

مطالعه عددی جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه مربعی با

سقف متحرک و موانع گرم

محمد مهدی دوستدار^۱ و میرکاظم یکانی^۲

دانشگاه جامع امام حسین^(ع)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۴/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۸/۲۰)

چکیده

برای تحلیل جابه‌جایی ترکیبی جریان سیال و انتقال حرارت در نانوسیال درون یک محفظه مربعی شکل زاویه‌دار که دو مانع درون آن وجود دارند، یک روش عددی حجم‌محدود مورد استفاده قرار گرفته است. تاثیر عدد رایلی، کسر حجمی نانوذرات و ارتفاع موانع داغ مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج به‌صورت نمودارهای خط جریان، نمودارهای هم‌دما و عدد ناسلت ارائه شده‌اند. در این تحقیق، نانوسیال آب- آلومینا با قطر نانوذرات ۴۰ نانومتر و دمای ۳۰۰ کلوین به‌عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گرفته است. محدوده مورد استفاده برای عدد رایلی بین 10^4 و 10^5 ، برای کسر حجمی نانوذرات 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 نانوذرات سبب افزایش انتقال حرارت درون محفظه می‌شود. همچنین مشخص شد که افزایش ارتفاع مانع داغ سبب کاهش مقادیر ناسلت متوسط می‌گردد. در ضمن برای اعتبار دهی نتایج از مقایسه نتایج تجربی منتشر شده استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: نانو سیال، حل عددی، محفظه، جابه‌جایی ترکیبی

Numerical Study of Mixed Convection of Nano Fluid in a Lid-Driven Cavity Containing Hot Obstacles

M.M. Doustdar and M.K. Yekani

Imam Hossein University

(Received: 19/July/2013; Accepted: 11/November/2013)

ABSTRACT

A finite volume method is used to numerically study the mixed convection of aluminum oxide-water Nano fluid inside a square cavity containing hot quadrilaterals obstacles on its bottom wall. The effects of Rayleigh number, volume fraction of Nano particles and the height of hot obstacles are investigated. The results are shown through streamlines and isotherm curves as well as Nusselt number. The average size of Nano particles and the temperature of Nano fluid are 40 nm and 300 K respectively. The applied rang of Rayleigh number is between 10^4 and 10^5 , for volume fraction of Nano particles between 0 and 0.06, and for height of obstacles between 0.1 and 0.2 of the height of cavity. The results show that the increase of Rayleigh number as well as volume fraction of Nano particles will increase the heat transfer inside the cavity. Furthermore, the increase of the height of obstacles reduces the average Nusselt number. A comparison with experiments was made to validate the results.

Keywords : Nano Fluids, Numerical Study, Cavity, Mixed Convection

۱- دانشیار(نویسنده پاسخگو): mdostdar@ihu.ac.ir

۲- کارشناسی ارشد

فهرست علائم و اختصارات

C_p گرمای مخصوص در فشار ثابت ($J kg^{-1} K^{-1}$)	Nu عدد ناسلت
g شتاب جاذبه (ms^{-2})	pr عدد پرائتل
h ضریب انتقال گرما جابه‌جایی ($W m^{-2} K^{-1}$)	Ra عدد رابلی
L طول (m)	Re عدد رینولدز
k ضریب هدایت گرمایی ($W m^{-1} K^{-1}$)	Ri عدد ریچاردسون
p فشار با بعد ($N m^{-2}$)	علائم یونانی
P فشار بدون بعد	α ضریب نفوذ گرمایی ($m^2 s^{-1}$)
T دما (K)	β ضریب انبساط گرمایی (K^{-1})
Q گرما	θ دمای بدون بعد
u, v سرعت با بعد ($m s^{-1}$)	μ لزجت دینامیکی ($kg m^{-1} s^{-1}$)
U, V سرعت بدون بعد	ν لزجت سینماتیکی ($m^2 s^{-1}$)
U_0 سرعت دریچه	ρ ($kg m^{-3}$)
x, y مختصات با بعد (m)	
X, Y مختصات بدون بعد	
Gr عدد گرافش	

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

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

انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در محفظه‌ها دارای کاربردهای مختلفی از قبیل تهویه‌ی مکان‌های مختلف، تجهیزات خنک‌کننده‌ی 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 خنک‌کننده‌های معمولی نظیر آب و روغن، مانعی بر سر راه انتقال حرارت در کاربردهای فوق است. بنابراین برای بهبود انتقال حرارت در کاربردهای یاد شده می‌توان از نانوسیال استفاده نمود.

نتایج یک مطالعه‌ی عددی در مورد جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه‌ی مربعی شیب‌دار که با نانوسیال

۱- مقدمه

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

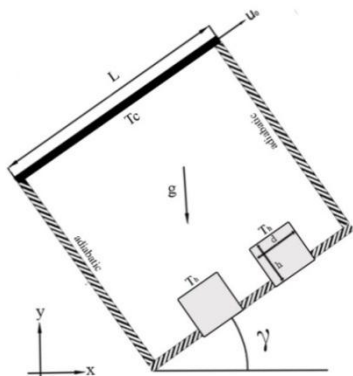
بسیاری از پژوهشگران وجوه مختلفی از خواص نانوسیال را در کاربردهای مختلف مورد بررسی و توجه قرار داده‌اند. در سال‌های اخیر با توجه به ضرورت استفاده از نانوسیالات بالاخص در زمینه بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانوسیالات درون محفظه‌ها نیز رایج گردیده و تاثیر درصد حجمی نانوسیال در میزان انتقال حرارت و تغییر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

1- Hwang
2- Wen and Ding
3- Godson
4- Sarkar

تغییرات کسر حجمی نانوذرات مطالعه شده و نتایج در قالب نمودارهای مختلف ارائه گردیده‌اند.

۲- مدل سازی فیزیکی و فرمولاسیون مساله

نمایی از محفظه شیب دار مدل سازی شده در این تحقیق در شکل ۱ نشان داده شده است. در این محفظه دیواره‌های جانبی و دیواره‌ی پایینی آدیاباتیک و دیواره‌ی فوقانی در دمای پایین در نظر گرفته شده است. دو مانع مربعی داغ به طول d و ارتفاع h نیز درون محفظه و بر روی دیواره تحتانی قرار گرفته‌اند. 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 ۴۰ نانومتر مدل سازی گردیده‌اند.



شکل (۱): شماتیک محفظه شیب دار مورد مطالعه.

خواص ترموفیزیکی آب 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، مومنوم در راستای X و Y و انرژی برای حالت جابه‌جایی ترکیبی، سیال غیرقابل تراکم به صورت معادلات (۱) الی (۴) بیان می‌شوند. در این معادلات، جریان در حالت آرام و دائم فرض شده و شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها برقرار است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی آب و آلومینیوم اکسید [۱۲].

Physical properties	Fluid phase (Water)	Solid (Al_2O_3)
C_p (J/kg k)	۴۱۷۹	۷۶۵
ρ (kg/m ³)	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
K ($W m^{-1} K^{-1}$)	۰/۶	۲۵
$\beta \times 10^{-5}$ (1/K)	۲۱	۰/۸۵
$\mu \times 10^{-4}$ (kg/ms)	۸/۹	----
Diameter of nanoparticle(nm)	----	۴۷

مطالعه عددی جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه مربعی با ...

آب-اکسید آلومینیوم پر شده بود، توسط ابوندا و چامخا [۷] گزارش شده است. آنها مشاهده کردند که در حضور نانوذرات، انتقال حرارت درون محفظه به صورت چشم‌گیری بهبود می‌یابد. منصور و همکارانش [۸] یک شبیه‌سازی عددی را درباره جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه مربعی جداره متحرک انجام دادند. جداره‌های کناری و بالایی سرد بوده و جداره متحرک پایینی در معرض یک شار حرارتی قرار داشت. آنها دریافتند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، حرکت جریان سیال و همچنین دمای آن کاهش می‌یابد و این در حالی است که عدد ناسلت متوسط متناظر با آن، افزایش می‌یابد.

به‌تازگی عارف‌منش و محمودی [۹] در یک شبیه‌سازی عددی، به بررسی تاثیرات نامعین مدل‌های ویسکوزیته دینامیکی برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه پرداختند. محفظه مربعی مورد مطالعه دارای دیواره سرد در بالا و دیواره‌ی گرم متحرک در پایین بوده و تاثیر کسر حجمی نانوذرات و عدد ریچاردسون با استفاده از دو مدل مختلف ویسکوزیته مورد بررسی قرار گرفته است. آنها دریافتند با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقادیر ناسلت متوسط برای دیواره گرم در هر دو مدل ویسکوزیته افزایش می‌یابد.

قاسمی و امین‌الساداتی [۱۰] انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را داخل یک محفظه مثلثی بررسی نمودند. محفظه آنها دارای یک جداره افقی عایق، یک جداره اریب داغ و یک جداره عمودی متحرک سرد بود. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانوذرات نرخ انتقال حرارت را در تمامی اعداد ریچاردسون و تمامی جهت‌های حرکت جداره متحرک، افزایش می‌دهد. همین نتیجه را محمودی [۱۱] در بررسی‌های خود با نانوسیال مشابه ولی هندسه متفاوت به دست آورد. محفظه مستطیلی که او در نظر گرفت دارای یک دیواره داغ متحرک در پایین و سه دیواره سرد دیگر بود.

در مطالعه حاضر، جریان جابه‌جایی ترکیبی برای نانو سیال اکسید آلومینیوم- آب با در نظر گرفتن تغییرات خواص، درون یک محفظه مربعی شکل زاویه دار با دو مانع داغ درون آن، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهایی نظیر عدد رابلی، شیب محفظه مربعی، نسبت منظر موانع و

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

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

ضریب هدایت حرارتی نانوذرات در سیال در حالت سکون از رابطه معروف به همیلتون و کروسر [۱۵] به دست می آید که:

$$\frac{k_{stationary}}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (11)$$

این مدل برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی توسط زو و همکاران^۲ [۱۶] پیشنهاد گردیده است. ترم دوم این معادله ضریب هدایت حرارتی بر پایه جابه جایی حرارتی ناشی از حرکت براونی می باشد.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_{stationary}}{k_f} + \frac{k_c}{k_f} = \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (12)$$

$$+ c \frac{Nu_p d_f (2 - D_f) D_f \left[\left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{1-D_f} - 1 \right]^2}{Pr (1 - D_f)^2 \left(\frac{d_{max}}{d_{min}} \right)^{2-D_f} - 1} \frac{1}{d_p}$$

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 دو 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:

$$D_f = 2 - \frac{\ln \phi}{\ln \left(\frac{d_{p,min}}{d_{p,max}} \right)} \quad (13)$$

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 کسری نشان داده شده است.

در این تحقیق از فرمولاسیون خواص متغیر با اندازه نانوذرات ۴۰ نانومتر، نسبت قطرها ۰/۰۰۷ و دمای ۳۰۰ درجه کلوین استفاده شده است. معادلات حاکم بدون بعد برای جریان تراکم ناپذیر، آرام و پایدار به صورت زیر است:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

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

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 V + \frac{Ri}{Pr} \times \frac{\beta_{nf}}{\beta_f} \Delta \theta \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \nabla^2 \theta \quad (4)$$

ضریب پخش حرارتی و چگالی موثر نانوسیال عبارتند از:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (5)$$

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_f \quad (6)$$

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

$$(\rho c_p)_{nf} = \phi (\rho c_p)_s + (1 - \phi) (\rho c_p)_f \quad (7)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = \phi (\rho \beta)_s + (1 - \phi) (\rho \beta)_f \quad (8)$$

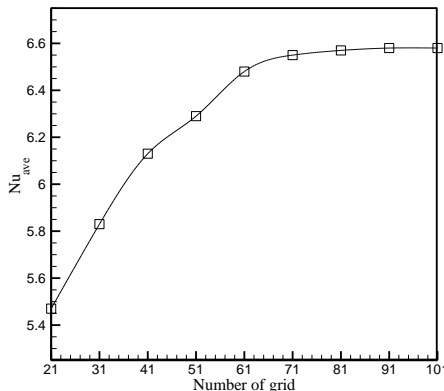
در این تحقیق ویسکوزیته موثر نانوسیال از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\mu_{eff} = \mu_f (1 + 2.5\phi) \left[1 + \eta \left(\frac{d_p}{L} \right)^{-2\varepsilon} \phi^{2/3} (\varepsilon + 1) \right] \quad (9)$$

این مدل معتبر توسط جانگ و همکاران^۱ [۱۳] برای سیال پایه خالص دارای ذرات نانوکروی شکل (نانوسیالات) ارائه شده است. برای نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم، ثابت تجربی ε و η به ترتیب برابر ۰/۲۵ و ۲۸۰ هستند.

ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه با رابطه پیشنهاد شده توسط ابوندا و همکاران [۱۴] 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:

شکل ۲ رسم گردیده است. $Re=10, Ra=10^5, h=0.1$ و $\gamma = 30^0$ به دست آمده و در



شکل (۲): ارزیابی استقلال شبکه در اندازه شبکه‌های مختلف.

همان‌گونه که در شکل مشخص است، شبکه نقاط 81×81 ، با توجه به دقت قابل قبول نتایج از یک سو 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 جابه‌جایی آزاد هوا در یک محفظه مربع شکل با دیواره‌ی متحرک داغ در بالا و دیواره‌ی سرد در پایین می‌پردازیم. این مساله توسط محققین بسیاری از جمله مرجع [۱۷] حل شده است. مقایسه میان میزان عدد ناسلت متوسط تحقیق حاضر و سایر تحقیقات در جدول ۲ آورده شده است که انطباق خوبی را میان نتایج کد حاضر با نتایج سایر مراجع نشان می‌دهد.

به منظور اعتبارسنجی و تحقیق صحت و دقت کد کامپیوتری مورد استفاده در این مدل‌سازی، به حل عددی و آنالیز یک محفظه ساده پر شده با سیال پایه با $Pr = 0.7$ در رایلی‌های مختلف می‌پردازیم. 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، نشان‌دهنده 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 [۱۸] ارائه گردیده اعتبارسنجی شده است. نتایج این اعتبارسنجی در شکل ۳ قابل مشاهده است. واضح است که کد حاضر تطبیق فوق‌العاده‌ای با نتایج مطالعه مذکور نشان می‌دهد.

$$d_{p,max} = d_p \cdot \frac{D_f - 1}{D_f} \left(\frac{d_{p,min}}{d_{p,max}} \right)^{-1} \quad (14)$$

$$d_{p,min} = d_p \cdot \frac{D_f - 1}{D_f} \quad (15)$$

عدد ناسلت:

$$Nu = \frac{hL}{k_f} \quad (16)$$

که در آن، ضریب جابه‌جایی حرارتی h و ضریب هدایت حرارتی از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$h = \frac{q_w}{T_h - T_c} \quad (17)$$

$$k_{nf} = \frac{-q_w}{\partial T / \partial x} \quad (18)$$

با جایگذاری معادلات (۱۵-۱۴) در معادله ۱۶، عدد ناسلت برای دیواره داغ سمت چپ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) \quad (19)$$

مقدار عدد ناسلت متوسط هم از معادله ۲۰ به دست می‌آید:

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dY \quad (20)$$

۳- روش عددی و معتبرسازی نتایج

در تحقیق حاضر، برای انجام محاسبات از کد کامپیوتری به زبان فرترن استفاده شده است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی به وسیله روش حجم محدود با سیستم شبکه جابه‌جاشده به صورت عددی حل شده‌اند. برنامه کامپیوتری براساس الگوریتم سیمپلر به حل هم‌زمان معادلات انفصال می‌پردازد.

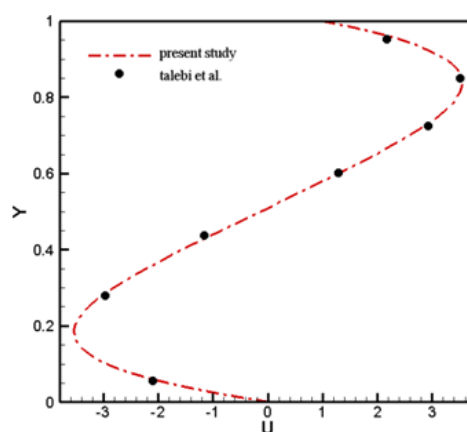
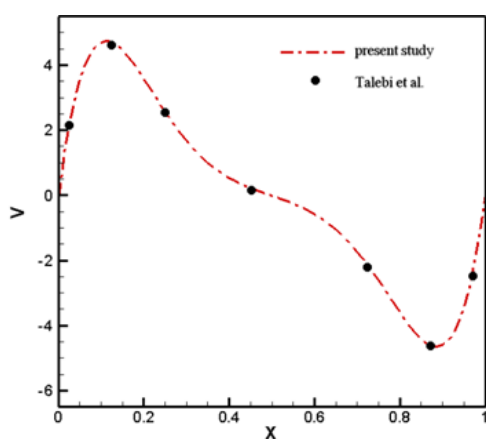
ترم جابه‌جایی با استفاده از طرح هیبریدی که تلفیقی از طرح‌های تفاضل مرکزی و طرح پیشرو است تقریب زده می‌شود. در تحقیق حاضر مقدار خطای نسبی در تکرارهای متوالی، به عنوان معیار همگرایی، به صورت زیر قرار داده شده است:

$$Error < 10^{-7} \quad (21)$$

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 دیواره‌ی داغ در

جدول (۲): مقایسه نتایج مطالعه حاضر و سایر تحقیقات صورت گرفت.

	Present study	Lin et al. (2010)	Tiwari and Das (2007)	Hadjisophocleous et al. [17] (1998)
(a) Ra = 10⁴				
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
(b) Ra = 10⁵				
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
(c) Ra = 10⁶				
u _{max}	۶۶/۴۴۵	۶۶/۴۶۹۸۷	۶۵/۵۸۶۶	۶۶/۴۲
Y	-۰/۸۷۳	-۰/۸۶۸۵۱	-۰/۸۳۹	-۰/۸۹۷
v _{max}	۲۲۱/۷۴۸	۲۲۲/۳۳۹۵	۲۱۹/۷۳۶۱	۲۲۶/۴
X	-۰/۰۳۹۸	-۰/۰۳۸۰۴	-۰/۰۴۲۳۷	-۰/۰۲۰۶
Nu _{ave}	۸/۷۹۵	۸/۷۵۷۹۳۳	۸/۸۰۳	۱۰/۳۹



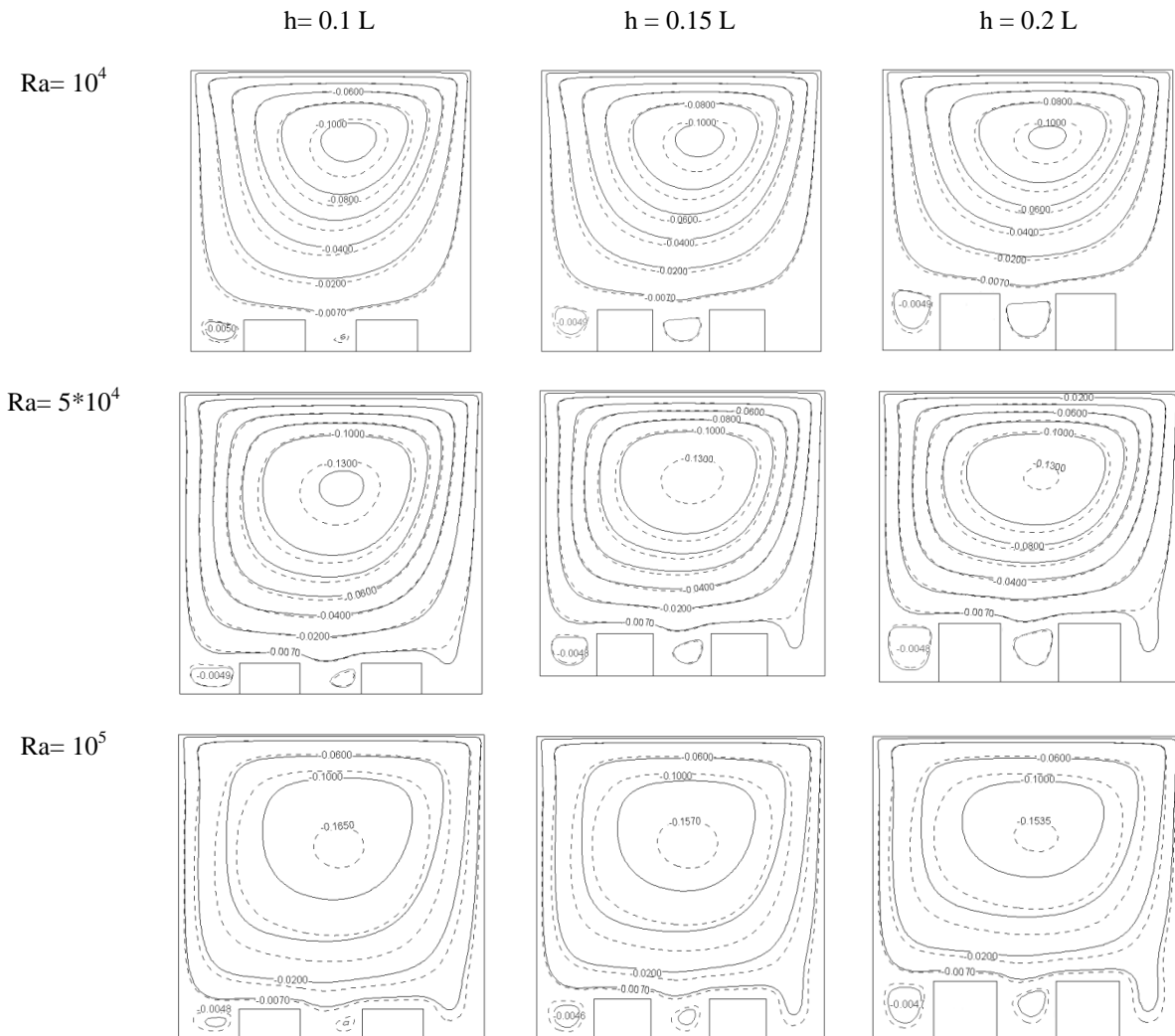
شکل (۳): مقایسه میان تحقیق حاضر و نتایج طالبی و همکاران [۱۸] در $Re=1, Ra=1.47 \cdot 10^4, \varphi = 0.03$

۴- تحلیل و بررسی نتایج

در این نوشتار، انتقال حرارت و جریان جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه شیب‌دار پرشده از نانوسیال به‌همراه دو مانع داغ مربعی مورد مطالعه قرار گرفته است.

شکل ۴ تغییرات خطوط جریان را در ارتفاع‌های مختلف موانع داغ و رایلی‌های مختلف در رینولدز ۵۰ و حالت افقی استقرار محفظه نشان می‌دهد. خطوط جریان مربوط به سیال پایه با خط ممتد و خطوط مربوط به نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۶ با خط چین نشان داده شده است. در $Ra = 10^4$ الگوی جریان نشان‌دهنده تشکیل یک گردابه مرکزی ساعت‌گرد متقارن به‌وسیله نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره و نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما می‌باشد. این گردابه تقریباً تمامی

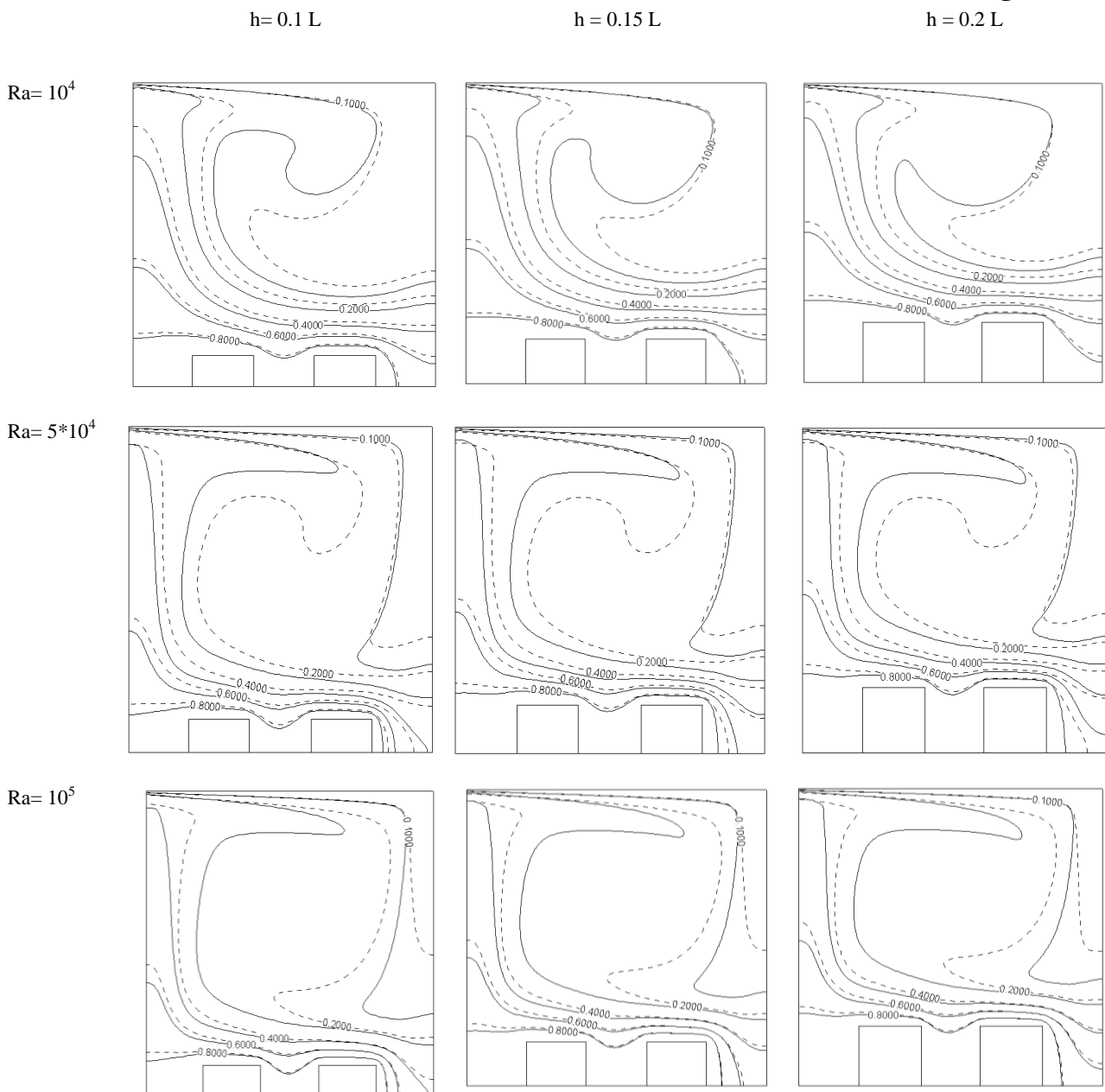
فضای محفظه را اشغال نموده است. دو گردابه کوچک نیز در فضای بین دو مانع و در فاصله میان مانع و دیواره سمت چپ پدید می‌آید. افزوده‌شدن ارتفاع موانع داغ تاثیر چندانی در شکل و اندازه‌ی گردابه درون محفظه ندارد. وجود ذرات نانو در سیال نیز تنها شدت و اندازه‌ی گردابه را اندکی افزایش می‌دهد درحالی‌که تغییری در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



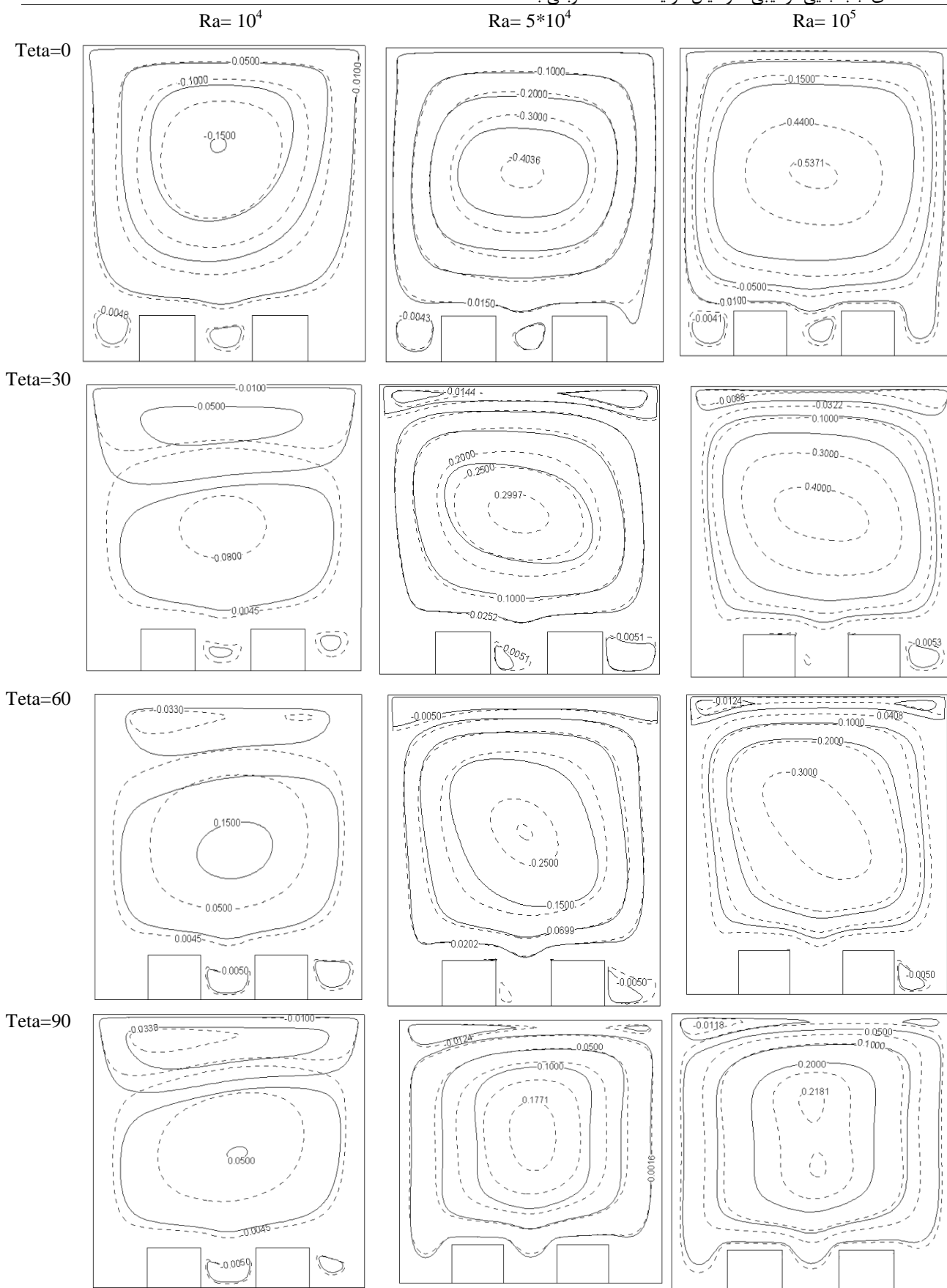
شکل (۴): تغییرات خطوط جریان در ارتفاع‌های مختلف موانع داغ و رایلی‌های مختلف در رینولدز ۵۰، کسر حجمی ۰/۰۶ و حالت افقی استقرار محفظه.

در شکل ۶ خطوط جریان برای رایلی‌ها و زوایای شیب مختلف در $Re=10$ و $h=0.15 L$ نشان داده شده است. با افزایش شیب محفظه، نیروی شناوری و برشی که در حالت افقی در یک راستا و هم‌جهت با یکدیگر عمل می‌کردند، در جهت مقابل هم عمل می‌کنند. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص است 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.

شکل ۵ خطوط دمای متناظر با خطوط جریان در شکل ۴ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است با افزایش رایلی، خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره‌های موانع متراکم‌شده 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 غیرآدیاباتیکی در سیال پایه بیشتر از نانوسیال است که این مسئله به علت افزایش هدایت حرارتی نانوسیال نسبت به سیال پایه می‌باشد. افزایش ارتفاع موانع داغ نیز، باعث باز شدن خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره‌های داغ شده و موجب کاهش گرادیان دما می‌گردد.

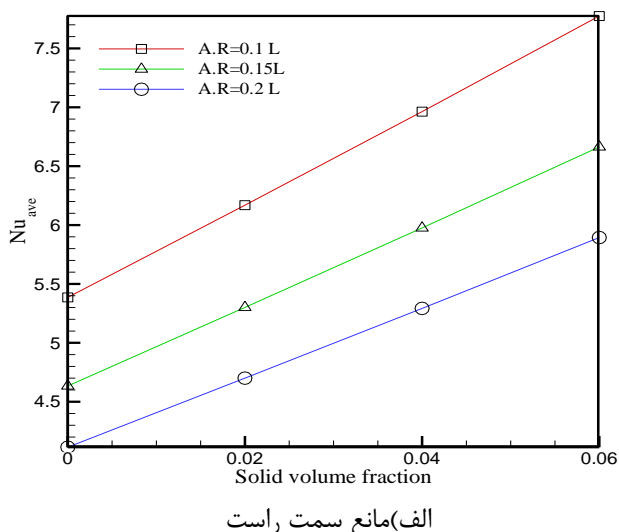


شکل (۵): خطوط دمای متناظر با خطوط جریان در ارتفاع‌های مختلف موانع داغ و رایلی‌های مختلف در رینولدز 50 ، کسر حجمی 0.06 و حالت افقی استقرار محفظه.

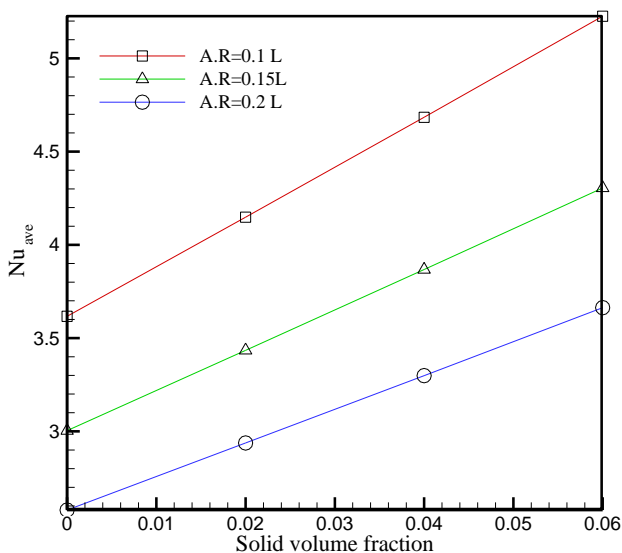


شکل (۶): خطوط جریان برای رایلی‌ها و زوایای شیب مختلف در کسر حجمی ۰/۰۶، و $Re=10$ و $h=0.15L$.

رینولدز ۱۰۰، رایلی 10^5 و زاویه استقرار صفر درجه، رسم گردیده است. همان گونه که مشاهده می شود سرعت در مرکز محفظه بسیار ناچیز بوده و با حرکت به سمت دیواره های چپ و راست، مولفه سرعت عمودی در جهت های مخالف افزایش می یابد. از سوی دیگر با افزایش کسر حجمی نانوذرات معلق در سیال، سرعت عمودی سیال درون محفظه افزایش می یابد.



الف) مانع سمت راست



ب) مانع سمت چپ

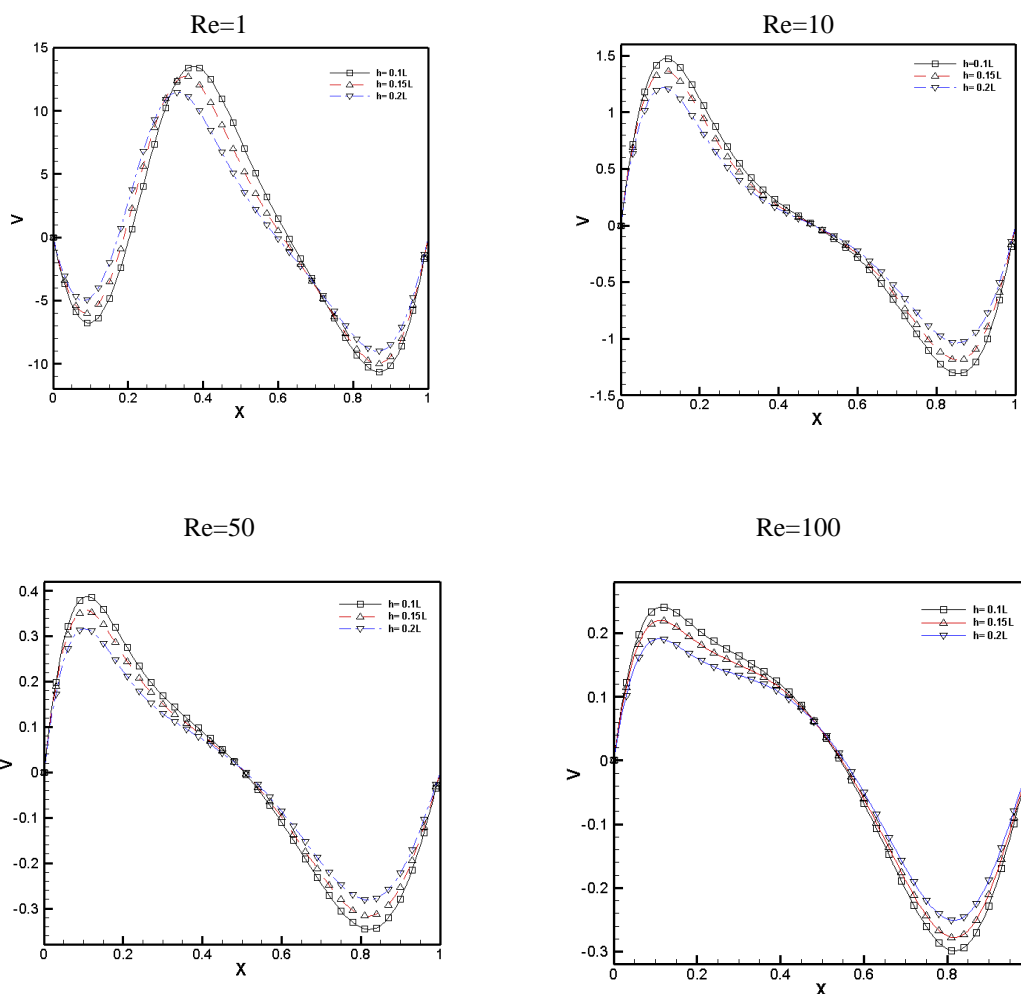
شکل ۷): تغییرات ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی برای ارتفاع های مختلف موانع مربعی در $Re=50$ و 10^4 و $\gamma = 0^0$.

گردابه فوقانی در محفظه تحت تاثیر نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره و گردابه تحتانی ناشی از نیروی شناوری می باشد. در تمامی شیب های مورد بررسی، با افزایش رایلی، گردابه پایینی رشد کرده و گردابه فوقانی ضعیف تر می گردد. 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 شیب های مورد بررسی، مشاهده نمود. در 10^4 وجود نانوسیال نسبت به سیال پایه، باعث رشد گردابه زیرین گردیده و در مقابل گردابه فوقانی را ضعیف نموده است. این موضوع به دلیل تاثیر پذیری نانوسیال از نیروی شناوری نسبت به نیروی برشی اتفاق می افتد. در 10^5 و 5×10^4 نیز وجود نانوسیال در زوایای مختلف گردابه های 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 گردد.

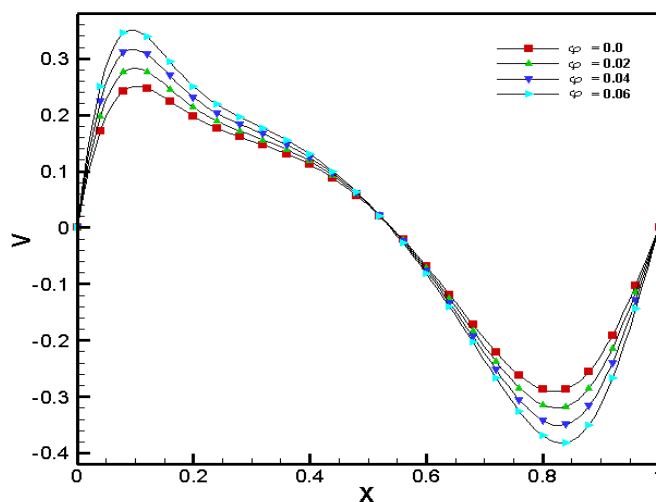
تغییرات ناسلت متوسط بر حسب کسر حجمی برای ارتفاع های مختلف موانع مربعی در $Re=50$ و 10^4 و $\gamma = 0^0$ به صورت مجزا برای موانع سمت چپ و راست در شکل ۷ نشان داده شده است. در این نمودارها مشاهده می شود، انتقال حرارت در مانع سمت راست از مانع سمت چپ بیشتر است. همان گونه که پیشتر در شکل ۴ نشان داده شد در این محدوده از پارامترها، در محفظه یک گردابه اصلی ساعت گرد وجود دارد که جهت ساعت گردش این گردابه باعث افزایش میزان انتقال حرارت مانع سمت راست نسبت به مانع سمت چپ می شود. افزایش کسر حجمی نانوذرات معلق در سیال و همچنین کاهش ارتفاع موانع، باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و در نتیجه انتقال حرارت می گردد.

نمودارهای سرعت عمودی در خط میانی برای ارتفاع های مختلف مانع در رایلی 5×10^4 و در کسر حجمی ۰/۰۴ برای اعداد رینولدز مختلف در حالت استقرار افقی محفظه در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ها مشخص است با افزایش ارتفاع مانع داغ، در تمامی اعداد رینولدز، سرعت در جهت عمودی کاهش می یابد. سرعت های عمودی به غیر از $Re=1$ نسبت به مرکز محفظه متقارن است و جهت حرکت نیز در $Re=1$ با سایر اشکال متفاوت است.

مولفه سرعت عمودی حرکت نانوسیال درون محفظه بر حسب طول در شکل ۹ برای کسرهای حجمی مختلف در



شکل (۸): نمودارهای سرعت عمودی در خط میانی برای ارتفاع‌های مختلف مانع در رایلی 5×10^4 و در کسر حجمی 0.04 برای اعداد رینولدز مختلف در حالت استقرار افقی محفظه.



شکل (۹): مولفه سرعت عمودی حرکت نانوسیال درون محفظه برحسب طول برای کسرهای حجمی مختلف در رینولدز 100 ، رایلی 10^5 و زاویه استقرار صفر درجه.

Mixed Convection Flows in a Square Lid-Driven Cavity Partially Heated from Below Using Nanofluid", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 10, pp. 1504–1512, 2010.

9. Arefmanesh, A. and Mahmoodi, M. "Effects of Uncertainties of Viscosity Models for Al₂O₃-Water Nanofluid on Mixed Convection Numerical Simulations", Int. J. Thermal Sci. Vol. 50, No. 9, pp. 1706–1719, 2011.
10. Ghasemi, B. and Aminossadati, S.M. "Mixed Convection in a Lid-Driven Triangular Enclosure Filled with Nanofluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 8, pp. 1142–1148, 2010.
11. Mahmoodi, M. "Mixed Convection Inside Nanofluid Filled Rectangular Enclosures with Moving Bottom Wall", Thermal Science, Vol. 15, No. 3, pp. 889-903, 2011.
12. Hosseini, S.A., Yekani, M.K., Hosseini, S.M.S., Bidgoli, M.R. and Hemmat, M. "Heat Transfer Performance of Al₂O₃ - Water Nanofluid", Archive Des Sciences, pp. 1661-464x, 2012.
13. Jang, S.P., Lee, J.H., Hwang, K.S., and Choi, S.U.S. "Particle Concentration and Tube Size Dependence of Viscosities of Al₂O₃-Water Nanofluids Flowing Through Micro-and Minutubes", Appl. Phys. Lett., Vol. 91, No. 24, pp. 24-31, 2007.
14. Abu-Nada, E., Masoud, Z., Oztog, H.F., and Compo, A. "Effect of Nanofluid Variable Properties on Natural Convection in Enclosures", Int. J. Thermal Sci., Vol. 49, No. 3, pp. 479-491, 2010.
15. Hamilton, R.L. and Crosser, O.K. "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems", Indus. Eng. Chem. Fund. Vol. 1, No. 3, pp. 187–191, 1962.
16. Xu, J., Yu, B., Zou, M., and Xu, P. "A New Model for Heat Conduction of Nanofluids Based on Fractal Distributions of Nanoparticles", J. Phys. D., Vol. 39, No. 20, pp. 4486–4490, 2006.
17. Hadjisophocleous, G.V., Sousa, A.C.M., and Venart, J.E.S. "Prediction of Transient Natural Convection in Enclosures of Arbitrary Geometry Using a Nonorthogonal Numerical Model", Heat Trans. A., Vol. 13, No. 3, pp. 373–392, 1998.
18. Talebi, F., Mahmoudi, A.H., and Shahi, M. "Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Square Lid-Driven Cavity Utilizing Nanofluid", International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 37, No. 1, pp. 79–90, 2010.

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، انتقال حرارت و جریان جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه شیب‌دار پر شده از نانوسیال به همراه دو مانع داغ مربعی به صورت عددی شبیه‌سازی 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 می‌گردد.

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 ایجاد شده در محفظه، نرخ انتقال حرارت مانع سمت راست و چپ تغییر می‌کند.

۴- افزایش عدد رایلی موجب افزایش انتقال حرارت در محفظه می‌گردد که نسبت این افزایش در کسرهای حجمی بالاتر بسیار بیشتر از کسرهای حجمی پایین‌تر است.

۶- مراجع

1. Hwang, K.S., Lee, J.H., and Jang, S.P. "Buoyancy-Driven Heat Transfer of Water-Based Al₂O₃ Nanofluids in a Rectangular Cavity", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 50, No's. 19-20, pp. 4003-4010, 2007.
2. Wen, D. and Ding, Y. "Natural Convective Heat Transfer of Suspensions of Titanium Dioxide Nanoparticles (Nanofluids)", IEEE Transport Nanotechnology, Vol. 5, No. 3, pp. 220–227, 2006.
3. Khanafar, K., Vafai, K. and Lightstone, M. "Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, No. 19, pp. 3639–3653, 2003.
4. Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., and Wong wisen, S. "Enhancement of Heat Transfer Using Nanofluids-An Overview", Renew. Sust. Energy Rev., Vol. 14, No. 2, pp. 629–641, 2010.
5. Sarkar, J.A. "A Critical Review on Convective Heat Transfer Correlations of Nanofluids", Renew. Sust. Energy Rev., Vol. 15, No. 6, pp. 3271–3277, 2011.
6. Mohammed, H.A., Bhaskaran G., Shuaib, N.H., and Saidur, R. "Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Micro Channels Heat Exchanger Using Nanofluids": Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, No. 3, pp. 1502–1512, 2011.
7. Abu-Nada, E. and Chamkha, A.J. "Mixed Convection Flow in a Lid Driven Square Enclosure Filled with a Nanofluid", Eur. J. Mech. B-Fluid, Vol. 29, No. 6, pp. 472–482, 2010.
8. Mansour, M.A., Mohamed, R.A., Abd-Elaziz, M.M. and Ahmed, S.E., "Numerical Simulation of