

ارزیابی و تخمین انتقال حرارت و مشخصه‌های جریان جابجایی ترکیبی پیرامون موانع داغ تعبیه شده در محفظه مربعی شیب‌دار پر شده از نانوسیال

سیف الله سعدالدین^۱ و محمد همت اسفه^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: نانوسیال، جابجایی ترکیبی، خواص متغیر، کسر حجمی، انتقال حرارت.</p>	<p>برای تحلیل جابجایی ترکیبی جریان سیال و انتقال حرارت در نانوسیال درون یک محفظه‌ی مربعی شکل زاویه دار که دو مانع درون آن وجود دارند، یک روش عددی حجم محدود مورد استفاده قرار گرفته است. تاثیر عدد رایلی، کسر حجمی نانوذرات و ارتفاع موانع داغ مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج به صورت نمودارهای خط جریان و نمودارهای هم دما و عدد ناسلت ارائه شده‌اند. در این تحقیق، نانو سیال آب-آلومینا با قطر نانوذرات ۴۷ نانومتر و دمای ۳۰۰ کلوین به عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده‌ی مورد استفاده برای عدد رایلی بین 10^4 و 10^5، برای کسر حجمی نانو ذرات بین ۰ تا ۰/۰۶ و برای ارتفاع مانع بین ۰/۱ تا ۰/۲ طول محفظه می‌باشد. نتایج نشان دادند که افزایش عدد رایلی و همچنین افزایش کسر حجمی نانو ذرات سبب افزایش انتقال حرارت درون محفظه می‌شود. همچنین مشخص شد که افزایش ارتفاع مانع داغ سبب کاهش مقادیر ناسلت متوسط می‌گردد.</p>

۱- مقدمه

سایز نانو به سیال است، به طوری که انتقال حرارت نانوسیال در درون محفظه‌ها و تاثیر خصوصیات ترموفیزیکی آن‌ها از قبیل رسانش حرارتی، لزجت دینامیکی و ضریب انبساط حرارتی آن‌ها مورد بحث و بررسی زیادی قرار گرفته است.

بسیاری از پژوهشگران وجوه مختلفی از خواص نانوسیال را در کاربردهای مختلف، مورد بررسی و توجه قرار داده‌اند. در سالیان اخیر با توجه به ضرورت استفاده از نانو سیالات بالاخص در زمینه بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانو سیالات درون محفظه‌ها نیز رایج گردیده و تاثیرات درصدی حجمی نانوسیال در میزان انتقال حرارت و تغییر در خطوط جریان و دما، به عنوان یکی از پارامترهای مهم مورد مطالعه قرار گرفته است.

در طی سال‌ها، از سیالات متداولی نظیر آب یا روغن به عنوان سیال عامل انتقال حرارت، در سیستم‌های صنعتی استفاده می‌شد. مشکل عمده‌ی این نوع سیالات، رسانش حرارتی کم آن‌ها می‌باشد که منجر به پایین ماندن نرخ انتقال حرارت آن‌ها می‌گردد و همین امر هدف نهایی از کاربرد این سیالات در صنعت را به چالش می‌کشد. یکی از روش‌های جدیدی که امروزه برای افزایش رسانش حرارتی این قبیل سیالات و در نتیجه‌ی آن، افزایش نرخ انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرد، افزودن ذرات در

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hemmatesfe@gmail.com

۱. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

بنابراین برای بهبود انتقال حرارت در کاربردهای یاد شده می‌توان از نانوسیال استفاده نمود.

نتایج یک مطالعه‌ی عددی در مورد جابجایی ترکیبی در یک محفظه‌ی مربعی شیب دار که با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم پر شده بود، توسط ابوندا و چامخا [۷] گزارش داده شد. آن‌ها مشاهده کردند که در حضور نانو ذرات، انتقال حرارت درون محفظه به صورت چشمگیری بهبود می‌یابد.

در یک مطالعه پژوهشی دیگر، فریدون و همکاران [۸] به بررسی عددی جابجایی ترکیبی درون یک محفظه مربعی پر شده از نانوسیال با دیواره‌های متحرک پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد انتقال حرارت درون محفظه با افزایش کسر حجمی در عدد رینولدز ثابت، افزایش می‌یابد. همچنین در کسر حجمی ثابت، افزایش عدد ریچاردسون و عدد رینولدز باعث ارتقای عملکرد حرارتی محفظه می‌گردد.

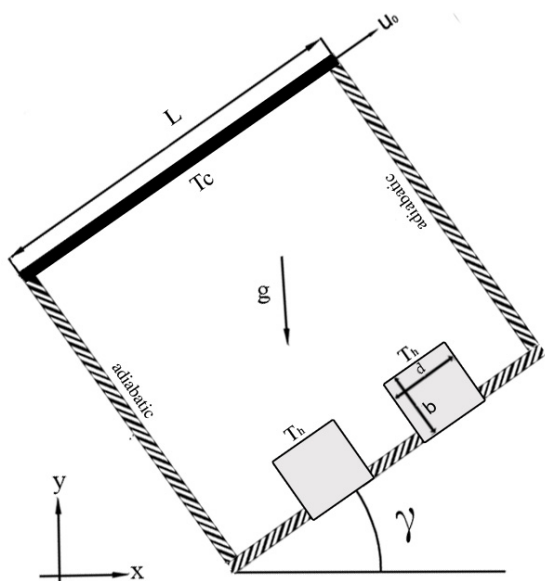
به تازگی سعدالدین و همکاران [۹] در یک شبیه سازی عددی و استفاده از فرمولاسیون خواص متغیر برای نانو سیالات، جریان و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون رادیاتور اتومبیل پر شده از نانو سیال را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و کاهش عدد ریچاردسون، انتقال حرارت درون محفظه افزایش می‌یابد.

قاسمی و امین الساداتی [۱۰] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم را داخل یک محفظه‌ی مثلثی بررسی نمودند. محفظه‌ی آن‌ها دارای یک جداره‌ی افقی عایق، یک جداره‌ی اریب داغ و یک جداره‌ی عمودی متحرک سرد بود. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانو ذرات نرخ انتقال حرارت را در تمامی اعداد ریچاردسون و تمامی جهت‌های حرکت جداره‌ی متحرک، افزایش می‌دهد. همین نتیجه را محمودی [۱۱] در بررسی‌های خود با نانوسیال مشابه ولی هندسه‌ی متفاوت بدست آورد. محفظه‌ی مستطیلی که او در نظر گرفت

هوانگ و همکاران [۱] به مطالعه انتقال حرارت در یک محفظه مستطیلی پر شده از نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم به صورت عددی پرداختند. آن‌ها از مدل‌های مختلفی برای ارزیابی ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال استفاده کردند. ون و دینگ [۲] بحث و بررسی خود را به بهبود انتقال حرارت در یک محفظه پر شده از نانو سیال اکسید تیتانیوم معطوف نمودند. مطالعه عددی دیگری بر روی جابجایی طبیعی در یک محفظه دوبعدی پر شده از نانو سیال آب/مس توسط خانافر و همکاران [۳] انجام شده است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در یک گراشف معین، نرخ انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد. مرور مفصلی در مورد خصوصیات انتقال حرارت در نانوسیالات توسط گادسونت و همکارانش [۴]، سارکار [۵] و محمد و همکارانش [۶] صورت پذیرفته است.

جابجایی ترکیبی نوعی از انتقال حرارت جابجایی است که از ترکیب جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری پدید می‌آید. در جابجایی ترکیبی عدد ریچاردسون معرف میزان تاثیرگذاری جابجایی طبیعی به جابجایی اجباری است. بر پایه میزان عدد بدون بعد ریچاردسون، مسائل مربوط به جابجایی به سه نوع تقسیم می‌شوند: ۱- جابجایی طبیعی خالص برای اعداد ریچاردسون بسیار بزرگتر از یک، ۲- جابجایی ترکیبی برای اعداد ریچاردسون بین ۰/۱ تا ۱۰ و ۳- جابجایی اجباری برای اعداد ریچاردسون بسیار کوچکتر از یک.

انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه‌ها دارای کاربردهای مختلفی از قبیل تهویه‌ی مکان‌های مختلف، تجهیزات خنک کننده‌ی الکترونیکی، کلکتورهای خورشیدی و غیره می‌باشد. این نوع انتقال حرارت به دلیل وابستگی بین نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره‌ها و نیروی شناوری ایجاد شده توسط اختلاف دما، دارای پیچیدگی‌های بسیاری است. علاوه بر آن ضریب هدایت حرارتی پایین خنک کننده‌های معمولی نظیر آب و روغن، مانعی بر سر راه انتقال حرارت در کاربردهای فوق است.



شکل ۱- شکل شماتیک محفظه شیب دار مورد مطالعه

خواص ترموفیزیکی آب در دمای ۳۰۰ کلوین و اکسید آلومینیوم در دمای مرجع در جدول ۱ آمده است. برای نیروی شناوری ایجاد شده از تغییرات چگالی از تقریب بوزینسک استفاده می‌شود. معادلات بقای جرم، مومنتوم در راستای x و y و انرژی برای حالت جابجایی ترکیبی، سیال غیرقابل تراکم بصورت معادلات (۱) الی (۴) بیان می‌شوند.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی [۸]

خواص ترموفیزیکی	فاز مایع (آب)	فاز جامد (نانوذرات آلومینا)
$C_p(\text{J/kg K})$	۴۱۷۹	۷۶۵
$\rho(\text{kg/m}^3)$	۹۹۷,۱	۳۹۷۰
$K(\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1})$	۰,۶	۲۵
$\beta \times 10^{-5} (1/\text{K})$	۲۱	۰,۸۵
$\mu \times 10^{-4} (\text{Kg/ms})$	۸,۹
قطر نانوذرات	---	۴۷

در این معادلات، جریان حالت آرام و دائم فرض شده است و شرط عدم لغزش بر روی دیواره ها برقرار است. در این تحقیق از فرمولاسیون خواص متغیر با اندازه نانوذرات ۴۰ نانومتر، نسبت قطرها ۰/۰۰۷ و دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. معادلات حاکم برای جریان تراکم ناپذیر، آرام و پایدار به صورت زیر است:

دارای یک دیواره‌ی داغ متحرک در پایین و سه دیواره‌ی سرد دیگر بود.

تاکنون هیچ بررسی و پژوهشی درباره جابجایی ترکیبی با خواص متغیر (variable properties) در محفظه شیب‌دار با دیواره متحرک پر شده از نانوسیال، با موانع داغ، صورت نگرفته است. این درحالی است که این تحقیق می‌تواند در بسیاری از کاربردهای صنعتی و مهندسی مانند صنایع روغن‌کاری، شیشه‌گری، صنایع غذایی و بسیاری از موارد دیگر، مورد استفاده و بهره‌وری قرار گیرد. با توجه به عدم وجود تحقیقات جامع در این زمینه با استفاده از نانو سیال خواص متغیر، تحقیق حاضر شکل گرفته است.

در مطالعه‌ی حاضر، جریان جابجایی ترکیبی برای نانو سیال اکسید آلومینیوم/ آب و در نظر گرفتن خواص متغیر برای آن درون یک محفظه‌ی مربعی شکل زاویه دار با دو مانع داغ درون آن به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهایی نظیر عدد رایلی، شیب محفظه مربعی، نسبت منظر موانع و تغییرات کسر حجمی نانو ذرات مطالعه گردیده و نتایج در قالب نمودارهای مختلف ارائه گردیده اند.

۲- مدل‌سازی فیزیکی و فرمولاسیون

مساله

نمایی از محفظه شیب‌دار مدل‌سازی شده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. در این محفظه دیواره‌های جانبی و دیواره پایینی آدیاباتیک فرض شده است، در حالی که دیواره فوقانی در دمای پایین در نظر گرفته شده است. دو مانع مربعی داغ به طول d و ارتفاع b نیز درون محفظه و بر روی دیواره تحتانی قرار گرفته است. لازم به ذکر است دیواره فوقانی سرد با سرعت ثابت U_0 به سمت راست حرکت می‌کند. محفظه از نانوسیال آب/آلومینا پر شده است که این نانوذرات به شکل کروی و با اندازه ۴۷ نانومتر مدل‌سازی شده‌اند.

ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی:

در نانو سیالات ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی از روابط زیر محاسبه می شوند:

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

$$(\rho\beta)_{nf} = \varphi(\rho\beta)_s + (1 - \varphi)(\rho\beta)_f \quad (14)$$

ویسکوزیته:

در این تحقیق ویسکوزیته موثر نانو سیال از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 + 2.5\varphi) \left[1 + \eta \left(\frac{d_p}{L} \right)^{-2.6} \varphi^{2/3} (\varepsilon + 1) \right] \quad (15)$$

این مدل معتبر توسط جانگ و همکاران [۱۲] برای سیال پایه خالص دارای ذرات نانو کروی شکل (نانوسیالات) ارائه شده است. برای نانو سیال آب/اکسید آلومینیوم، ثابت تجربی ε و η به ترتیب برابر ۰/۲۵- و ۲۸۰ می باشد.

ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه با رابطه پیشنهاد شده توسط ابوندا و همکاران [۱۳] تخمین زده شده است. نکته مهم در این رابطه تغییر ویسکوزیته سیال پایه (آب) با دما می باشد. از رابطه زیر برای محاسبه ویسکوزیته آب استفاده می شود:

$$\mu_{H_2O} = (1.2723 \times T_{rc}^5 - 8.736 \times T_{rc}^4 + 33.708 \times T_{rc}^3 - 246.6 \times T_{rc}^2 + 518.78 \times T_{rc} + 1153.9) \times 10^6 \quad (16)$$

$$Trc = \text{Log}(T - 273)$$

ضریب هدایت حرارتی ساکن بدون بعد:

ضریب هدایت حرارتی نانو ذرات در سیال در حالت سکون از رابطه معروف به همیلتون و کروسر [۱۴] حاصل می شود:

$$\frac{k_{stationary}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} \quad (17)$$

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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_{nf} \nabla^2 u, \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{nf} \nabla^2 v + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g \Delta T, \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \nabla^2 T. \quad (4)$$

پارامترهای بدون بعد عبارتند از:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad V = \frac{v}{u_0}, \quad U = \frac{u}{u_0} \quad (5)$$

$$\Delta T = T_h - T_c, \quad \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, \quad P = \frac{p}{\rho_{nf} u_0^2}$$

$$Re = \frac{\rho_f u_0 L}{\mu_f}, \quad Ri = \frac{Ra}{Pr \cdot Re^2}, \quad (6)$$

$$Ra = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f \alpha_f}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}$$

فرم بدون بعد معادلات حاکم ۱ تا ۴ بدین صورت است:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (7)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 U \quad (8)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 V + \frac{Ri}{Pr} \frac{\beta_{nf}}{\beta_f} \Delta \theta \quad (9)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \nabla^2 \theta \quad (10)$$

ضریب پخش حرارتی و چگالی موثر نانوسیال:

ضریب پخش حرارتی و چگالی موثر نانوسیال عبارتند از:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (11)$$

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_s + (1 - \varphi) \rho_f \quad (12)$$

$$Nu = \frac{hL}{k_f} \quad (21)$$

که در آن ضریب جابجایی حرارتی h و ضریب هدایت حرارتی از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$h = \frac{q_w}{T_h - T_c} \quad (22)$$

$$k_{nf} = \frac{-q_w}{\partial T / \partial X} \quad (23)$$

با قراردادن معادلات ۲۲ و ۲۳ در معادله ۲۱، عدد ناسلت برای دیواره داغ سمت چپ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$NU = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (24)$$

مقدار عدد ناسلت متوسط هم از معادله ۲۵ به دست می آید:

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L NudY \quad (25)$$

۳- روش عددی و معتبر سازی نتایج:

در تحقیق حاضر، محاسبات با استفاده از کد کامپیوتری فرتن انجام شده است. معادلات پیوستگی، ممنوم و انرژی به همراه شرایط مرزی، بوسیله روش حجم محدود با سیستم شبکه جابجاشده به صورت عددی حل شده اند. برنامه کامپیوتری بر اساس الگوریتم سیمپلر به حل همزمان معادلات انفصال می پردازد.

رابطه جابجایی با استفاده از طرح هیبریدی که تلفیقی از طرح های تفاضل مرکزی و طرح پیشرو است تقریب زده می شود. در تحقیق حاضر، معیار همگرایی بر روی مقدار خطای نسبی تکرارهای متوالی مقادیر به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$Error = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\zeta^{t+1} - \zeta^t|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\zeta^{t+1}|} \leq 10^{-7} \quad (26)$$

ضریب هدایت حرارتی کلی بدون بعد نانو سیال:

این مدل برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی توسط زو و همکاران [۱۵] پیشنهاد گردیده است. رابطه دوم این معادله ضریب هدایت حرارتی بر پایه جابجایی حرارتی ناشی از حرکت براونی می باشد.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_{stationary}}{k_f} + \frac{k_c}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\varphi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \varphi(k_f - k_s)} + c \frac{Nu_p d_f (2 - D_f) D_f \left[\left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{1-D_f} - 1 \right]^2}{Pr(1 - D_f)^2 \left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{2-D_f} - 1} \frac{1}{d_p} \quad (18)$$

c یک ثابت تجربی است که در ارتباط با لایه مرزی حرارتی و نوع سیال پایه بوده (مثلا برای آب دیونیزه برابر ۸۵ و برای اتیلن گلیکول ۲۸۰ می باشد). ولی مستقل از نوع نانوذرات می باشد. Nu_p عدد ناسلت برای سیال در حال گردش در اطراف نانوذرات کروی است و در این مطالعه برابر با ۲ در نظر گرفته می شود.

در مطالعه حاضر قطر ملکولی سیال برای آب برابر $d_f = 4.5 \times 10^{-10} m$ است. میزان بعد فراکتالی D_f نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Df = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \left(\frac{d_{p,min}}{d_{p,max}} \right)} \quad (19)$$

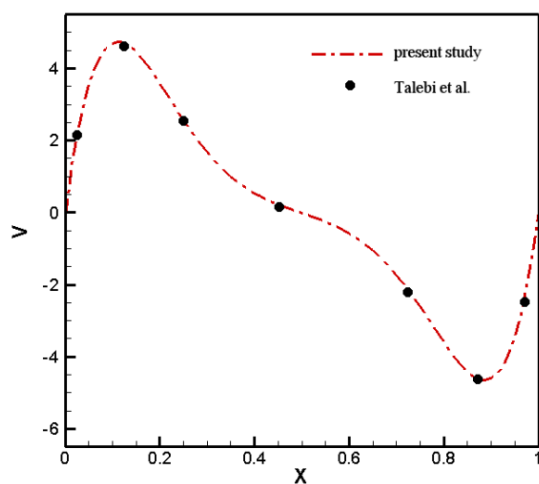
که در آن $d_{p,min}$ و $d_{p,max}$ اندازه قطرهای بیشینه و کمینه نانوذرات معلق در سیال هستند. اندازه گیری نسبت این قطرها به وسیله قطر میانگین نانوذرات و روابط زیر صورت می گیرد. نسبت $d_{p,min}/d_{p,max}$ با R به عنوان توزیع فراکتالی نشان داده شده است.

$$d_{p,max} = d_p \cdot \frac{D_f - 1}{D_f} \left(\frac{d_{p,min}}{d_{p,max}} \right)^{-1} \quad (20)$$

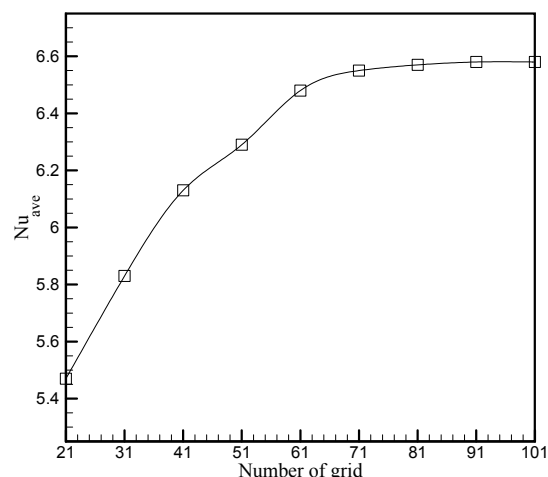
$$d_{p,min} = d_p \cdot \frac{D_f - 1}{D_f}$$

عدد ناسلت:

و آنالیز یک محفظه ساده پر شده با سیال پایه با $Pr = 0.7$ در رابلی های مختلف می پردازیم. جدول ۲ بیانگر مقایسه میان نتایج حاصله از کار حاضر با سایر پژوهش‌هایی است که در منابع مختلف آمده است. ارزیابی میزان ناسلت به دست آمده، نشان دهنده انطباق و همخوانی بسیار مطلوب میان کد مورد استفاده در این تحقیق و سایر مراجع است. همچنین برای اطمینان بیشتر، روش عددی پیشنهادی در این پژوهش، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی دیگری که توسط طالبی و همکاران [۱۹] صورت پذیرفته، اعتبار سنجی شده است. نتایج این اعتبار سنجی در شکل ۳ قابل مشاهده است. واضح است که کد حاضر تطبیق فوق العاده‌ای را با نتایج مطالعه مذکور نشان می‌دهد.



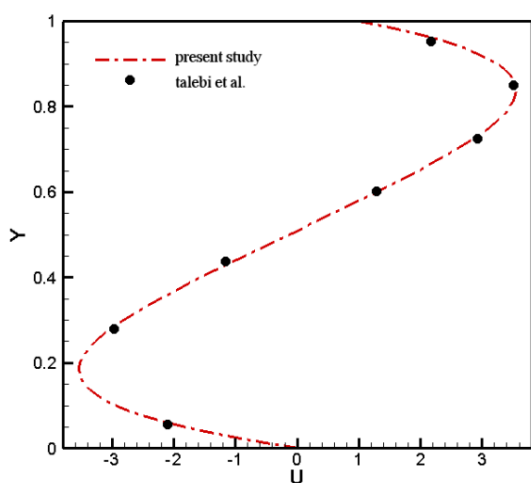
که در این فرمول M و N نشان دهنده تعداد نقاط شبکه در جهت x و y بوده و n نشان دهنده تعداد تکرارهاست. به منظور دستیابی به استقلال شبکه، روش عددی برای ۹ اندازه شبکه مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. برای هر یک از این حالات، ناسلت متوسط برای دیواره داغ در $Re=10$, $Ra=10^5$, $b=0.1$ و $\gamma = 30^\circ$ به دست آمده و در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲- ارزیابی استقلال شبکه در اندازه شبکه های مختلف

همان‌گونه که در شکل مشخص است، شبکه نقاط 81×81 ، با توجه به دقت قابل قبول نتایج از یکسو و افزایش شدید زمان حل برنامه کامپیوتری با افزایش تعداد نقاط شبکه از سوی دیگر برای حل مساله انتخاب شده است.

برای اطمینان از صحت نتایج برنامه کامپیوتری به حل عددی مساله انتقال حرارت جابجایی آزاد هوا در یک محفظه مربع شکل با دیواره متحرک داغ در بالا و دیواره سرد در پایین می‌پردازیم. این مساله توسط محققین بسیاری از جمله لین و همکاران [۱۶]، تیواری و داس [۱۷] و هادجی سوفکلوس و همکاران [۱۸] حل شده است. مقایسه میان میزان عدد ناسلت متوسط تحقیق حاضر و سایر تحقیقات در جدول ۲ آورده شده است. این نتایج، انطباق مناسبی را میان نتایج کد حاضر با سایر مراجع گزارش شده نشان می‌دهند.



شکل ۳- مقایسه میان تحقیق حاضر و نتایج طالبی و همکاران [۱۹] در $Re=1$, $Ra=1.47 \times 10^4$, $\varphi = 0.03$

به منظور اعتبار سنجی و تحقیق صحت و دقت کد کامپیوتری مورد استفاده در این مدل‌سازی، به حل عددی

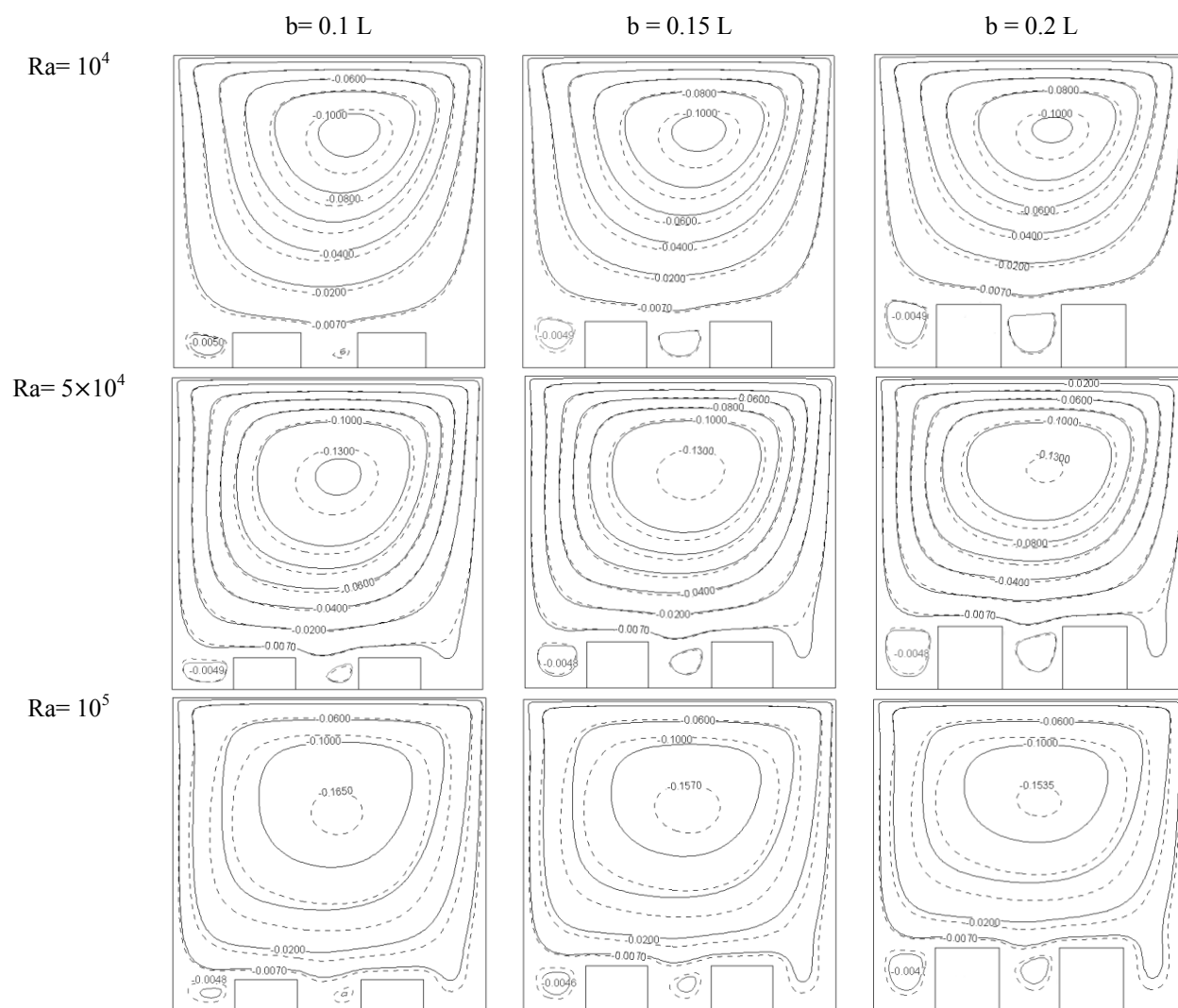
جدول ۲- مقایسه نتایج مطالعه حاضر و سایر تحقیقات صورت گرفته

	تحقیق حاضر	لین و همکاران (۲۰۱۰)	تیواری و داس (۲۰۰۷)	هادجی سوفکلوس و همکاران (۱۹۹۸)
(b) $Ra = 10^4$				
u_{max}	۱۶,۰۵۲	۱۶,۱۵۸	۱۶,۱۴۳۹	۱۵,۹۹۵
Y	۰,۸۱۷	۰,۸۱۹	۰,۸۲۲	۰,۸۱۴
v_{max}	۱۹,۵۲۸	۱۹,۶۴۸	۱۹,۶۶۵	۱۸,۸۹۴
X	۰,۱۱۰	۰,۱۱۲	۰,۱۱۰	۰,۱۰۳
Nu_{ave}	۲,۲۱۵	۲,۲۴۳	۲,۱۹۵	۲,۲۹
(c) $Ra = 10^5$				
u_{max}	۳۶,۸۱۲	۳۶,۷۳۲	۳۴,۳۰	۳۷,۱۴۴
Y	۰,۸۵۶	۰,۸۵۸	۰,۸۵۶	۰,۸۵۵
v_{max}	۶۸,۷۹۱	۶۸,۲۸۸	۶۸,۷۶۴۶	۶۸,۹۱
X	۰,۰۶۲	۰,۰۶۳	۰,۰۵۹۳۵	۰,۰۶۱
Nu_{ave}	۴,۵۱۷	۴,۵۱۱	۴,۴۵۰	۴,۹۶۴
(d) $Ra = 10^6$				
u_{max}	۶۶,۴۴۵	۶۶,۴۶۹۸	۶۵,۵۸۶۶	۶۶,۴۲
Y	۰,۸۷۳	۰,۸۶۸۵۱	۰,۸۳۹	۰,۸۹۷
v_{max}	۲۲۱,۷۴۸	۲۲۲,۳۳۹۹	۲۱۹,۷۳۶۱	۲۲۶,۴
X	۰,۰۳۹۸	۰,۰۳۸۰۴	۰,۰۴۲۳۷	۰,۰۲۰۶
Nu_{ave}	۸,۷۹۵	۸,۷۵۷۹۳۳	۸,۸۰۳	۱۰,۳۹

۴- تحلیل و بررسی نتایج

اشغال نموده است. دو گردابه کوچک نیز در فضای بین دو مانع و در فاصله میان مانع و دیواره سمت چپ پدید می‌آید. افزوده شدن ارتفاع موانع داغ تاثیر چندانی در شکل و اندازه گردابه درون محفظه ندارد. وجود ذرات نانو در سیال نیز تنها شدت و اندازه گردابه را اندکی افزایش می‌دهد در حالی که تغییری در الگوی جریان ایجاد نمی‌کند. با افزایش عدد رایلی، قدرت گردابه مرکزی به دلیل افزایش نیروی شناوری و همراستایی آن با نیروی برشی، افزایش یافته و کل محفظه توسط این گردابه اشغال شده است. وجود نانو سیال در این محدوده پارامترها نیز باعث تغییر در الگوی جریان نمی‌گردد و تنها قدرت گردابه را افزایش می‌دهد.

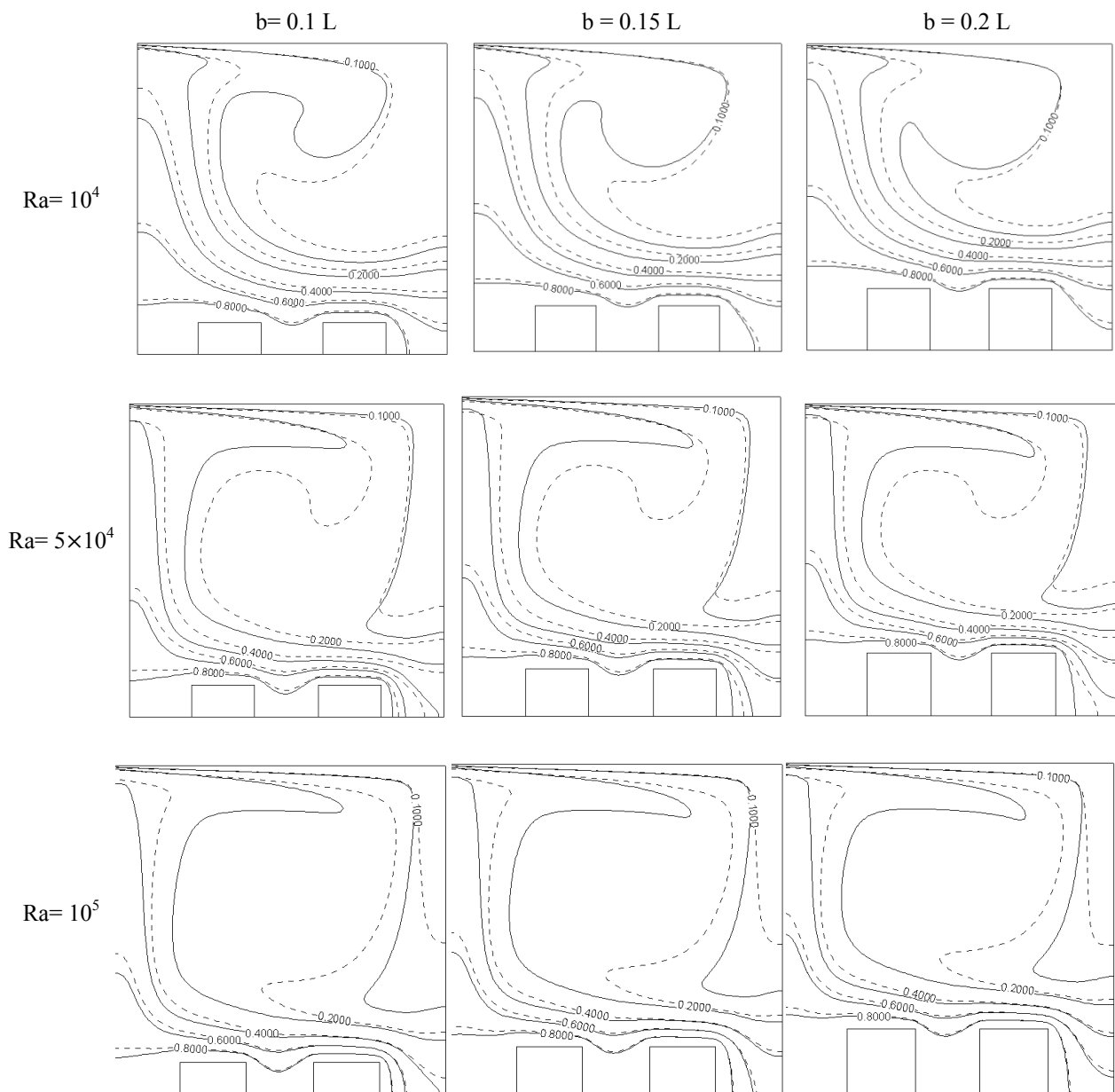
در این نوشتار، انتقال حرارت و جریان جابجایی ترکیبی درون محفظه شیب‌دار پر شده از نانو سیال به همراه دو مانع داغ مربعی مورد مطالعه قرار گرفته است. شکل ۴ تغییرات خطوط جریان را در ارتفاع های مختلف موانع داغ و رایلی های مختلف در رینولدز ۵۰ و حالت افقی استقرار محفظه نشان می‌دهد. خطوط جریان مربوط به سیال پایه با خط ممتد و خطوط مربوط به نانو سیال با کسر حجمی ۶ درصد با خط چین نشان داده شده است. در $Ra = 10^4$ الگوی جریان نشان‌دهنده تشکیل یک گردابه مرکزی ساعتگرد متقارن به وسیله نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره و نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما می‌باشد. این گردابه تقریباً تمامی فضای محفظه را



شکل ۴- تغییرات خطوط جریان را در ارتفاع‌های مختلف موانع داغ و رایلی‌های مختلف در رینولدز ۵۰ و حالت افقی استقرار محفظه

خطوط جریان برای اعداد رایلی و زوایای شیب مختلف در $Re = 10$ و $b = 0.15 L$ در شکل ۶ نشان داده شده است. با افزایش شیب محفظه، نیروی شناوری و برشی که در حالت افقی در یک راستا و هم جهت با یکدیگر عمل می‌کردند، در جهت مقابل هم عمل می‌کنند. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص می‌باشد، در حالت افقی قرارگیری محفظه، یک گردابه اصلی در محفظه به وجود آمده است، درحالی که با افزایش زاویه در $RA = 10^4$ ، این گردابه به دو گردابه مجزا می‌شکند که یکی در قسمت فوقانی و دیگری در قسمت تحتانی محفظه واقع شده است. گردابه فوقانی در محفظه تحت تاثیر نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره و گردابه تحتانی ناشی از نیروی شناوری می‌باشد.

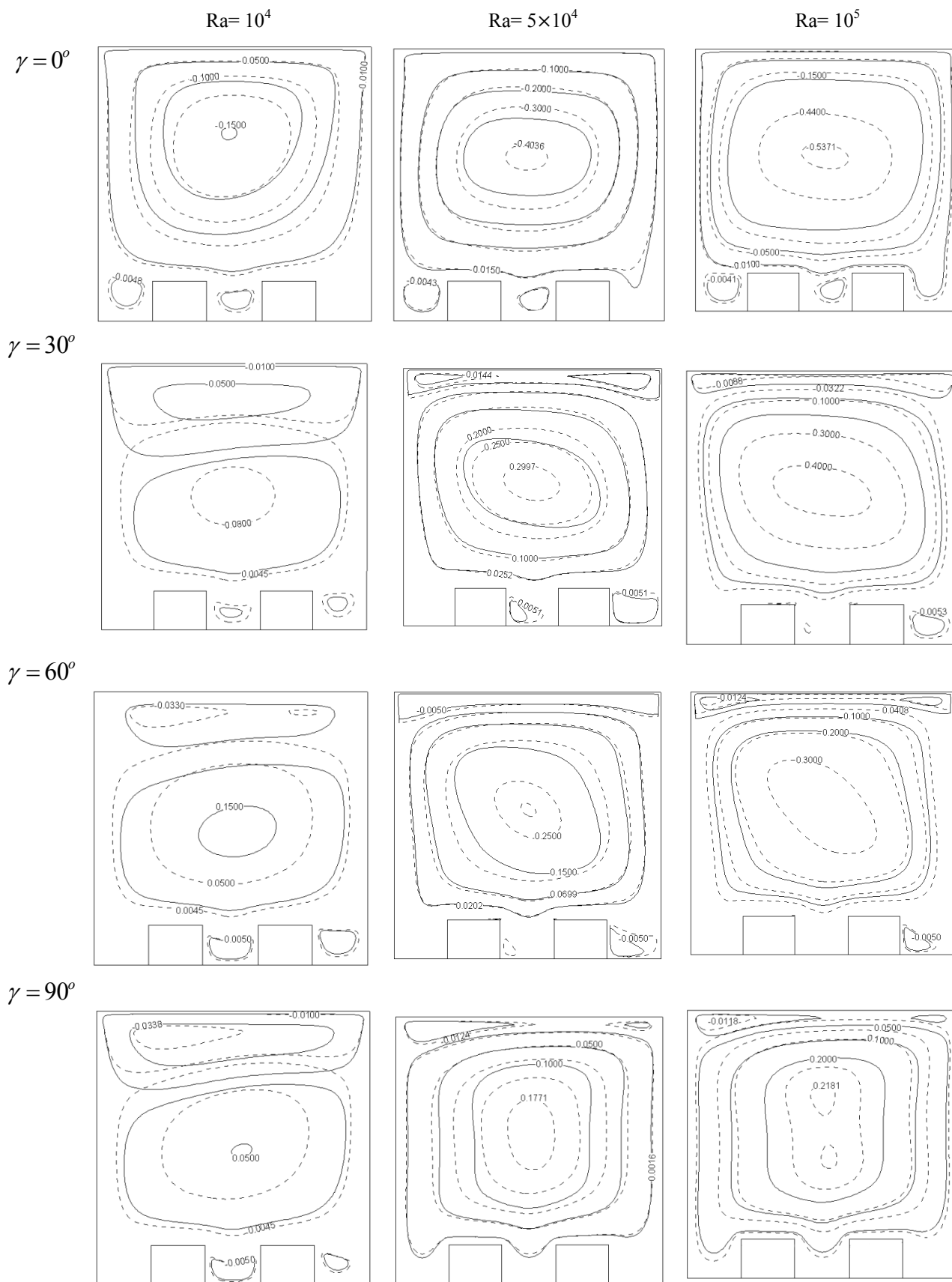
شکل ۵ خطوط دمایی متناظر با خطوط جریان در شکل ۴ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این اشکال مشخص است با افزایش رایلی، خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره‌های موانع متراکم شده و گرادیان دما افزایش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود با افزایش رایلی میزان انتقال حرارت افزایش یابد. از سوی دیگر تراکم خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره‌های غیر آدیاباتیک در سیال پایه بیشتر از نانو سیال است که این مسئله به علت افزایش هدایت حرارتی نانو سیال نسبت به سیال پایه می‌باشد. افزایش ارتفاع موانع داغ نیز، باعث باز شدن خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره‌های داغ می‌شود که این عدم تراکم نمایان‌گر کاهش گرادیان دما می‌باشد.



شکل ۵- خطوط دمای متناظر با خطوط جریان در شکل ۴

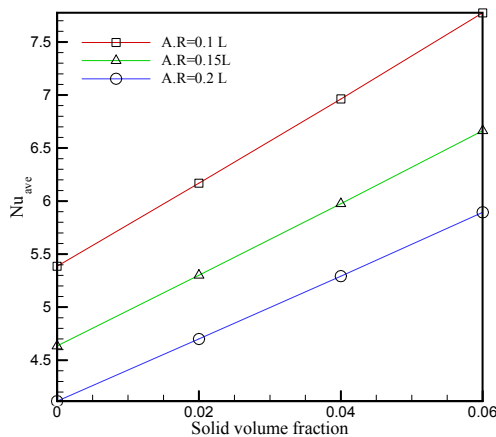
موضوع به دلیل تاثیر پذیری نانو سیال از نیروی شناوری نسبت به نیروی برشی اتفاق می افتد. در $Ra=5 \times 10^4$ و $Ra=10^5$ نیز وجود نانوسیال در زوایای مختلف گردابه‌ی زیرین را تقویت نموده و باعث ضعیف شدن گردابه فوقانی در مقایسه با سیال پایه می گردد. ضعیف و کوچک شدن گردابه فوقانی در برخی حالات نیز منجر به تقسیم این گردابه، به دو گردابه بسیار کوچک می شود.

در تمامی شیب‌های مورد بررسی، با افزایش رایلی، گردابه پایینی رشد کرده و گردابه فوقانی ضعیف تر می شود. علت این مسئله، تقویت نیروی شناوری در مقابل نیروی برشی موجود در محفظه می باشد. تاثیر وجود نانوسیال بر الگوی جریان را می توان به روشنی در خطوط جریان تمامی شیب‌های مورد بررسی، مشاهده نمود. در $Ra=10^4$ وجود نانوسیال نسبت به سیال پایه، باعث رشد گردابه زیرین شده و در مقابل گردابه فوقانی را ضعیف نموده است. این

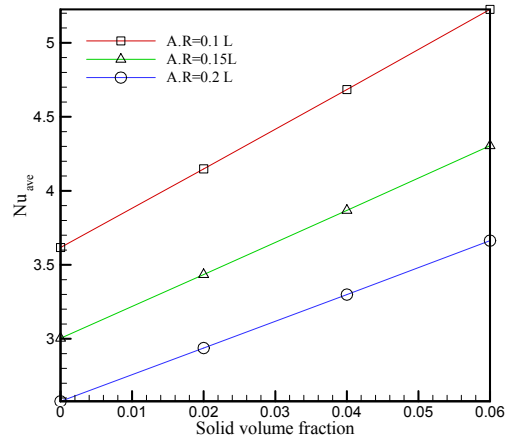


شکل ۶- خطوط جریان برای زاویه‌های شیب مختلف در $Re = 10$ و $b = 0.15 L$

اصلی ساعتگرد وجود دارد که جهت ساعتگرد گردش این گردابه باعث افزایش میزان انتقال حرارت مانع سمت راست نسبت به مانع سمت چپ می‌شود. افزایش کسر حجمی نانوذرات معلق در سیال و همچنین کاهش ارتفاع مانع، باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و در نتیجه انتقال حرارت می‌گردد.



تغییرات ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی برای ارتفاع‌های مختلف مانع مربعی در $Re=50$ و $Ra=10^4$ و $\gamma=0^\circ$ به صورت مجزا برای مانع سمت چپ و راست در شکل ۷ نشان داده شده است. در این نمودارها مشاهده می‌شود، انتقال حرارت در مانع سمت راست از مانع سمت چپ بیشتر است. همان‌طور که پیشتر در شکل ۴ نشان داده شد، در این محدوده پارامترها، در محفظه یک گردابه



شکل ۷- تغییرات ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی برای ارتفاع‌های مختلف مانع مربعی در $Re=50$ و $Ra=10^4$ و $\gamma=0^\circ$

۲- افزایش کسر حجمی در اعداد رایلی مختلف، باعث افزایش انتقال حرارت میان هر دو مانع و نانو سیال می‌گردد.

۳- با توجه به تعداد و جهت گردابه‌های ایجادشده در محفظه، شدت انتقال حرارت مانع سمت راست و چپ تغییر می‌کند.

۴- افزایش عدد رایلی موجب افزایش انتقال حرارت در محفظه می‌شود؛ که نسبت این افزایش در کسرهای حجمی بالاتر بسیار بیشتر از کسرهای حجمی پایین تر است.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، انتقال حرارت و جریان جابجایی ترکیبی درون محفظه شیب‌دار پر شده از نانو سیال به همراه دو مانع داغ مربعی به صورت عددی شبیه سازی و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. موارد زیر به عنوان نتایج این تحقیق ذکر می‌گردد:

۱- افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش عدد ناسلت و انتقال حرارت در تمامی پارامترهای مورد مطالعه این تحقیق می‌شود.

مراجع

- [1] Hwang, K.S., Lee, J.H., Jang S.P. (2007). "Buoyancy-driven heat transfer of water-based Al_2O_3 nanofluids in a rectangular cavity". International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 4003-4010.

- [2] Wen, D., Ding, Y. (2006). "Natural convective heat transfer of suspensions of titanium dioxide nanoparticles (nanofluids)". *IEEE Transport Nanotechnology*, Vol. 5, pp. 220–227.
- [3] Khanafer, K., Vafai, K., Lightstone, M. (2003). "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3639–3653.
- [4] Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., Wongwises, S. (2010). "Enhancement of heat transfer using nanofluids-An overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 629–641.
- [5] Sarkar, J. (2011). "A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 3271–3277.
- [6] Mohammed H.A., Bhaskaran G., Shuaib N.H., Saidur R. (2011). "Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 1502–1512.
- [7] Abu-Nada, E., & Chamkha, A.J. (2010). "Mixed convection flow in a lid driven square enclosure filled with a nanofluid". *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 29, pp. 472–482.
- [8] Fereidoon, A., Saedodin, S., Hemmat Esfe, M., Noroozi, M.J. (2013). "Evaluation of mixed convection in inclined square lid driven cavity filled with Al_2O_3 /water nanofluid". *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 55–65.
- [9] Sadodin, S., Hemmat Esfe, M., Noroozi, M.J. (2011). "Numerical simulation of mixed convection of fluid flow and heat transfer within car radiator with an inside obstacle filled with nanofluid". *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 9, No. 25, pp. 33–46.
- [10] Ghasemi, B., Aminossadati, S.M. (2010). "Mixed convection in a lid-driven triangular enclosure filled with nanofluids". *International Communications in Heat and Mass Transfer*. Vol. 37, pp. 1142–1148.
- [11] Mahmoodi, M. (2011). "Mixed convection inside nanofluid filled rectangular enclosures with moving bottom wall". *Thermal Science*, Vol. 15, pp. 889–903.
- [12] Jang, S.P., Lee, J.H., Hwang, K.S., Choi, S.U.S. (2007). "Particle concentration and tube size dependence of viscosities of Al_2O_3 -water nanofluids flowing through micro- and minitubes". *Applied Physics Letters*, Vol. 91, pp. 24–31.
- [13] Abu-Nada, E., Masoud, Z., Oztop, H.F., Compo, A. (2010). "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 479–491.
- [14] Hamilton, R.L., Crosser, O.K. (1962). "Thermal conductivity of heterogeneous two component systems". *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1, pp. 187–191.
- [15] Xu, J., Yu, B., Zou, M., Xu, P. (2006). "A new model for heat conduction of nanofluids based on fractal distributions of nanoparticles". *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 39, pp. 4486–4490.
- [16] Lin, K.C., Violi, A. (2010). "Natural convection heat transfer of nanofluids in a vertical cavity: Effects of non-uniform particle diameter and temperature on thermal conductivity". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, pp. 236–245.
- [17] Tiwari, R.K., Das, M.K. (2007). "Heat transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2002–2018.
- [18] Hadjisophocleous, G.V., Sousa, A.C.M., Venart, J.E.S. (1998). "Prediction of transient natural convection in enclosures of arbitrary geometry using a nonorthogonal numerical model". *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 373–392.
- [19] Talebi F., Mahmoudi A.H., Shahi M., (2010). "Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*". Vol. 37, pp. 79–90.