفظه
k	ضریب هدایت گرمایی
Nu	عدد ناسلت
p	فشار
P	فشار بی‌بعد
Pr	عدد پرانتل
Ra	عدد رابلی
Re	عدد رینولدز
Ri	عدد ریچاردسون
T_h	دما روی دیوار گرم
T_c	دما روی دیوار سرد
u, v	مؤلفه های سرعت
U, V	مؤلفه های بی‌بعد سرعت
x, y	مختصات کارتزین
X, Y	مؤلفه های بی‌بعد کارتزین

حروف یونانی

α	بخش گرمایی
β	ضریب انبساط حجمی
Φ	کسر حجمی نانو ذرات
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ϑ	ویسکوزیته سینماتیکی
ρ	دانسیته
θ	دمای بی‌بعد

زیر نویس

f	سیال
avg	میانگین
nf	نانوسیال
0	حالت مرجع
s	جامد
wall	دیوار

۸- مراجع

- [1] K. J. Kennedy, A. Zebib, Combined free and forced convection between horizontal parallel planes: some case studies, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 26, pp. 471-474, 1983.
- [2] A. Valencia, R. L. Frederick, Heat transfer in square cavities with partially active vertical walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 1567-1574, 1998.