

## بررسی عددی جابه‌جایی ترکیبی در محفظه پرشده از نانوسیال با دیواره‌های متحرک دوگانه در شیب‌های مختلف و دمای غیریکنواخت دیواره‌ی گرم

محمد همت اسفه <sup>۱</sup>	فرهاد قدک <sup>۲</sup>	عبدالعلی حقیری <sup>۳</sup>	سیدصادق میرطالبی <sup>۴</sup>
دانشکده مهندسی مکانیک	مرکز آیرودینامیک قدر	دانشکده مهندسی هوافضا	مرکز آیرودینامیک قدر
دانشگاه سمنان	دانشگاه جامع امام حسین(ع)	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دانشگاه جامع امام حسین(ع)
	( تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱/۲۶ )		

### چکیده

در این تحقیق، به منظور بررسی جریان جابه‌جایی ترکیبی در محفظه‌ی مربعی پرشده از نانوسیال با دو دیواره‌ی متحرک با شیب‌های مختلف، از روشی عددی بر پایه‌ی روش حجم محدود استفاده شده است. تحقیق حاضر برای عدد ریچاردسون از ۱ تا ۱۰، عدد رینولدز از ۱ تا ۱۰۰ و کسر حجمی نانو ذرات از ۰ تا ۰/۰۶ صورت پذیرفته است. با استفاده از خطوط جریان، دما و نمودارهای ناسلت در حالت‌های مختلف، میزان تأثیر شیب، کسر حجمی نانوذرات، سرعت حرکت دیواره‌ها و عدد ریچاردسون بر مشخصه‌های حرارتی و هیدرودینامیکی بحث و بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان کسر حجمی نانوذرات در یک رینولدز خاص میزان انتقال حرارت افزایش و کسر حجمی نانوذرات با افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. همچنین در ریچاردسون‌های بالاتر، تأثیر افزایش کسر حجمی روی رفتار حرارتی و الگوی جریان، نمود بیشتری دارد.

**واژه‌های کلیدی:** نانو سیال، جابه‌جایی ترکیبی، محفظه با دیواره‌های متحرک دوگانه، حل عددی

### Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Two-sided Inclined Lid-driven Cavity Utilizing Nano-fluid with Various Inclination Angles and Ununiformed Temperature.

M. Hemmat Esfe	F. Ghadak	A. Haghiri	S.S Mir-Talebi
Mech. Eng. Dep't.	Ghadr Aerodynamic Center	Aerospace Eng. Dep't	Ghadr Aerodynamic Center
Semnan Univ.	Imam Hossein Univ.	Amirkabir Univ. of Tech.	Imam Hossein Univ.
	(Received: 29 Aug. 2011; Accepted: 14 April 2012)		

### ABSTRACT

To investigate the mixed convection flows through nano-fluid in a square double lid-driven cavity with various inclination angles, a numerical method based on the finite volume approach is applied. In This paper  $\text{SiO}_2/\text{water}$  nano-fluid have been used. The cavity is un-uniformly heated from the left,  $T_h$ , and cooled from the opposite wall; the top and the bottom moving walls have been supposed to be insulated. The study has been executed for the Richardson number 0.1 to 10, Reynolds number 1 to 100 while solid volume fraction ( $\phi$ ) of nano-particles altered from 0 to 0.06. The impact of angle of inclination, solid volume fraction of nano-fluids, velocity of moving walls and Richardson number on hydrodynamic and thermal characteristics have been studied and discussed. As a result, it was found that the heat transfer increase with increase in solid volume fraction for a particular Reynolds. Also in higher Richardson, the effect of solid volume fraction increases on thermal behavior and flow pattern.

**Keywords:** Nano-fluid, Mixed Convection, Two-sided Lid-Driven Cavity, Numerical Solution

۱- دانشجوی دکتری: M.hemmatesfe@gmail.com

۲- استادیار(نویسنده پاسخگو)

۳- دانشجوی دکترا

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد

## ۱- مقدمه

قرار دادند. آنها دریافتند هنگامی که عدد ریچاردسون بسیار بالاست (جریان طبیعی غالب است)، بخش عمده‌ای از نواحی میانی و تحتانی داخل محفظه ساکن هستند. خانافر و چامکا<sup>[۴]</sup> تحقیقات ایواتسو را گسترش داده و جابه‌جایی ترکیبی سیال در یک محفظه با دیواره‌ی متحرک در محیط متخلخل را به‌همراه تأثیر تولید حرارت داخلی مطالعه نمودند. آیدین<sup>[۵]</sup> در یک کار عددی جالب، مکانیزم‌های همراهی و مخالفت نیروی برشی و نیروی شناوری را در جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه مطالعه نمود. محفظه مربعی مورد مطالعه، دارای یک دیواره‌ی عمودی متحرک و در مقابل آن، دیواره‌ی سرد ثابت بوده و دیواره‌ی افقی ثابت و آدیاباتیکی فرض شده بودند. او پرانتل را برابر  $0.71$  (هوا) و میزان عدد ریچاردسون را از  $0.1$  تا  $100$  در نظر گرفت که این محدوده سه رژیم انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، جابه‌جایی آزاد و جابه‌جایی ترکیبی را تعیین می‌کند. او در محدوده‌ی جابه‌جایی ترکیبی که نیروهای شناوری و برشی در حالات ضعف و شدت مختلف حضور دارند، تأثیر همراهی و مخالفت آنها را نسبت به یکدیگر بررسی نمود.

چامخا<sup>[۶]</sup> تحقیقات آیدین را بسط داد و جریان جابه‌جایی ترکیبی هیدرومگنتیک در محفظه با دیواره متحرک عمودی با جاذب و یا تولیدکننده‌های حرارتی را، با روش حجم محدود مورد مطالعه‌ی عددی قرار داد. وی دریافت در حالتی که نیروهای شناوری و برشی یکدیگر را پشتیبانی می‌کنند، وجود تولیدکننده‌های حرارتی داخلی، باعث کاهش قابل توجه میزان عدد ناسلت متوسط شده و در حالتی که نیروهای شناوری و برشی در خلاف جهت یکدیگر عمل کنند، میزان عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر، جی و همکاران مطالعه عددی و تجربی جابه‌جایی ترکیبی گذرا در محفظه با دیواره‌های متحرک را انجام دادند. تحقیقات این گروه نشان می‌دهد که میدان دما دارای رفتار نوسانی ضعیفی در نقاط میانی و بالایی محفظه است.

جابه‌جایی ترکیبی نوعی از انتقال حرارت جابه‌جایی است که از ترکیب جابه‌جایی طبیعی و جابه‌جایی اجباری پدید می‌آید. در جابه‌جایی ترکیبی عدد ریچاردسون معرف میزان تأثیرگذاری جابه‌جایی طبیعی به جابه‌جایی اجباری است. بر پایه میزان عدد بدون بعد ریچاردسون مسائل مربوط به جابه‌جایی به سه گونه تقسیم می‌گردند: ۱- جابه‌جایی طبیعی خالص برای  $Ri >> 1$  ۲- جابه‌جایی ترکیبی برای  $0.1 < Ri < 10$  ۳- جابه‌جایی اجباری برای  $Ri << 1$ .

تاکنون، تحقیقات بسیاری از سوی پژوهشگران در مورد انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در شکل‌ها و هندسه‌های مختلف با شرایط مرزی گوناگون صورت گرفته است. اکثر این تحقیقات با استفاده از سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول، روغن و ... بوده و تحقیقات محدودی نیز با استفاده از نانو سیالات انجام گرفته است. در میان هندسه‌های مختلف مورد مطالعه پژوهشگران، محفظه‌ها به دلیل کاربردهای دامنه‌دار صنعتی و طراحی‌های مهندسی در شاخه‌های مختلف مربوط به انتقال حرارت مورد توجه بوده و بررسی‌های تحلیلی، عددی و تجربی متنوعی در جهت افزایش و یا کاهش میزان انتقال حرارت در این زمینه انجام گرفته است. در این میان عمده پژوهش‌ها مربوط به محفظه‌ها با دیواره ثابت بوده و محفظه‌هایی با دیواره‌ها و مرزهای متحرک علی‌رغم مطرح شدن در سالیان اخیر، هنوز نسبت به سایر حالات نیاز به پژوهش و بررسی بیشتری دارند. در اینجا جهت آشنایی با تحقیقات صورت گرفته در مورد محفظه‌ها، با یک یا چند دیواره متحرک، برخی از مطالعات صورت گرفته مرور می‌گردد.

محمد و ویسکانتا<sup>[۱]</sup> تأثیر حرکت دیواره افقی بر روی میدان جریان و مشخصات گرمایی در یک محفظه کشیده را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند بالاترین نرخ انتقال حرارت موضعی در ناحیه‌ی ابتدایی دیواره متحرک رخ می‌دهد و این اندازه با حرکت رو به جلو کاهش می‌یابد.

ایواتسو<sup>۲</sup> و همکاران<sup>[۳]</sup> جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه با دیواره متحرک با گرادیان دمای افقی پایدار را مورد مطالعه

3- Khanafer and Chamkha

4- Aydin

5 - Chamkha

1- Mohamad and Viskanta

2- Iwatsu

محفظه‌های پر شده از نانوسیال را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق با تغییر عدد رایلی، کسر حجمی نانوذرات و نسبت منظر محفظه، کانتورهای دما و جریان و تفاوت‌های ایجاد شده در انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفتند.

طالبی و همکاران [۱۰] در پژوهشی پیرامون محفظه‌های با دیواره‌ی متحرک، جریان جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه مربعی پر شده از نانوسیال را به صورت عددی بررسی نمودند. در این کار تحقیقی، تأثیر کسر حجمی نانو سیال بر مشخصه‌های گرمایی و هیدرودینامیکی بررسی گردید. آنها دریافتند در رینولدزهای ثابت، کسر حجمی در رایلی‌های بالا نسبت به رایلی‌های پایین، تأثیر بیشتری روی رفتارهای حرارتی و الگوی جریان می‌گذارد. مزروعی و همکاران [۱۱] تأثیر خواص متغیر نانو سیال را بر جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه‌ی مربعی بررسی نمودند. تأثیر افزایش نیروی برشی سیال هنگامی که نیروی شناوری ثابت بوده و تأثیر افزایش نیروی شناوری، هنگامی که نیروی برشی ثابت باشد، در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. اخیراً مطالعه عددی جابه‌جایی ترکیبی در محفظه پر شده از نانوسیال با دیواره‌های متحرک با استفاده از مدل مخلوط دوفازی توسط علی‌نیا و همکاران [۱۲] صورت پذیرفته است. در این تحقیق رفتار نانوسیال با تغییر در کسر حجمی و عدد ریچاردسون بررسی گردیده است. در تحقیق دیگری ابوندا و چامخا [۱۳] جریان جابه‌جایی ترکیبی را در محفظه‌ای شیب‌دار با دیواره‌ی متحرک و پر شده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بررسی کردند. در تحقیق آنها، دیواره راست و چپ بی دررو فرض گردید در حالی که دیواره‌های چپ و راست در دماهای ثابتی قرار گرفته بودند. دیواره‌ی بالائی در دمای بالاتری نسبت به دیواره‌ی پایینی قرار داشته و با سرعتی ثابت حرکت می نمود. در این کار تأثیر حضور ذرات نانو همچنین زاویه شیب محفظه، بر روی مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفت. آنها دریافتند میزان انتقال حرارت می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای با حضور ذرات نانو در سیال پایه افزایش پیدا کند.

با مروری بر تحقیقات علمی صورت گرفته در این زمینه به روشنی مشخص می‌شود مطالعات صورت گرفته روی

بررسی عددی دیگری نیز توسط شریف در مورد انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در محفظه مستطیلی کشیده با نسبت منطری ۱۰ صورت پذیرفته است. در این پژوهش دیواره‌ی متحرک بالایی، در دمای بالاتری نسبت به دیواره ثابت پایینی قرار گرفته است. آنها محدوده‌ی عدد رایلی را بین  $10^5$  تا  $10^7$  اختیار کردند؛ در حالی که عدد رینولدز را به صورت ثابت و برابر  $408/2$  در نظر گرفتند. در این تحقیق تأثیر شیب برای زاویه‌های صفر تا سی درجه در میزان انتقال حرارت بررسی و مشاهده گردید که بر روی دیواره متحرک بالایی، میزان ناسلت موضعی به صورت محسوسی با حرکت به سمت راست کاهش می‌یابد. همچنین آنها دریافتند که میزان ناسلت میانگین با افزایش شیب محفظه برای حالتی که جریان اجباری بر جریان طبیعی غلبه دارد، به آرامی کاهش می‌یابد.

خانافر<sup>۱</sup> و همکارانش [۷] جابه‌جایی ترکیبی گذرا در یک محفظه با دیواره متحرک را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند. در محفظه‌ی مورد مطالعه، جریان جابه‌جایی اجباری درون محفظه از حرکت مکانیکی دیواره متحرک پدید آمده و اثر جابه‌جایی طبیعی نیز از قرار گرفتن دیواره پایینی در دمایی بالاتر دیواره مقابل به وجود آمده است. دو دیواره عمودی نیز بی‌دررو فرض شده‌اند. گسسته‌سازی معادلات حاکم به وسیله روش المان محدود بر پایه‌ی روش گالرکین صورت پذیرفته است. واحد<sup>۸</sup> انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه‌ی مستطیلی با دیواره‌ی متحرک افقی را مورد بررسی قرار داد. وی در رینولدز ثابت ۱۰۰، میزان پرانتل را از  $0/01$  تا  $10$ ، میزان عدد ریچاردسون را از  $0/1$  تا  $100$  و میزان نسبت منطری را از  $1$  تا  $4$  تغییر داد. میزان افت و افزایش انتقال حرارت با تغییر هر یک از این پارامترها در کار وی به صورت مبسوط مورد مطالعه قرار گرفت.

تحقیقات مطرح شده تاکنون همگی بر روی سیال خالص انجام پذیرفته است. با مروری بر روی متون و مقالات چاپ شده بر روی محفظه‌های مربعی، خصوصاً در جابه‌جایی ترکیبی، به تعداد محدودی از پژوهش‌ها با استفاده از نانوسیال می‌رسیم. کفایتی و همکاران [۹]، جابه‌جایی طبیعی در درون

1- Khanafer

2 - Waheed

استفاده از نانوسیالات انجام گرفته است. لو و یانگ<sup>۵</sup> [۱۹] نیز جریان سیال و انتقال حرارت در محفظه با دو دیواره‌ی متحرک با نسبت منظر ثابت ۱/۹۶ را به صورت عددی بررسی کردند. در تحقیق آنها، دیواره‌های متحرک بالا و پایین، دارای دماهای ثابت متفاوت بوده و برای ایجاد گرادیان دما در جهت مخالف یکدیگر حرکت می‌کردند. برای بررسی مشخصه‌های انتقال حرارت و جریان، دو پارامتر رینولدز و گراش مورد توجه قرار گرفت.

در تحقیق جالب توجه دیگری که اخیراً انجام شده است، وهبا<sup>۶</sup> [۲۰] به تعدد حالات جریان‌های محفظه با دو دیواره‌ی متحرک و چهار دیواره‌ی متحرک پرداخته است. در این پژوهش، دو دیواره‌ی متحرک همسایه یکدیگرند و برای نخستین بار به حرکت توأمان چهار دیواره متحرک توجه شده است. برای محفظه با دو دیواره‌ی متحرک، دیواره‌ی فوقانی به سمت راست و دیواره‌ی سمت چپ به سمت پایین حرکت می‌کند و برای محفظه با چهار دیواره‌ی متحرک، دیواره‌ی فوقانی به سمت راست، دیواره‌ی تحتانی به سمت چپ، دیواره‌ی سمت چپ به طرف پایین و دیواره‌ی سمت راست، به طرف بالا حرکت می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که در رینولدزهای پایین، میدان جریان برای محفظه با دو دیواره‌ی متحرک، نسبت به یکی از قطرها قرینه است. در حالی که برای محفظه با چهار دیواره‌ی متحرک، خطوط جریان نسبت به هر دو قطر محفظه قرینه هستند.

با مروری بر تحقیقات صورت گرفته واضح است که تاکنون هیچ‌گونه تحقیقی در زمینه انتقال حرارت در محفظه‌ها با دو دیواره‌ی متحرک بی دررو شیب‌دار با استفاده از نانوسیالات صورت نگرفته است. شایان ذکر است انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در محفظه‌ی مربعی دارای دو دیواره‌ی متحرک شیب‌دار، نه تنها برای نانوسیال، بلکه برای سیالاتی چون آب و یا هوا نیز تاکنون به صورت جدی و دامنه‌دار، مورد بررسی قرار نگرفته است. با توجه به عدم وجود چنین تحقیقی در زمینه انتقال حرارت در محفظه‌ها و نیز با توجه به کاربردهای مهندسی آن از قبیل خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، فن‌آوری خشک کردن و روغنکاری، هدف تحقیق

محفظه با دو دیواره‌ی متحرک دیواره، نسبت به محفظه با یک دیواره‌ی متحرک بسیار محدود می‌باشد.

مسائل مربوط به محفظه‌ها با یک دیواره متحرک توسط کولمن<sup>۱</sup> و همکاران [۱۴-۱۵] در سال ۱۹۹۷ به محفظه با دو دیواره‌ی متحرک، بسط و گسترش داده شد. مطالعات آنان به صورت تجربی و تئوری در جریان دوبعدی و سه‌بعدی صورت پذیرفت. در حالی که کار آنها معطوف به حرکت دیواره‌هایی از محفظه بود که در مقابل هم قرار داشته و با سرعت ثابت و در خلاف جهت هم حرکت می‌کردند. آنها دریافتند که الگوی جریان یکنواخت به عدد رینولدز و نسبت منظر بستگی داشته و سرعت دیواره‌های متحرک نیز به میزان عدد رینولدز بستگی دارد. در رینولدزهای پایین جریان شامل گردابه‌های مجزا در مجاورت دیواره‌های متحرک بوده و با افزایش سرعت دیواره‌ها، گردابه‌های مجزا در جهت ساخت یک الگوی جریان جدید محو می‌شوند. آلبنسودر<sup>۲</sup> و کولمن [۱۶] پایداری خطی جریان درون محفظه با دو دیواره‌ی موازی متحرک با سرعت‌های برابر را بررسی کردند. آنها نوع ناپایداری و وابستگی به رینولدز بحرانی و عدد موج بر روی نسبت منظر را بررسی کردند. ازتوپ و داگتکین<sup>۳</sup> [۱۷] جابه‌جایی ترکیبی را در محفظه‌هایی با دو دیواره‌ی متحرک با سرعت ثابت ولی با جهت‌های مختلف حرکت بررسی کردند. آنها سه محفظه با دیواره‌ی متحرک افقی را نیز مورد بررسی قرار داده و مشخصه‌های انتقال حرارت، شکل خطوط جریان و خطوط دما را با توجه به تغییرات جهت حرکت دیواره‌ها بررسی کردند. از نتایج مهم این تحقیق، میزان قابل توجه انتقال حرارت در محفظه‌ها در جهت‌های حرکت مختلف است که نهایتاً منجر به تعیین بهترین حالت در میان این سه حالت، به لحاظ میزان انتقال انرژی گردیده است. تیواری و داس<sup>۴</sup> [۱۸] تحقیقات ازتوپ و داگتکین را ادامه دادند. آنها بدون ایجاد کمترین تغییری در هندسه و شرایط مرزی مورد مطالعه ازتوپ، تنها سیال مورد استفاده آنها را با نانو سیال آب-مس تغییر داده و همان مسئله را به صورت عددی حل کردند. این کار جزء معدود تحقیقاتی است که در این حوزه با

1- Kuhlmann

2- Albensoeder

3- Oztop and Dagtekin

4- Tiwari and Das

5- Luo and Yang

6- Wahba

ایجاد شده ناشی از تغییرات چگالی از تقریب بوزینسک استفاده می‌شود.

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

	آب	اکسید سیلیسیوم
Cp(J/kg k)	۴۱۷۹	۷۶۵
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
K (W m-1 K-1)	۰/۶	۳۶
$\alpha \times 10^{-5}$	۱/۴۷	۱۱۸/۵۳۶
$\beta \times 10^{-5}$ (1/K)	۲۱	۰/۶۳
$\mu \times 10^{-4}$ (Kg/ms)	۸/۹	.....

معادلات بقای جرم، مومنتوم در راستای X و Y و انرژی برای حالت جابه‌جایی ترکیبی، سیال غیرقابل تراکم به صورت معادلات (۱-۴) بیان می‌شوند. در این معادلات، جریان حالت آرام و دائم فرض شده است و شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها نیز برقرار است.

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

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

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

معادله انرژی:

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

فرم بدون بعد معادلات حاکم با استفاده از پارامترهای بدون بعد زیر به دست می‌آید:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad V = \frac{v}{U_0}, \quad U = \frac{u}{U_0}$$

$$\Delta T = \frac{q'' L}{k_f}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad (5)$$

$$P = \frac{p}{\rho_{nf} U_0^2}, \quad Ra = \frac{g B_f q'' L^4}{k_f \nu_f \alpha_f}, \quad pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Re = \frac{U_0 L}{\nu_f}$$

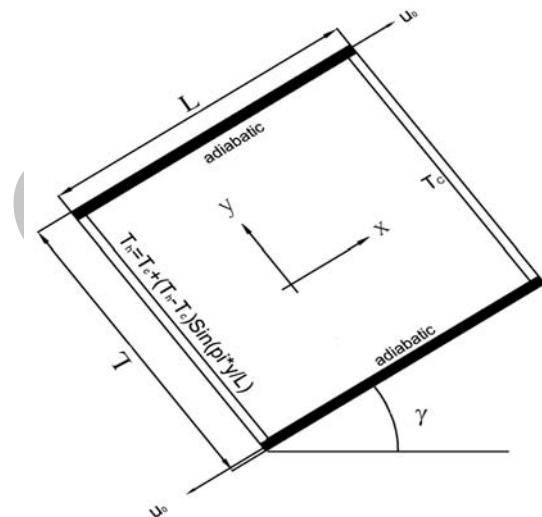
معادلات (۶-۹) نشان‌دهنده حالت بدون بعد معادلات (۱-۴) هستند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0, \quad (6)$$

حاضر، بررسی این هندسه با در نظر گرفتن عوامل مختلف مؤثر مانند عدد ریچاردسون، زاویه شیب محفظه، جنس و غلظت نانوذرات می‌باشد. در ادامه به طرح و بررسی هندسه‌ی مسئله، معادلات حاکم، شرایط مرزی، معتبرسازی و توضیح روش عددی مورد استفاده برای حل معادلات حاکم، پرداخته خواهد شد.

## ۲- تشریح مسئله و فرمول‌بندی ریاضی

شکل شماتیک هندسه مورد مطالعه در این تحقیق، که عبارت از محفظه‌ی مربعی با دو دیواره‌ی متحرک می‌باشد، در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل (۱): دیاگرام شماتیک محفظه‌ی مورد مطالعه.

این محفظه با نانوسیال آب-اکسید سیلیسیوم پر شده که شکل و اندازه نانوذرات معلق در آب، یکسان و یکنواخت فرض شده‌اند. همان‌طور که در این شکل مشخص است، این محفظه دارای دیواره‌ی گرم در سمت چپ، و دیواره‌ی سرد در سمت راست است که دیواره‌ی سمت چپ، به صورت سینوسی گرم شده و دما در نقاط مختلف این دیواره تفاوت دارد. دو دیواره‌ی متحرک فوقانی و تحتانی، بی‌دررو فرض شده‌اند. کلیه خواص سیال و جریان، به استثنای چگالی، ثابت فرض شده است. خواص ترموفیزیکی آب و اکسید سیلیسیوم در دمای مرجع در جدول ۱ ارائه شده است. برای نیروی شناوری

$$u_s = \frac{2k_b T}{\pi \mu_f d_s^2},$$

که در آن،  $K_b$  ثابت بولتزمن می‌باشد.

برای بررسی افزایش میزان انتقال حرارت، میزان عدد ناسلت موضعی و عدد ناسلت متوسط با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید:

$$Nu = \frac{hL}{k_f}, \quad (۱۶)$$

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dY. \quad (۱۷)$$

شرایط مرزی نیز به صورت زیر تعریف می‌گردند:

$$\begin{cases} \text{دیواره سمت چپ:} & \begin{cases} U = V = 0 \\ \theta = \sin(\pi Y) \end{cases} \\ \text{دیواره سمت راست:} & \begin{cases} U = V = 0 \\ \theta = 0 \end{cases} \\ \text{دیواره پائینی:} & \begin{cases} U = -1, V = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \end{cases} \\ \text{دیواره بالایی:} & \begin{cases} U = 1, V = 0 \\ \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (۱۸)$$

### ۳- روش‌های عددی

در تحقیق حاضر، محاسبات با استفاده از کد رایانه‌ای فرترن صورت گرفته است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی به روش حجم محدود با سیستم شبکه جابه‌جا شده به صورت عددی حل شده‌اند. برنامه رایانه‌ای بر اساس 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، معیار همگرایی بر روی مقدار خطای نسبی تکرارهای متوالی مقادیر به صورت زیر قرار داده شده است:

$$Error = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\zeta^{t+1} - \zeta^t|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\zeta^{t+1}|} \leq 10^{-7}, \quad (۱۹)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 U + \frac{Ra}{Re^2 \cdot pr} \cdot \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \theta \cdot \sin \gamma, \quad (۷)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 V + \frac{Ra}{Re^2 \cdot pr} \cdot \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \theta \cdot \cos \gamma, \quad (۸)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \nabla^2 \theta. \quad (۹)$$

پخش گرمایی و چگالی نانو سیال از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}}, \quad (۱۰)$$

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1 - \phi) \rho_f, \quad (۱۱)$$

ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حرارتی و لزجت نانوسیال نیز این گونه تعریف می‌گردند:

$$(\rho c_p)_{nf} = \phi (\rho c_p)_s + (1 - \phi) (\rho c_p)_f, \quad (۱۲)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = \phi (\rho \beta)_s + (1 - \phi) (\rho \beta)_f, \quad (۱۳)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}}. \quad (۱۴)$$

جهت به دست آوردن لزجت از مدل برینکمن استفاده شده و هدایت حرارتی نانوسیال نیز توسط مدل پتل به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s Pe \frac{A_p}{k_f A_f}, \quad (۱۵)$$

که در آن،  $c$  ثابت بوده و به وسیله آزمایش‌های تجربی تعیین شده است. نسبت  $A_s/A_f$  و  $Pe$  نیز به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_s}{d_f} \frac{\phi}{1 - \phi}, \quad Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f}.$$

که در آن،  $d_s$  نشان‌دهنده قطر ذرات نانوسیال معلق در آب است که در تحقیق حاضر برابر ۱۰۰ نانو متر فرض گردیده‌اند.  $d_f$  نیز اندازه ملکول‌های مایع است که برای آب برابر با  $2 \text{ \AA}$  می‌باشد.

#### ۴- بحث و بررسی پیرامون نتایج

در این مقاله، انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و اجباری در محفظه مربعی شکل که جداره‌ی فوقانی آن به سمت راست و جداره‌ی تحتانی آن به سمت چپ در حال حرکت می‌باشد، پرداخته شده است. جداره‌های مذکور عایق بوده و دیواره‌ی سمت چپ محفظه تحت دمای سینوسی و جداره‌ی سمت راست آن تحت دمای ثابت  $T_C$  می‌باشد. میدان‌های جریان و دما و نیز مقادیر ناسلت متوسط برای نانوسیال اکسید سلیسیوم برای بازه‌ی رینولدز بین ۱ تا ۱۰۰، عدد ریچاردسون بین ۰/۱ تا ۱۰، کسر حجمی نانوسیال بین ۰ تا ۶ درصد در زوایای بین ۰ الی ۱۵۰ درجه ارائه شده‌اند. این نتایج شامل خطوط دما، جریان و مقادیر عدد ناسلت متوسط می‌باشد. منحنی‌های خطوط جریان و دما برای ریچاردسون ۲، در مقادیر مختلف رینولدز و زاویه برای دو کسر حجمی صفر و ۰/۰۶ به ترتیب در شکل‌های ۳-۲ ترسیم شده‌اند. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رینولدز در هر زاویه خاص، مقادیر خطوط جریان افزایش می‌یابند. بدین صورت مقدار دبی که بین هر دو نقطه مشخص در حال عبور کردن است نسبت به رینولدز کمتر، افزایش پیدا کرده و این پدیده منجر به افزایش انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط می‌گردد. افزایش کسر حجمی نانوذرات، تغییر چندانی بر مقادیر خطوط جریان نخواهد داشت. اما در برخی از نمودارهای مربوط به رینولدز ۱۰۰ خطوط جریان به سطح نزدیک‌تر می‌شوند. در زاویه ۱۵۰ درجه، سیال گرم شده حرکت رو به بالا دارد. در حالی که حرکت جداره‌ها تمایل به پایین کشاندن نانوسیال را دارند. بدین صورت در قسمت پایین جداره گرم در زاویه ۱۵۰ درجه (مطابق با قسمت فوقانی جداره گرم در شکل نشان داده شده) گردابه کوچکی تشکیل می‌شود. با افزایش کسر حجمی نانوذرات، خطوط جریان به سطح جداره‌ها نزدیک‌تر می‌گردند. بدین صورت مقدار دبی عبور کرده از نزدیک سطح منبع حرارتی افزایش یافته و انتقال حرارت زیاد می‌شود. برای رینولدز ۱۰۰ و زاویه ۱۵۰ درجه مشاهده می‌شود که ابعاد و اندازه‌ی گردابه کوچک تشکیل شده بر روی سطح منبع حرارتی با افزایش کسر حجمی نانوذرات، کوچکتر می‌شود.

که در این رابطه،  $M$  و  $N$  نشان‌دهنده تعداد نقاط شبکه در جهت  $X$  و  $Y$  بوده و  $n$  نشان‌دهنده تعداد تکرارهاست. برای بررسی میزان وابستگی نتایج به شبکه انتخاب شده، آزمون استقلال شبکه بر روی یک محفظه نمونه با چندین شبکه متفاوت انجام شده است. شش شبکه یکنواخت  $41 \times 41$ ،  $61 \times 61$ ،  $77 \times 77$ ،  $91 \times 91$ ،  $105 \times 105$  و  $121 \times 121$  به این منظور مورد بررسی قرار گرفته و برای هر یک از این شبکه‌ها، میزان عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره‌ی داغ به دست آمده است. جدول ۲ میزان ناسلت متوسط متناظر با انتخاب هر یک از این شبکه‌ها را در دو حالت مجزا نمایش می‌دهد.

بر این اساس شبکه نقاط  $105 \times 105$ ، با توجه به دقت قابل قبول نتایج از یک سو و افزایش شدید زمان حل برنامه رایانه‌ای با افزایش تعداد نقاط شبکه از سوی دیگر برای حل مسئله انتخاب شده است. برای اطمینان از صحت نتایج برنامه رایانه‌ای، به حل عددی مسئله انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد هوا در یک محفظه مربع شکل با دیواره متحرک داغ در بالا و دیواره سرد در پایین می‌پردازیم. این مسئله توسط محققین بسیاری از جمله مراجع [۲۵-۲۱ و ۱۸] حل شده است. مقایسه میان میزان عدد ناسلت متوسط تحقیق حاضر و سایر تحقیقات در جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج، انطباق خوبی را میان نتایج کد حاضر با مراجع گزارش شده نشان می‌دهد.

جدول (۲): بررسی میزان استقلال شبکه نقاط.

اندازه مش	Nu	
	$\phi=0.02,$ $Re=1,$ $Ri=1$	$\phi=0.06,$ $Re=100,$ $Ri=10$
۴۱×۴۱	۰/۷۰۹	۵/۷۹۶
۶۱×۶۱	۰/۷۱۳	۵/۸۲۳
۷۷×۷۷	۰/۷۱۵	۵/۸۱۶
۹۱×۹۱	۰/۷۱۶	۵/۸۰۱
۱۰۵×۱۰۵	۰/۷۱۶	۵/۷۷۱
۱۲۱×۱۲۱	۰/۷۱۷	۵/۷۷۱

جدول (۳): مقایسه نتایج حاصله و سایر تحقیقات برای جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه.

	تحقیق حاضر	مرجع [۲۱]	مرجع [۲۲]	مرجع [۲۳]	مرجع [۲۴]	مرجع [۲۵]	مرجع [۱۸]
<b><math>Ra=10^3</math></b>							
$Nu$	۱/۱۳۶۶	۱/۱۱۸	۱/۱۰۸	۱/۱۴۱	۱/۰۸۷۱	۱/۰۸۵	۱/۰۷۲
$Nu_{max}$	۱/۵۷۳۸	۱/۵۰۵	۱/۴۹۶	۱/۵۴۰	۱/۵۰۸		
$Nu_{min}$	۰/۶۴۶۸	۰/۶۹۲	۰/۷۲۰	۰/۷۲۷	۰/۶۹۰۱		
<b><math>Ra=10^4</math></b>							
$Nu$	۲/۳۲۵۶	۲/۲۴۳	۲/۲۰۱	۲/۲۹	۲/۱۹۵	۱/۲	۲/۰۷۰
$Nu_{max}$	۳/۵۴۵۶	۳/۵۲۸	۳/۴۸۲	۳/۸۴	۳/۵۵۸۵		
$Nu_{min}$	۰/۷۱۷۲	۰/۵۸۶	۰/۶۴۳	۰/۶۷۰	۰/۵۸۰۹		
<b><math>Ra=10^5</math></b>							
$Nu$	۴/۴۹۲۸	۴/۵۱۹	۴/۴۳۰	۴/۹۶۴	۴/۴۵۰	۴/۳۶۱	۴/۴۶۴
$Nu_{max}$	۷/۳۰۳۷	۷/۱۱۷	۷/۶۲۶	۸/۹۳	۷/۹۳۷۱		
$Nu_{min}$	۰/۹۹۰۶	۰/۷۲۹	۰/۸۲۴	۱/۰۱	۰/۷۱۷۳۰		
<b><math>Ra=10^6</math></b>							
$Nu$	۸/۶۳۸۸	۸/۷۹۹	۸/۷۵۴	۱۰/۳۹	۸/۸۰۳		
$Nu_{max}$	۱۴/۲۵۲۱	۱۷/۹۲۵	۱۷/۸۷۲	۲۱/۴۱	۱۹/۲۶۷۵		
$Nu_{min}$	۱/۶۲۴۷	۰/۹۸۹	۱/۲۳۲	۱/۵۸	۰/۹۴۲۰		

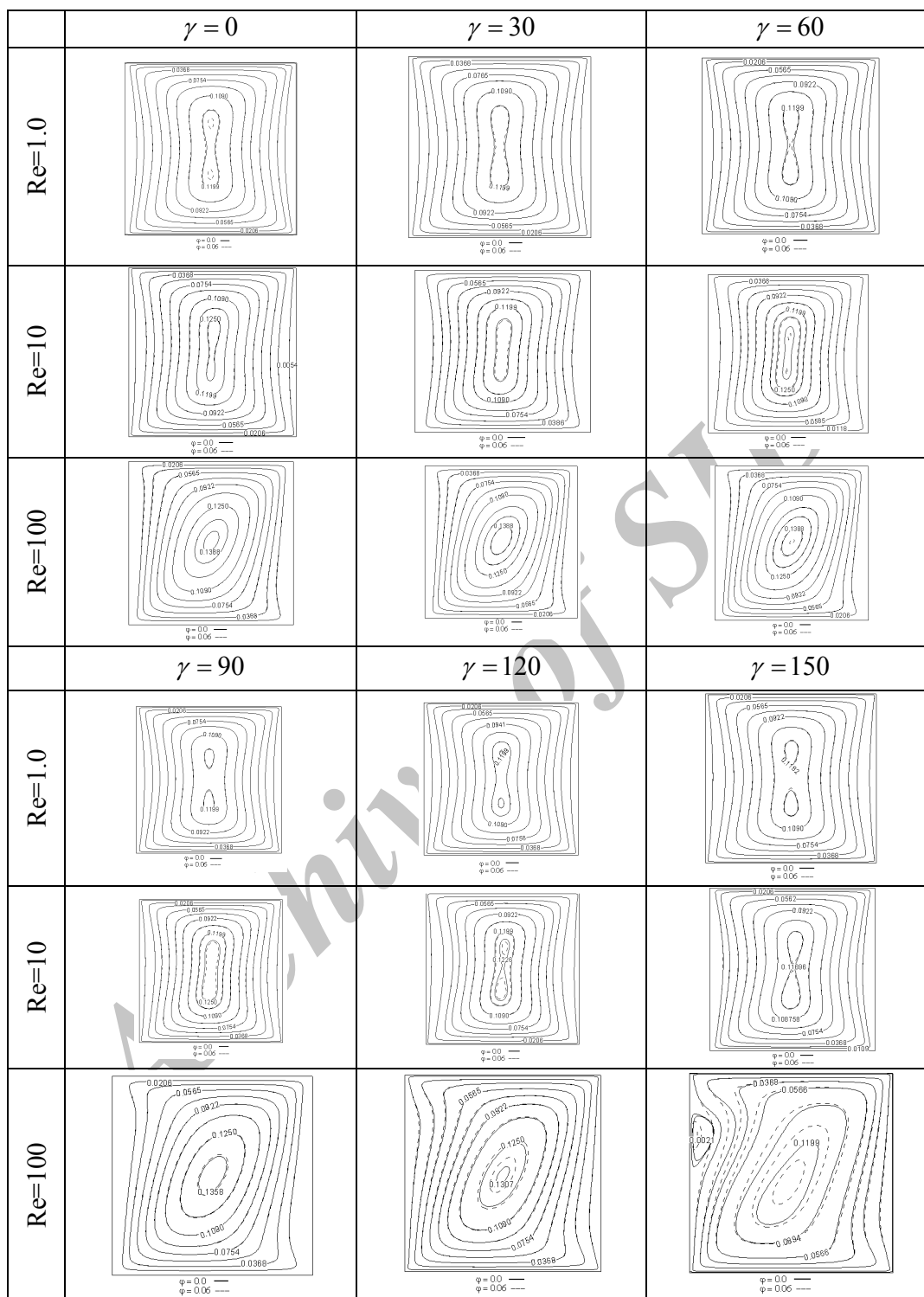
خواهد کرد. همان‌طور که ذکر شد، قسمت‌های فوقانی جداره، دمای کمتری خواهند داشت. لذا سیال گرم شده در نهایت با قسمتی از جداره که دمای کمتری نسبت به سیال دارد مواجه می‌شود. این پدیده منجر می‌شود که انتقال حرارت از سیال گرم شده به سطح با دمای کمتر باشد. لذا از مقدار انتقال حرارت کل کاسته شده و مقدار آن با توجه به جهت انتقال حرارت منفی خواهد شد.

با افزایش رینولدز در یک زاویه و عدد ریچاردسون خاص، تراکم خطوط جریان در نزدیکی سطح افزایش یافته و گرادیان دما بر روی سطح افزایش خواهد یافت. لذا انتظار می‌رود که مقدار ناسلت متوسط افزایش پیدا کند. سیال گرم پس از حرکت رو به بالا پس از حرکت کوتاهی با قسمتی از جداره تحت توزیع دمای سینوسی که سردتر از سیال است قرار خواهد گرفت. لذا مقداری انرژی از دست خواهد داد. موقعی که انتقال حرارت افزایش یابد، مقادیر خط دما در نزدیکی سطح گرم افزایش خواهد یافت.

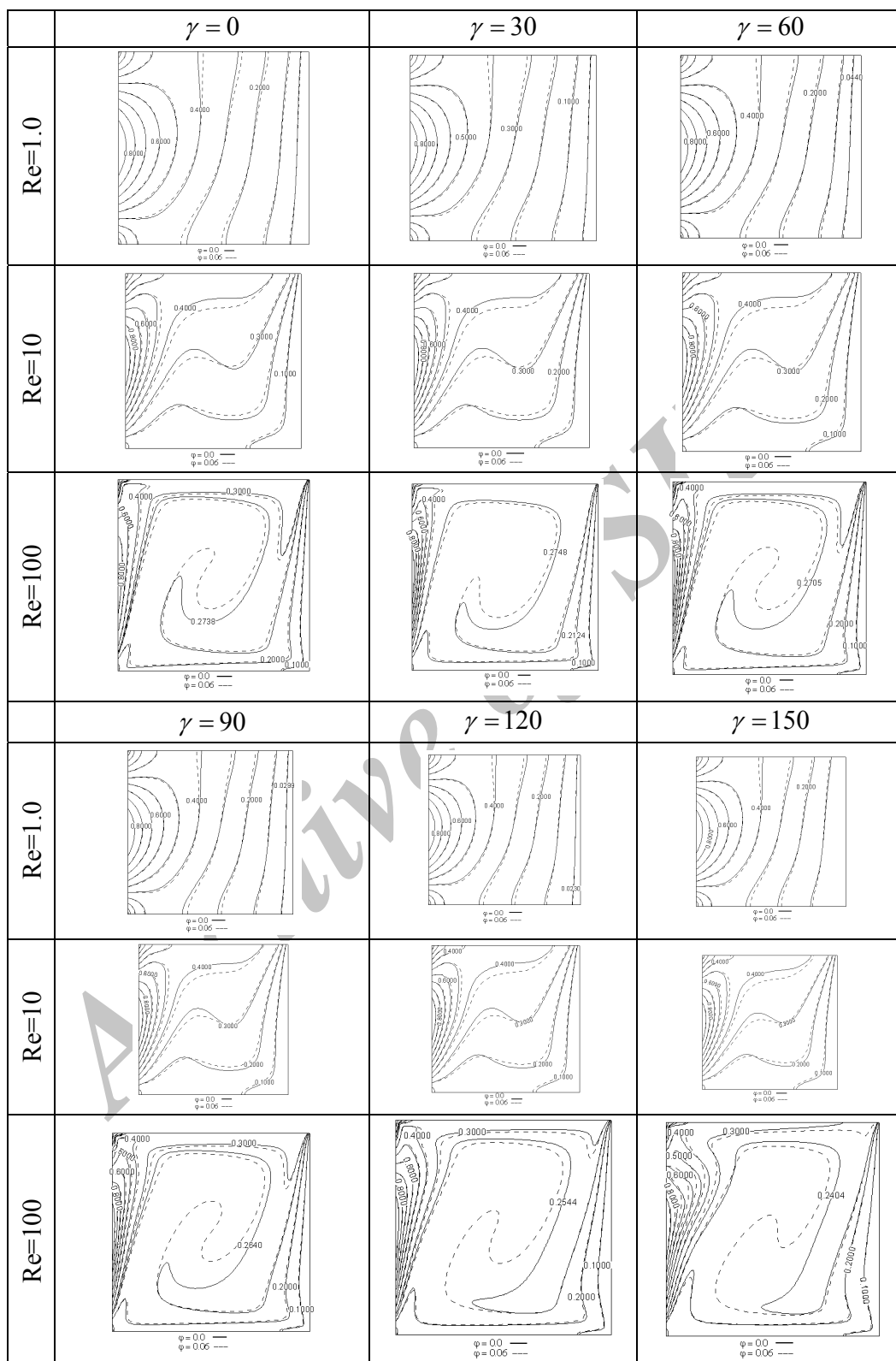
در زاویه صفر درجه برای مقادیر پایین رینولدز، خطوط جریان به دلیل سرعت کم جداره‌ی فوقانی و تحتانی به سطوح بالا و پایین نسبت به سطوح چپ و راست نزدیک‌تر می‌باشد. لذا در مرکز محفظه یک گردابه که در راستای عمودی قدری کشیده است، تشکیل می‌گردد. در قسمت فوقانی و تحتانی این گردابه، در جریان چرخشی کوچک ایجاد می‌گردد. با افزایش رینولدز به مقدار ۱۰ و سپس به ۱۰۰، سرعت دو جداره افقی افزایش یافته و سیال به نوعی در راستای افقی کشیده می‌شود. بدین صورت، از ارتفاع گردابه مرکزی کاسته می‌شود.

میدان خطوط دما در شکل ۳ برای عدد ریچاردسون ۲ نشان داده شده‌اند. نحوه توزیع دما در نزدیک جداره‌ی گرم به دلیل فرم سینوسی بودن دما می‌باشد. با توجه به این شکل و با عنایت به اینکه دما در مرکز جداره بیشترین مقدار و در گوشه‌های بالا و پایین کمترین مقدار را دارد، چنین پروفیل‌هایی انتظار می‌رود. سیال در مجاورت جداره‌ی گرم منبسط شده و در اثر نیروی شناوری به سمت بالا حرکت





شکل (۲): تغییرات خط جریان در ریچاردسون ۲ برای رینولدزها و زوایای مختلف.



شکل (۳): نمودارهای خطوط دما برای رینولدزها و زوایای مختلف برای ریچاردسون ۲.

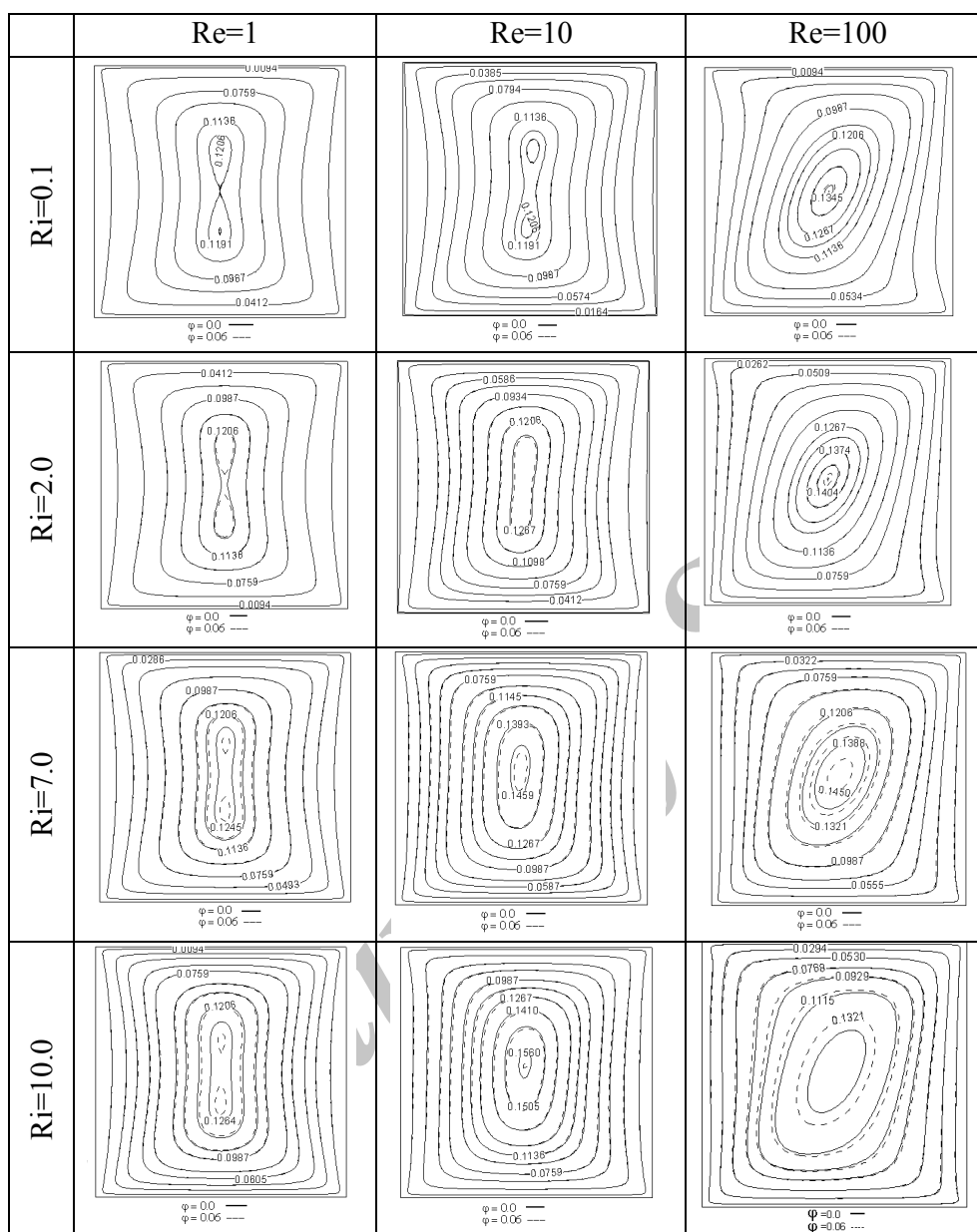
در محفظه پیش‌روی خواهند داشت. در نیمه فوقانی خطوط دما به سطح منبع حرارتی نزدیک‌تر می‌شوند. با توجه به اینکه قسمت پایین منبع حرارتی، گرم و قسمت فوقانی آن سرد است، لذا در هر دو حالت این نتیجه بر می‌آید که انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی، افزایش پیدا کرده است. این رفتار برای تمامی زوایا مشاهده می‌شود. با افزایش رینولدز، خطوط دما ثابت به نقاط دورتری از جداره توزیع خواهند شد. بدین صورت نقاط دورتر از جداره گرم، نسبت به کسر حجمی پایین‌تر، دمای بیشتری پیدا می‌کنند. بدین صورت مقدار انرژی وارد شده به محفظه بیشتر می‌گردد.

در مقادیر رینولدز ۱ در قسمت نیمه راست محفظه، خطوط دما تقریباً با یکدیگر موازی می‌باشند. در این قسمت از محفظه، انتقال حرارت رسانش بین لایه‌های عمودی سیال وجود داشته که با افزایش رینولدز به مقدار ۱۰۰ و توجه به عایق بودن جداره‌های فوقانی و تحتانی، به صورت انتقال حرارت رسانش بین لایه‌های افقی سیال در مرکز محفظه تبدیل می‌شود. با افزایش بیشتر مقدار رینولدز انتقال حرارت رسانش بین لایه‌های افقی سیال به محدوده کوچک‌تری از محفظه در نزدیکی جداره‌ی فوقانی و تحتانی مبدل می‌گردد.

شکل ۴ نمودارهای خطوط جریان را برای زاویه ۳۰ درجه و مقادیر مختلف ریچاردسون و رینولدز نشان می‌دهد. در این زاویه با افزایش رینولدز میدان جریان قوی‌تری درون محفظه تشکیل می‌گردد. با افزایش ریچاردسون از ۰/۱ به ۱۰ مقدار انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی قوی‌تر می‌شود و از آنجایی که نیروی شناوری ایجاد شده در اثر انتقال حرارت در زاویه ۳۰ درجه به نوعی هم راستا با نیروی اجباری ناشی از حرکت جداره‌ها می‌باشد، حرکت سیال تقویت شده و خطوط جریان به روی سطح نزدیک‌تر می‌شوند و گردابه موجود در وسط محفظه مقادیر بیشتری را خواهد پذیرفت.

اما از آنجا که جداره‌ی سمت راست به صورت کامل سرد است و قسمت‌های کوچکی از جداره‌ی سمت چپ نیز دمای کمتری نسبت به سیال گرم مجاور جداره خواهند داشت، انتظار می‌رود که با افزایش انتقال حرارت، بیشتر فضای محفظه را سیال با دمای کمتر فرا بگیرد. به عبارتی قسمتی از محفظه که دمای سیال ماکزیمم است کوچک‌تر می‌گردد. همین روند با افزایش رینولدز به وضوح برای تمامی زوایا مشاهده می‌شود. به عبارتی با افزایش رینولدز، مقادیر ناسلت متوسط افزایش خواهند یافت. با افزایش زاویه در رینولدزهای پایین تغییر قابل ملاحظه‌ای در خطوط دما مشاهده نمی‌شود. زیرا انتقال حرارت بر اثر هردو پدیده انتقال حرارت اجباری و طبیعی صورت می‌گیرد. انتقال حرارت اجباری به دلیل پایین بودن مقادیر رینولدز پایین می‌باشد. با محاسبه رایلی می‌توان دریافت که عامل اصلی انتقال حرارت طبیعی، رسانش بوده که با تغییر زاویه، تغییر زیادی انتظار نمی‌رود. با افزایش عدد رینولدز، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری افزایش می‌یابد. در زاویه صفر درجه مقدار نیروی شناوری هم راستا با نیروی اعمال شده از طریق سطوح فوقانی و تحتانی محفظه می‌باشد که در این حالت سیال گرم به دلیل تماس با قسمت سردتر جداره‌ی سمت چپ محفظه مقداری حرارت از دست خواهد داد. با تغییر زاویه از زاویه صفر درجه تا مقدار ۹۰ درجه نیروی شناوری منجر به حرکت رو به بالای سیال می‌شود. در حالی که حرکت جداره‌های دو طرف منجر به حرکت افقی سیال روی جداره گرم می‌شوند. در این حالت سیال از قسمتی از جداره‌ی گرم که دمای کمتری نسبت به سیال داشته فاصله گرفته و لذا خطوط دما در نقاط دورتر از جداره‌ی گرم، مقادیر بیشتری پیدا خواهند کرد. با تغییر زاویه به مقدار ۱۵۰ درجه، این حرکت به صورت محسوس‌تری قابل مشاهده است.

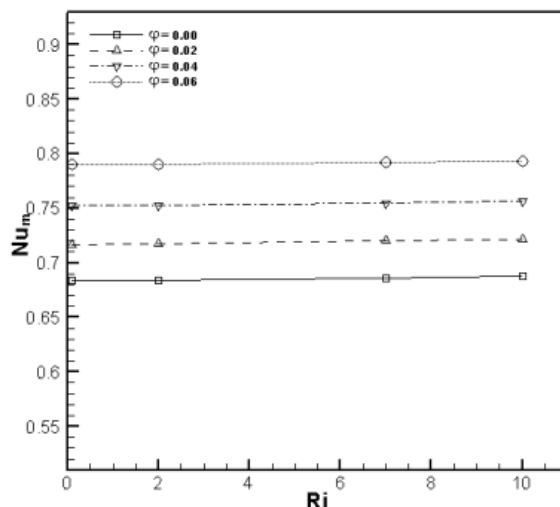
با افزایش کسر حجمی نانوسیال از مقدار ۰ به مقدار ۰/۰۶ در رینولدز ۱ در قسمت نیمه پایین محفظه، خطوط دما



شکل (۴): نمودارهای خطوط جریان در زاویه ۳۰ درجه و مقادیر مختلف ریچاردسون و رینولدز.

توجه خواهد بود. مقادیر ناسلت برای دیگر زوایا و اعداد رینولدز در جدول ۴ ارائه شده است. با افزایش رینولدز در کلیه زوایا و مقادیر ریچاردسون در اکثر آنها، بر مقدار ناسلت متوسط افزوده می‌شود. جهت مقایسه ساده‌تر مقادیر ناسلت متوسط، جدول ۴ که درصد تغییرات ناسلت متوسط را نشان می‌دهند، تشکیل داده شده‌اند.

مقادیر عدد ناسلت متوسط برحسب ریچاردسون و کسر حجمی نانوسیال در رینولدز ۱ و زاویه صفر درجه در شکل ۵ ترسیم شده است. در رینولدز ۱، تغییر ریچاردسون، تغییرچندانی در مقادیر ناسلت متوسط ایجاد نمی‌کند. اما با افزایش رینولدز، تغییرات ناسلت با تغییر ریچاردسون قابل



شکل (۵): نمودارهای ناسلت متوسط برای زاویه صفر درجه.

جدول (۴): مقایسه ناسلت برحسب ریچاردسون با تغییر کسر حجمی نانو سیال در زاویه صفر.

	Φ Ri	Re=1.0				Re=10				Re=100			
		۰/۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۶
Y=30	۰/۱	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۶۸۷	۱/۷۴۱	۱/۷۹۴	۱/۸۴۵	۴/۰۵۸	۴/۲۱۵	۴/۳۷۱	۴/۵۲۶
	۲/۰	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۷۴۲	۱/۷۹۶	۱/۸۴۹	۱/۹۰۱	۴/۴۳۴	۴/۵۸۹	۴/۷۴۴	۴/۸۹۶
	۷/۰	۰/۶۸۶	۰/۷۲۰	۰/۷۵۵	۰/۷۹۲	۱/۸۶۴	۱/۹۲۰	۱/۹۷۴	۲/۰۲۷	۵/۲۲۰	۵/۱۸۶	۵/۳۴۷	۵/۶۰۵
	۱۰/۰	۰/۶۸۸	۰/۷۲۱	۰/۷۵۶	۰/۷۹۳	۱/۹۲۷	۱/۹۸۴	۲/۰۳۹	۲/۰۹۲	۵/۲۴۹	۵/۴۲۲	۵/۵۹۱	۵/۷۵۵
Y=60	۰/۱	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۶۸۷	۱/۷۴۱	۱/۷۹۴	۱/۸۴۵	۴/۰۵۱	۴/۲۰۸	۴/۳۶۴	۴/۵۱۹
	۲/۰	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۷۳۸	۱/۷۹۳	۱/۸۴۶	۱/۸۹۸	۴/۳۴۴	۴/۵۰۱	۴/۶۵۸	۴/۸۱۳
	۷/۰	۰/۶۸۵	۰/۷۱۹	۰/۷۵۴	۰/۷۹۱	۱/۸۵۲	۱/۹۰۹	۱/۹۶۴	۲/۰۱۸	۴/۸۵۷	۵/۰۲۳	۵/۱۸۶	۵/۳۴۶
	۱۰/۰	۰/۶۸۶	۰/۷۲۰	۰/۷۵۵	۰/۷۹۲	۱/۹۱۱	۱/۹۶۸	۲/۰۲۵	۲/۰۸۰	۵/۰۸۳	۵/۲۵۴	۵/۴۲۳	۵/۵۸۸
Y=90	۰/۱	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۶۸۶	۱/۷۴۰	۱/۷۹۳	۱/۸۴۴	۴/۰۳۹	۴/۱۹۷	۴/۳۵۳	۴/۵۰۹
	۲/۰	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۷۲۰	۱/۷۷۵	۱/۸۲۲	۱/۸۸۰	۴/۱۵۹	۴/۳۱۹	۴/۴۷۹	۴/۶۳۸
	۷/۰	۰/۶۸۴	۰/۷۱۸	۰/۷۵۳	۰/۷۹۰	۱/۷۹۷	۱/۸۵۵	۱/۹۱۱	۱/۹۶۵	۴/۴۲۴	۴/۵۹۳	۴/۷۶۱	۴/۹۲۷
	۱۰/۰	۰/۶۸۴	۰/۷۱۸	۰/۷۵۳	۰/۷۹۰	۱/۸۳۸	۱/۸۹۷	۱/۹۵۴	۲/۰۱۰	۴/۵۵۶	۴/۷۳۲	۴/۹۰۶	۵/۰۷۵
Y=120	۰/۱	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۶۸۵	۱/۷۳۹	۱/۷۹۱	۱/۸۴۳	۴/۰۲۵	۴/۱۸۳	۴/۳۳۹	۴/۴۹۶
	۲/۰	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۶۹۲	۱/۷۴۶	۱/۷۹۹	۱/۸۵۲	۳/۸۸۰	۴/۰۴۷	۴/۲۱۳	۴/۳۷۸
	۷/۰	۰/۶۸۲	۰/۷۱۶	۰/۷۵۱	۰/۷۸۹	۱/۷۰۷	۱/۷۶۴	۱/۸۲۰	۱/۸۷۴	۵/۶۰۸	۵/۷۶۹	۵/۹۲۶	۶/۰۷۷
	۱۰/۰	۰/۶۸۲	۰/۷۱۶	۰/۷۵۱	۰/۷۸۸	۱/۷۱۵	۱/۷۷۴	۱/۸۳۱	۱/۸۸۶	۵/۹۰۸	۶/۱۰۶	۶/۲۱۵	۶/۳۸۳
Y=150	۰/۱	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۲	۰/۷۸۹	۱/۶۸۳	۱/۷۳۷	۱/۷۹۰	۱/۸۴۱	۴/۰۱۳	۴/۱۷۱	۴/۳۲۸	۴/۴۸۴
	۲/۰	۰/۶۸۳	۰/۷۱۷	۰/۷۵۱	۰/۷۸۹	۱/۶۵۹	۱/۷۱۴	۱/۷۶۷	۱/۸۱۹	۳/۵۴۸	۳/۷۱۷	۳/۸۹۱	۴/۰۶۶
	۷/۰	۰/۶۸۰	۰/۷۱۵	۰/۷۵۰	۰/۷۸۸	۱/۵۸۸	۱/۶۴۴	۱/۶۹۹	۱/۷۵۲	۵/۴۵۴	۵/۶۱۱	۵/۷۶۱	۵/۹۰۴
	۱۰/۰	۰/۶۷۹	۰/۷۱۴	۰/۷۴۹	۰/۷۸۷	۱/۵۳۶	۱/۵۹۳	۱/۶۴۹	۱/۷۰۳	۵/۸۶۹	۵/۹۰۲	۶/۰۰۷	۶/۲۳۲

### نتیجه گیری:

در این پژوهش، انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در محفظه مربعی پر شده از نانو سیال با دو دیواره‌ی متحرک، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفت. محفظه‌ی مورد مطالعه دارای دیواره‌های افقی آدیاباتیک و دیواره‌ی راست با دمای ثابت پایین می‌باشد؛ در حالی که دیواره‌ی سمت چپ محفظه به صورت سینوسی گرم می‌شود. تأثیر مقادیر عدد ریچاردسون، زاویه‌ی شیب محفظه، عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات بر روی میدان جریان و دما همچنین مشخصه‌های حرارتی و هیدروپنایمیک مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نتایج کلی ذیل حاصل گردید:

- ۱- با افزایش میزان کسر حجمی نانوذرات معلق در آب، ضریب هدایت حرارتی سیال تقویت شده و در ضمن، شدت و قدرت جریان و همچنین میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد،
- ۲- با افزایش رینولدز در یک زاویه و عدد ریچاردسون مشخص، تراکم خطوط جریان افزایش یافته، گردان دما بر روی سطح دیواره نیز افزایش خواهد یافت. افزایش میزان گردان دما باعث افزایش میزان عدد بدون بعد ناسلت و در نتیجه بهبود انتقال حرارت خواهد گردید و
- ۳- در مقادیر پایین عدد رینولدز، تغییر در عدد ریچاردسون، نوسان چندانی در میزان عدد ناسلت ایجاد نمی‌کند. اما با افزایش رینولدز، تغییرات ناسلت به واسطه تغییر مقادیر عدد ریچاردسون قابل توجه خواهد بود.

### مراجع:

1. Mohamad, A.A. and Viskanta, R. "Stability of Lid-driven Shallow Cavity Heated from below", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 32, No. 11, pp. 2155-2166, 1989.
2. Sharif, M.A.R. "Laminar Mixed Convection in Shallow Inclined Driven Cavities with Hot Moving Lid on Top and Cooled from Bottom", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 27, pp. 1036-1042, 2007.
3. Iwatsu, R., Hyun, J., and Kuwahara, K. "Mixed Convection in a Driven Cavity with a Stable Vertical Temperature Gradient", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 36, pp. 1601-1608, 1993.
4. Khanafer, K. and Chamkha, A.J. "Mixed Convection Flow in a Lid-Driven Enclosure Filled with a Fluid-Saturated Porous Medium", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 42, pp. 2465-2481, 1999.

مطابق جدول ۴ با تغییر زاویه از مقدار ۳۰ به ۶۰ درجه، مقادیر ناسلت متوسط در مقادیر ریچاردسون و رینولدز کم، بدون تغییر می‌باشد. مشابه این رفتار برای دیگر زوایا نیز دیده می‌شود. لازم به ذکر است که در مقادیر اندک پارامترهای بیان شده، انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و طبیعی ضعیف بوده و انتقال حرارت رسانش عمده انتقال حرارت را بر عهده دارد. لذا با تغییر زاویه، تغییر محسوسی در مقادیر ناسلت متوسط مشاهده نمی‌شود. با افزایش ریچاردسون مقدار جابه‌جایی طبیعی افزایش خواهد یافت. از آنجا که جابه‌جایی اجباری تمایل دارد که سیال را از نزدیک سطح منبع حرارتی حرکت دهد در حالی که جابه‌جایی طبیعی منجر به حرکت رو به بالای سیال می‌شود، لذا با افزایش زاویه مقادیر ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. در رینولدز ۱۰۰ با افزایش زاویه مقادیر ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. به جز برای ریچاردسون ۷ و ۱۰ که مقادیر انتقال حرارت به شدت افزایش می‌یابند با مراجعه به میدان‌های دما و جریان می‌توان دریافت که در این حالت خاص به جای یک جریان چرخشی در محفظه، سه جریان گردابی تشکیل می‌شوند. به این علت، مقادیر ناسلت ناگهان افزایش شدیدی پیدا می‌کنند. البته در ریچاردسون ۰/۱ و ۲ مقدار نیروی شناوری ناچیز بوده و نه تنها چنین جریان گردابه‌ای ایجاد نمی‌شود بلکه به دلیل تقویت شدن نیروی شناوری با تغییر ریچاردسون از ۰/۱ به ۲ و از آنجا که نیروی شناوری به نوعی در خلاف جهت حرکت سیال تحت تأثیر حرکت جداره می‌باشد لذا انتقال حرارت برای ریچاردسون ۲ نسبت به ریچاردسون ۰/۱ اندکی کاسته شده ولی با افزایش بیشتر ریچاردسون به صورت ناگهانی بر مقدار ناسلت به دلیل ذکر شده افزوده می‌شود. در رینولدز ۱۰ به جز برای ریچاردسون ۰/۱ که مقدار ناسلت متوسط بدون تغییر است، دیگر مقادیر ناسلت متوسط کاهش خواهند یافت.

با توجه به داده‌های جدول ۴ به روشنی درمی‌یابیم که با افزایش کسر حجمی در هر گام، مقادیر ناسلت متوسط نیز افزایش خواهند یافت. همچنین، در بیشتر موارد دیده می‌شود که مقدار افزایش ناسلت متوسط بین سیال خالص و نانوسیال با کسر حجمی ۰/۰۲ بیشتر از افزایش انتقال حرارت بین دو حالت ۰/۰۴ و ۰/۰۶ می‌باشد در حالی که در هر دو حالت درصد یکسانی به کسر حجمی نانوذرات اضافه گردیده است.

16. Albensoeder, S. and Kuhlmann, H.C. "Three-Dimensional Instability of Two Counter-Rotating Vortices in a Rectangular Cavity Driven by Parallel Wall Motion", *Eur. J. Mech. B/Fluids*, Vol. 2, pp. 307-316, 2002.
17. Oztop, H.F. and Dagtekin, I. "Mixed Convection in Two-Sided Lid-Driven Differentially Heated Square Cavity", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 47, pp. 1761-1769, 2004.
18. Tiwari, R.K. and Das, M.K. "Heat Transfer Augmentation in a Two-Sided Lid-Driven Differentially Heated Square Cavity Utilizing Nanofluids", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 50, pp. 2002-2018, 2007.
19. Luo, W.J. and Yang, R.J. "Multiple Fluid Flow and Heat Transfer Solutions in a Two-Sided Lid-Driven Cavity", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 50, pp. 2394-2405, 2007.
20. Wahba, E.M. "Multiplicity of States for Two-Sided and Four-Sided Lid Driven Cavity Flows", *Comput. & Fluids*, Vol. 38, pp. 247-253, 2009.
21. De-Vahl-Davis, G. "Natural Convection of Air in a Square Cavity: a Benchmark Solution", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, Vol. 3, pp. 249-264, 1983.
22. Markatos, N.C. and Pericleous, K.A. "Laminar and Turbulent Natural Convection in an Enclosed Cavity", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 27, pp. 755-772, 1984.
23. Hadjisophocleous, G.V., Sousa, A.C.M., and Venart, J.E.S. "Predicting the Transient Natural Convection in Enclosures of Arbitrary Geometry Using a Nonorthogonal Numerical Model", *Numer. Heat Trans.: Part A*, Vol. 13, pp. 373-392, 1998.
24. Fusegi, T., Kuwahara, K., and Farouk, B. "A Numerical Study of Three Dimensional Natural Convection in a Differentially Heated Cubic Enclosure", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 34, pp. 1543-1557, 1991.
25. Ha, M.Y. and Jung, M.J. "A Numerical Study of Three-Dimensional Conjugate Heat Transfer of Natural Convection and Conduction in a Differentially Heated Cubic Enclosure with a Heat-Generating Cubic Conducting body", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 43, pp. 4229-4248, 2000.
5. Aydin, O. "Aiding and Opposing Mechanisms of Mixed Convection in a Shear and Buoyancy-Driven Cavity", *Int. Comm. Heat Mass Trans.*, Vol. 26, pp. 1019-1028, 1999.
6. Chamkha, A.J. "Hydromagnetic Combined Convection Flow in a Vertical Lid Driven Cavity Enclosure with Internal Heat Generation or Absorption", *Numer. Heat Trans., Part A*, Vol. 41, pp. 529-546, 2002.
7. Khanafer, K.M., Al-Amiri, A.M. and Pop, I. "Numerical Simulation of Unsteady Mixed Convection in a Driven Cavity, Using an Externally Excited Sliding Lid", *Eur. J. Mech. B Fluids*, Vol. 26, pp. 669-687, 2007.
8. Waheed, M.A. "Mixed Convective Heat Transfer in Rectangular Enclosures Driven by a Continuously Moving Horizontal Plate", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 52, pp. 5055-5063, 2009.
9. Kefayati, G.H.R., Hosseinizadeh, S.F., Gorji, M. and Sajjadi, H. "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection in Tall Enclosures Using Water/SiO<sub>2</sub> Nanofluid", *Int. Commun. Heat Mass Trans.*, Vol. 38, pp. 798-805, 2011.
10. Talebi, F., Mahmoudi, A.H., and Shahi, M. "Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Square Lid-Driven Cavity Utilizing Nanofluid", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol. 37, pp. 79-90, 2010.
11. Mazrouei-Sebdani, S., Mahmoodi, M. and Hashemi, S.M. "Effect of Nanofluid Variable Properties on Mixed Convection in a Square Cavity", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 52, pp. 112-126, 2012.
12. Alinia, M., Ganji, D.D. and Gorji-Bandpy, M. "Numerical Study of Mixed Convection in an Inclined Two Sided Lid Driven Cavity Filled with Nan-fluid Using Two-Phase Mixture Model", *Int. Comm. Heat Mass Trans.*, Vol. 38, pp. 798-805, 2011.
13. Abu-Nadaa, E. and Chamkha, A.J. "Mixed Convection Flow in a Lid-Driven Inclined Square Enclosure Filled with a Nanofluid", *Eur. J. Mech. B/Fluids*, Vol. 29, pp. 472-482, 2010.
14. Kuhlmann, H.C., Wanschura, M., and Rath, H.J. "Flow in Two-Sided Lid-Driven Cavities: Non-uniqueness, Instabilities, and Cellular Structures", *J. Fluid Mech.*, Vol. 336, pp. 267-299, 1997.
15. Kuhlmann, H.C., Wanschura, M., and Rath, H.J. "Elliptic Instability in Two-Sided Lid-Driven Cavity Flow", *Eur. J. Mech. B/Fluids*, Vol. 17, pp. 561-569, 1998.