

# تأثیر خواص متغیر بر جریان و انتقال حرارت ترکیبی در محفظه مربعی با دو دیواره متحرک پر شده از نانوسیال و توزیع دمای سینوسی

محمد همت اسفه<sup>۱</sup> و سیفا... سعدالدین<sup>۲</sup> سیدصادق میرطالبی<sup>۳</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه امام حسین (ع)

دانشگاه سمنان

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۲/۲۳)

## چکیده

در مقاله حاضر، جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در نانوسیال با ویسکوزیته دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما، اندازه قطر و غلظت نانوذرات در یک محفظه مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به‌همراه شرایط مرزی به‌وسیله روش حجم محدود با سیستم شبکه جابه‌جا شده به‌صورت عددی با استفاده از یک کد رایانه‌ای به زبان فرترن حل شده‌اند. برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی به‌ترتیب از مدل‌های نوین ارائه شده توسط زو و جانگ استفاده شده است. تأثیر افزایش نیروی شناوری هنگامی که نیروی برشی ثابت باشد و تأثیر نیروی برشی در زمانی که نیروی شناوری ثابت در نظر گرفته می‌شود، مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین تأثیرات مربوط به دما، قطر نانوذرات در سیال پایه، کسر حجمی نانوذرات، عدد گراشوف و رینولدز بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد انتقال حرارت با کاهش قطر نانوذرات برای رینولدزهای مشخص افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر اعداد رینولدز و گراشوف در قطر و کسر حجمی ثابت نیز، موجب بهبود نرخ انتقال حرارت می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** نانوسیال، خواص متغیر، جابه‌جایی ترکیبی، روش حجم محدود، الگوریتم سیمپلر، محفظه مربعی

## Influence of Variable Properties Nanofluid on Combined Convection Heat Transfer in a Two Sided Lid-Driven Enclosure with Sinusoidal Temperature Profile

M. Hemmat Esfe and S. Saedodin

Mechanical Engineering Department  
Semnan University

S.S Mir-Talebi

Mechanical Engineering Department  
Imam Hossein University

(Received: 29 October, 2013; Accepted: 13 May, 2014)

## ABSTRACT

This numerical study is focused on variation of mixed convection heat transfer and fluid flow of nanofluid with effective viscosity and thermal conductivity which are dependent on temperature and nanoparticles size and concentration inside a double lid-driven cavity. The Navier–Stokes and energy equations are obtained numerically using a FORTRAN code. New Xu's and Jang's models are used for calculating the effective thermal conductivity and the effective dynamic viscosity, respectively. The impact of increase in buoyancy force while the shear force was constant and effects of increase in shear force when the buoyancy force was kept constant were investigated. In the current work, we examine the effects of temperature, non-uniform diameter of suspended nanoparticles in base fluid, volume fraction of nanoparticle, Grashof and Reynolds number on hydrodynamic and thermal characteristics. The obtained results show that the heat transfer increases with decrease in diameter of nanoparticle for a particular Re; it also increases with increase in Grashof and Reynolds number for a particular volume fraction and diameter size.

**Keywords:** Nanofluid, Variable Properties, Mixed Convection, Finite Volume Method, Simpler Algorithm, Cavity

۱. دانشجوی دکتری

۲. دانشیار (نویسنده پاسخگو): s\_sadodin@iust.ac.ir

۳. کارشناس ارشد

## فهرست علائم

u, v	مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های افقی و عمودی، $m s^{-1}$
U, V	مؤلفه‌های بدون بعد سرعت در جهت‌های افقی و عمودی، $m s^{-1}$
$U_0$	سرعت دیواره، $m s^{-1}$
x, y	مختصات کارتزین، m
X, Y	مختصات کارتزین بدون بعد

## ۱- مقدمه

سامانه‌های گرمایشی و سرمایشی و بازده آن، یکی از مهم‌ترین موارد در صنایع مختلف و کاربردهایی از مهندسی است که به نوعی با انتقال حرارت در ارتباط است و بر این اساس بهینه کردن این سامانه‌ها در مسیر پیشرفته شدن کاربردها، امری اجتناب‌ناپذیر است. در بسیاری از موارد، در این سامانه‌ها انتقال حرارت با افزایش سطح و حجم آنها صورت می‌پذیرد که باعث افزایش هزینه‌ها و اندازه دستگاه می‌شود و این مسئله چندان مطلوب مهندسين و صنعت‌گران نیست. از سوی دیگر سیالات متداول مانند آب، الکل، اتیلن گلیکول و غیره دارای ضریب هدایت حرارتی محدود، مشخص و غیره قابل ارتقاء هستند. برای حل این مشکل به سیالات جدید با ضریب هدایت حرارتی مطلوب‌تر نیاز است. بنابراین استفاده از نانوسیالات به‌عنوان روشی نوین در این زمینه پیشنهاد شده است. نانوسیال از تعلیق یکنواخت و پایدار نانوذرات فلزی در سیال‌های متداول مانند آب و غیره پدید می‌آید. به‌دلیل وجود ذرات بسیار ریز معلق در سیال و بالا بودن ضریب هدایت حرارتی این ذرات نسبت به سیال خالص، خواص حرارتی نانوسیال بسیار مطلوب‌تر از سیال پایه است [۱]. برای مثال پتیل<sup>۱</sup> و همکاران [۲] نشان دادند که اضافه کردن مقدار درصد حجمی بسیار کمی از نانوذرات نقره در تولوئن باعث افزایش ۱۰-۷ درصدی هدایت حرارتی می‌شود. بسیاری از پژوهشگران در بررسی‌های تجربی خود، وجوه مختلفی از خواص نانوسیال را در کاربردهای مختلف مورد بررسی و توجه قرار داده‌اند [۳ و ۴]. برخی از آنها به بررسی نانوسیال در درون محفظه‌ها (حفره‌ها) پرداخته‌اند. هوانگ<sup>۲</sup> و همکاران [۵] به مطالعه انتقال حرارت در یک محفظه مستطیلی پر شده از نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم به‌صورت عددی پرداختند. آنها از مدل‌های مختلفی برای ارزیابی

Greek symbols	
$\alpha$	نفوذ حرارتی، $m^2 s^{-1}$
$\beta$	ضریب انبساط گرمایی، $K^{-1}$
$\theta$	دمای بدون بعد
$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی، $Kg m^{-1} s^{-1}$
$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی، $m^2 s^{-1}$
$\rho$	چگالی، $kg m^{-3}$
$\varphi$	کسر حجمی نانوذرات
$\gamma$	زاویه شیب محفظه
Subscripts	
c	سرد
eff	مؤثر
f	سیال
h	گرم
nf	نانوسیال
s	ذره جامد
w	دیواره
Nomenclature	
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه، $J kg^{-1} K^{-1}$
Gr	عدد گراشف
g	شتاب گرانش، $m s^{-2}$
h	ضریب انتقال حرارت، $W m^{-2} K^{-1}$
L	طول محفظه، m
$d_p$	قطر نانوذرات، n m
k	ضریب هدایت حرارتی، $W m^{-1} K^{-1}$
Nu	عدد ناسلت
p	فشار، $N m^{-2}$
P	فشار بدون بعد
q	فلاکس حرارتی، $W m^{-2}$
Re	عدد رینولدز
Ri	عدد ریچاردسون
T	دمای بدون بعد، K

1- Patel  
2- Hwang

منظرهای مختلف توسط موستامیل سلون<sup>۵</sup> و همکاران [۱۱] صورت گرفت. آنها اثرات شدید غلظت نانوذرات را در نسبت‌های منظر مختلف محفظه، مورد بررسی قرار دادند.

در تحقیقی دیگر طالبی و همکاران [۱۲]، جابه‌جایی ترکیبی در درون محفظه با دیواره متحرک پر شده از نانوسیال را با استفاده از روش حجم محدود، مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه عددی، دیواره پایینی و بالایی محفظه ایزوله و دیواره‌های جانبی در دماهای مختلف فرض شده بود. نتایج به‌دست آمده نشان داد در یک رینولدز مشخص، با افزایش کسر حجمی نانوذرات مس، انتقال حرارت در محفظه افزایش یافته است. ارزیابی میزان تأثیر خواص متغیر بر جابه‌جایی طبیعی در محفظه پر شده از نانوسیال‌های آب-اکسید آلومینیوم و آب-مس توسط ابوندا<sup>۶</sup> و همکاران [۱۳] انجام گرفت. آنها دریافتند در رینولدزهای بالا، مدل‌های مربوط به ویسکوزیته مقدار ناسلت متوسط را بسیار بیشتر از مدل‌های مربوط به ضریب هدایت حرارتی تحت تأثیر قرار می‌دهند.

مطالعه عددی دیگری توسط منصور و همکاران [۱۴] به‌منظور بررسی تأثیر کسر حجمی نانوذرات، عدد رینولدز، اندازه و مکان گرمکن و نوع نانوسیال بر جریان جابه‌جایی ترکیبی در محفظه پر شده از نانوسیال انجام گرفت. در این تحقیق یکی از دیواره‌ها متحرک بوده و گرمکن‌های مجزا روی دیواره پایینی قرار داده شده است. آنها دریافتند که با افزایش مجزای سه عامل کسر حجمی نانوذرات، طول گرمکن‌ها و عدد رینولدز میزان انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر، قاسمی و امین‌الساداتی [۱۵] به بررسی عددی جابه‌جایی ترکیبی در درون یک محفظه مثلثی پر شده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم پرداختند. در این محفظه، دیواره افقی ایزوله، دیواره متحرک در دمای ثابت پایین و دیواره سوم در دمای بالای ثابت فرض شده و تأثیر حرکت رو به بالا و رو به پایین دیواره متحرک، عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات مورد بررسی قرار گرفته است. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد به‌ازای تمامی مقادیر عدد ریچاردسون با افزایش کسر حجمی نانوذرات، نرخ انتقال حرارت در هر کدام از جهت‌های بالا و پایین، افزایش می‌یابد.

ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال استفاده کردند. ون دینگ<sup>۱</sup> [۶] بحث و بررسی خود را به بهبود انتقال حرارت در یک محفظه پر شده از نانوسیال اکسید تیتانیوم معطوف نمودند. مطالعه عددی دیگری بر روی جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه دوبعدی پر شده از نانوسیال آب-مس توسط خانافر<sup>۲</sup> و همکاران [۷] انجام شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که در یک گراش معین، نرخ انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد.

انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی که مرکب از جابه‌جایی طبیعی و اجباری است، از مهم‌ترین سازوکارهای انتقال حرارت است که در بسیاری از کاربردهای مهندسی از جمله فناوری‌های روغن‌کاری، رشد کریستالی، صنایع خشک کردن، صنایع غذایی، پروسه‌های شیمیایی، دستگاه‌های خنک‌کننده الکترونیکی و غیره اتفاق می‌افتد. به‌علت اندرکنش نیروهای شناوری و برشی، جابه‌جایی ترکیبی یک پدیده پیچیده بوده که اهمیت فراوان کاربردی آن به‌ویژه در محفظه‌های پر شده از نانوسیال باعث انجام مطالعات و پژوهش‌های مختلف توسط دانشمندان گردیده است.

تیواری و داس<sup>۳</sup> [۸] مطالعه عددی بر روی افزایش انتقال حرارت در یک محفظه مربعی پر شده از نانوسیال آب-مس با دیواره‌های جانبی متحرک با دماهای ثابت متفاوت و دیواره‌های فوقانی و تحتانی ایزوله انجام دادند. مطالعه آنها بر روی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله کسر حجمی نانوذرات و عدد ریچاردسون در محفظه تمرکز داشت. نتایج این تحقیق نشان داد برای عدد ریچاردسون برابر با یک، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش عدد ناسلت می‌شود. مشکل اساسی در مدل‌های کلاسیک، ناکارآمدی و ناتوانی آنها در تخمین صحیح ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیال است [۹]. هو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۰] چهار مدل مختلف به‌منظور محاسبه ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال آب-آلومینا برای جابه‌جایی طبیعی درون محفظه ارائه کردند. استنتاج آنها این بود که مدل‌های مورد استفاده برای تخمین این خواص در نانوسیالات، نقش بسیار مهمی در پیش‌بینی انتقال حرارت در محفظه‌ها برای مطالعات عددی ایفا می‌کند.

ارزیابی انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه پر شده از نانوسیال آب-مس با یک دیواره متحرک برای نسبت

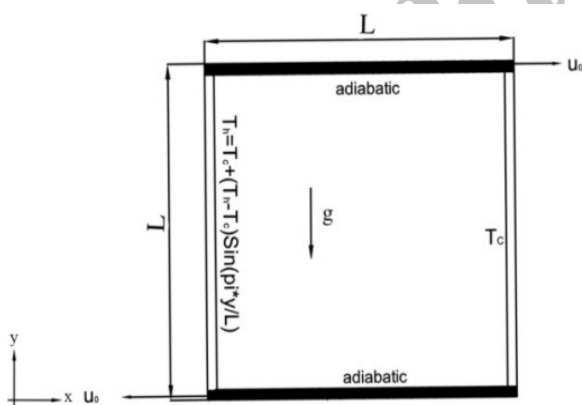
5-Muthtamilselvan  
6- Abu-Nada

1- Wen and Ding  
2- Khanafar  
3-Tiwari and Das  
4- Ho

مورد بررسی قرار گرفته است در حالی که دیواره سمت چپ این کاواک حفره دارای پروفیل دمای غیریکنواخت سینوسی بوده و دیواره سمت راست آن در دمای ثابت پایین ( $T_c$ ) فرض شده است. تاکنون هیچ بررسی و پژوهشی درباره جابه‌جایی ترکیبی با خواص متغیر<sup>۳</sup> در محفظه با دو دیواره متحرک پر شده از نانوسیال، با پروفیل دمای غیریکنواخت 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. در این مقاله، تأثیر پارامترهایی مانند عدد رینولدز، عدد ریچاردسون، دما، کسر حجمی نانوذرات و قطر نانوذرات بر روی هیدرودینامیک و خواص حرارتی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- مدل‌سازی ریاضی

شکل ۱ شماتیک هندسه مورد مطالعه در این تحقیق که عبارت از محفظه با دو دیواره متحرک است، را نشان می‌دهد. این محفظه با نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم پر شده که اندازه نانوذرات معلق در آب، متفاوت و غیریکنواخت فرض شده‌اند. آن‌گونه که در شکل مشخص است این محفظه دارای دیواره گرم در سمت چپ، و دیواره سرد در سمت راست است که دیواره سمت چپ به صورت سینوسی گرم می‌شود و دما در نقاط مختلف این دیواره تفاوت دارد.



شکل (۱): دیاگرام شماتیک محفظه با دو دیواره متحرک در تحقیق حاضر.

دو دیواره متحرک فوقانی و تحتانی آدیاباتیک فرض شده‌اند. خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آلومینیوم در دمای مرجع در جدول ۱ آمده است.

به‌تازگی عارف‌منش و محمودی [۱۶] در یک شبیه‌سازی عددی، به بررسی تأثیرات نامعین مدل‌های ویسکوزیته دینامیکی برای نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه پرداخته‌اند. محفظه مربعی مورد مطالعه دارای دیواره سرد در بالا و دیواره گرم متحرک پایین بوده و تأثیر 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.

اخیراً تحقیقی عددی در مورد جابه‌جایی آزاد جریان سیال و انتقال حرارت درون یک محفظه مربعی که با نانوسیال مس - آب پر شده است و درون آن موانع آدیاباتیک مربعی وجود دارند، توسط محمودی و مزروعی انجام شده است [۱۷]. آنها نشان دادند که با افزایش اندازه موانع مربعی در اعداد رایلی پایین، نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد و عکس این مطلب در مورد اعداد رایلی بزرگ صادق است. مطالعه ارزشمند دیگری در مورد اثر خواص متغیر نانوسیال بر روی جریان جابه‌جایی ترکیبی درون یک محفظه مستطیلی توسط مزروعی سبذانی و همکاران [۱۸] صورت گرفته است.

در مطالعه حاضر به بررسی تأثیرات دما، کسر حجمی نانوذرات و قطر نانوذرات معلق در سیال پایه بر روی ویسکوزیته دینامیکی و هدایت حرارتی نانوسیالات در انتقال حرارت کاواک حفره بر پایه جدیدترین مدل‌های ارائه شده بر پایه تحقیقات تجربی پرداخته می‌شود. برای محاسبه ویسکوزیته از تازه‌ترین مدل‌های ارائه شده توسط جانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۱۹] همچنین ابوند و همکاران [۲۰] و برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی از مدل ارائه شده توسط زو<sup>۲</sup> و همکاران [۲۱] استفاده شده است. استفاده از مدل خواص متغیر در هندسه‌ای جدید وجه تمایز این تحقیق با تحقیق پیشین همت و همکاران [۲۲] می‌باشد. مدل‌های مذکور، وابسته به پارامترهایی مانند قطر نانوسیال، نسبت قطر‌ها، دما، کسر حجمی نانوذرات و غیره می‌باشد. این در حالی است که در مدل‌های کلاسیک دما و اندازه قطر نانوذرات در محاسبه ویسکوزیته و یا ضریب هدایت حرارتی مورد توجه قرار نمی‌گرفت. این مدل‌ها به‌منظور بررسی جابه‌جایی ترکیبی در محفظه مربعی با دو دیواره متحرک پر شده از نانوسیال اکسید آلومینیوم - آب

1- Jang

2- Zou

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

**ضریب پخش حرارتی و چگالی مؤثر نانوسیال:** ضریب پخش حرارتی و چگالی مؤثر نانوسیال عبارتند از:

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

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

**ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی:** در نانوسیالات ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

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

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

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

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

این مدل معتبر توسط جانگ و همکاران [۱۹] برای سیال پایه خالص دارای ذرات نانو کروی شکل (نانوسیالات) ارائه شده است. برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم، ثابت تجربی  $\epsilon$  و  $\eta$  به ترتیب برابر ۰/۲۵- و ۲۸۰ هستند.

ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه با رابطه پیشنهاد شده توسط ابوندا و همکاران [۲۰] تخمین زده شده است. نکته مهم در این رابطه تغییر ویسکوزیته سیال پایه (آب) با دما است. از رابطه زیر برای محاسبه ویسکوزیته آب استفاده می‌شود:

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

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

**ضریب هدایت حرارتی ساکن بدون بعد:** ضریب هدایت حرارتی نانوذرات در سیال در حالت سکون از رابطه معروف به همیلتون و کروسر<sup>[۲۳]</sup> به دست می‌آید که:

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

**ضریب هدایت حرارتی کلی بدون بعد نانوسیال:** این مدل برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی توسط زو و همکاران پیشنهاد شده است. ترم دوم این معادله ضریب هدایت

برای نیروی شناوری ایجاد شده ناشی از تغییرات چگالی از تقریب بوزینسک استفاده می‌شود. معادلات بقای جرم، مومنوم در راستای  $x$ ،  $y$  و انرژی برای حالت جابه‌جایی ترکیبی، سیال غیرقابل تراکم به صورت معادلات (۴-۱) بیان می‌شوند. در این معادلات، جریان حالت آرام و دائم فرض شده است و شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها برقرار است.

**جدول (۱): خواص ترموفیزیکی.**

Physical properties	Fluid phase (Water)	Solid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
Cp(J/kg K)	۴۱۷۹	۷۶۵
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
K (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	۰/۶	۲۵
$\beta \times 10^{-5}$ (1/K)	۲۱	۰/۸۵
$\mu \times 10^{-4}$ (kg/ms)	۸/۹	-----
dp (nanometer)	-----	۴۷

معادلات حاکم برای جریان تراکم‌ناپذیر، آرام و پایدار به صورت زیر است:

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

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

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

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

پارامترهای بدون بعد عبارتند از:

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

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

بنابراین:

$$\text{Re} = \frac{\rho_f u_0 L}{\mu_f}, \quad \text{Ri} = \frac{Ra}{\text{Pr} \cdot \text{Re}^2}, \quad Ra = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f \alpha_f}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu_f}{\alpha_f}. \quad (6)$$

فرم بدون بعد معادلات حاکم (۴-۱) بدین صورت است:

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

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

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

با جایگذاری معادله‌های (۱۸ و ۱۹) در معادله (۱۷)، عدد ناسلت برای دیواره داغ سمت چپ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Nu = -\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right)\left(\frac{\partial\theta}{\partial x}\right). \quad (22)$$

مقدار عدد ناسلت متوسط هم از معادله (۲۱) به دست می‌آید:

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dy. \quad (23)$$

**شرایط مرزی:** شرایط مرزی مطالعه حاضر به صورت ریاضی این گونه بیان می‌شود:

$$\text{دیواره چپ: } \begin{cases} U = V = 0, \\ \theta = \sin(\pi Y), \end{cases}$$

$$\text{دیواره راست: } \begin{cases} U = V = 0, \\ \theta = 0, \end{cases}$$

$$\text{دیواره تحتانی: } \begin{cases} U = -1, V = 0, \\ \frac{\partial\theta}{\partial Y} = 0, \end{cases}$$

$$\text{دیواره فوقانی: } \begin{cases} U = 1, V = 0, \\ \frac{\partial\theta}{\partial Y} = 0. \end{cases}$$

### ۳- روش عددی

در تحقیق حاضر، محاسبات با استفاده از کد رایانه‌ای فترن صورت گرفته است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی به وسیله روش حجم محدود با سامانه شبکه جابه‌جاشده 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 قرارداد شده است:

$$\text{Error} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\zeta^{t+1} - \zeta^t|}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n |\zeta^{t+1}|} \leq 10^{-7}, \quad (24)$$

که در آن،  $m$  و  $n$  نشان دهنده تعداد نقاط شبکه در جهت‌های  $X$  و  $Y$  بوده و  $t$  نشان دهنده تعداد تکرارهاست. برای بررسی میزان وابستگی نتایج به شبکه انتخاب شده، آزمون استقلال شبکه

حرارتی بر پایه جابه‌جایی حرارتی ناشی از حرکت براونی می‌باشد.

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

$C$  یک ثابت تجربی است که در ارتباط با لایه مرزی حرارتی و نوع سیال پایه بوده (مثلاً برای آب دیونیزه برابر ۸۵ و برای اتیلن گلیکول ۲۸۰ می‌باشد) ولی مستقل از نوع نانوذر است.  $Nu_p$  عدد ناسلت برای سیال در حال گردش در اطراف نانوذر است و در این مطالعه برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. در مطالعه حاضر قطر مولکولی سیال برای آب برابر  $d_f = 4.5 \times 10^{-10} m$  است. میزان بعد فراکتالی  $D_f$  نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن،  $d_{p,max}$  و  $d_{p,min}$  اندازه قطرهای بیشینه و کمینه نانوذر معلق در سیال هستند. اندازه‌گیری نسبت این قطرها به وسیله قطر میانگین نانوذر و روابط زیر صورت می‌گیرد. نسبت  $d_{p,min}/d_{p,max}$  با  $R$  به عنوان توریع فراکتالی نشان داده شده است.

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

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

### عدد ناسلت:

$$Nu = \frac{hL}{k_f}, \quad (19)$$

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

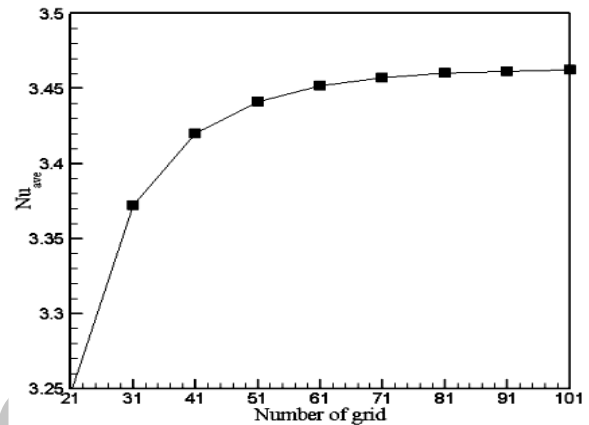
$$h = \frac{q_w}{T_h - T_c}, \quad (20)$$

$$k_{nf} = \frac{-q_w}{\partial T / \partial X}. \quad (21)$$

**جدول (۲):** مقایسه مطالعات پیشین پیرامون محفظه با سیال پایه هوا نسبت به نتایج مطالعه حاضر در رایلی‌های مختلف بر مبنای عدد ناسلت.

	Present study	Lin et al. [23]	Tiwari and Das [7]	Hadjisophocleous et al. [24]
(a) $Ra=10^3$				
$u_{max}$	۳/۶۱۹	۳/۵۹۷	۳/۶۴۲	۳/۵۴۴
$Y$	۰/۸۱۱	۰/۸۱۹	۰/۸۰۴	۰/۸۱۴
$v_{max}$	۳/۶۹۷	۳/۶۹۰	۳/۷۰۲۶	۳/۵۸۶
$X$	۰/۱۸۰	۰/۱۸۱	۰/۱۷۸	۰/۱۸۶
$Nu_{ave}$	۱/۱۱۴	۱/۱۱۸	۱/۰۸۷۱	۱/۱۴۱
(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	۶۶/۴۶۹۸۷	۶۵/۵۸۶۶	۶۶/۴۲
$Y$	۰/۸۷۳	۰/۸۶۸۵۱	۰/۸۳۹	۰/۸۹۷
$v_{max}$	۲۲۱/۷۴۸	۳۳۹۵۰ ۲۲۲	۷۳۶۱ ۲۱۹	۲۲۶/۴
$X$	۰/۰۳۹۸	۰/۰۳۸۰۴	۰/۰۴۲۳۷	۰/۰۲۰۶
$Nu_{ave}$	۸/۷۹۵	۸/۷۵۷۹۳۳	۸/۸۰۳	۱۰/۳۹

بر روی یک محفظه نمونه با چندین شبکه متفاوت انجام شده است. هفت شبکه یکنواخت  $۲۱ \times ۳۱ \times ۳۱$ ،  $۳۱ \times ۴۱ \times ۴۱$ ،  $۴۱ \times ۵۱ \times ۵۱$ ،  $۵۱ \times ۶۱ \times ۶۱$ ،  $۶۱ \times ۷۱ \times ۷۱$ ،  $۷۱ \times ۸۱ \times ۸۱$  و  $۹۱ \times ۱۰۱ \times ۱۰۱$  به این منظور مورد بررسی قرار گرفته و برای هر یک از این شبکه‌ها، میزان عدد ناسلت متوسط بر روی دیواره داغ به دست آمده است. شکل ۲ میزان ناسلت متوسط متناظر با انتخاب هر یک از این شبکه‌ها را در دو حالت مجزا نمایش می‌دهد.

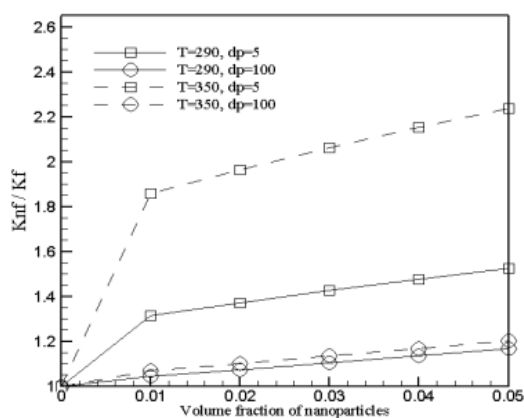


شکل (۲): بررسی شبکه بر مبنای عدد ناسلت.

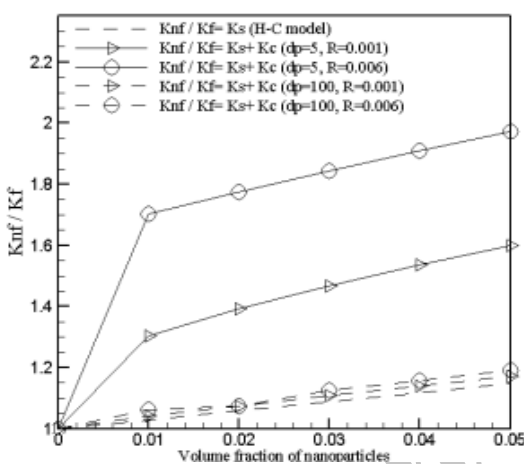
بر این اساس شبکه نقاط  $۹۱ \times ۹۱$ ، با توجه به دقت قابل قبول نتایج از یک سو و افزایش شدید زمان حل برنامه رایانه‌ای با افزایش تعداد نقاط شبکه از سوی دیگر برای حل مسئله انتخاب شده است. برای اطمینان از صحت نتایج برنامه رایانه‌ای به حل عددی مسئله انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد هوا، در یک محفظه مربع شکل پرداخته می‌شود. این مسئله توسط محققین بسیاری از جمله مراجع [۸، ۲۴ و ۲۵] حل شده است.

در جدول ۲ مقایسه میان میزان عدد ناسلت متوسط تحقیق حاضر و سایر تحقیقات آورده شده است. این نتایج، انطباق خوبی را میان نتایج کد حاضر با سایر مراجع گزارش شده نشان می‌دهد. به منظور حصول اطمینان قطعی از صحت و دقت کد مورد استفاده در این تحقیق، نتایج به واسطه پژوهش ابوندا و چامخا [۱۳] بر روی محفظه مربعی، اعتبارسنجی شده است. در این نمونه کسر حجمی ۵٪ از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در ریچاردسون‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از حل معادلات حاکم در فرم عدد بدون بعد ناسلت، نشان دهنده تطابق مطلوبی میان تحقیق حاضر و این مطالعه است.

روی دیواره‌ها، یک گردابه ساعتگرد در محفظه تشکیل می‌شود که مرکز آن منطبق با مرکز محفظه مربعی است.



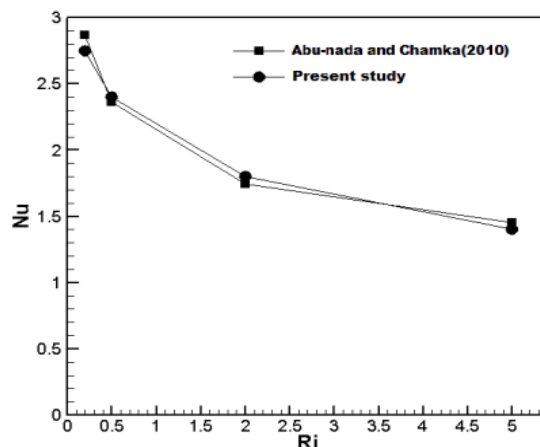
(الف)



(ب)

شکل (۴): ضریب هدایت حرارتی بدون بعد نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم بر حسب کسر حجمی با قطرهای مختلف نانوذرات و نسبت قطرها برای الف) دمای ۳۰۰ درجه و ب) توزیع فراکتالی ۰/۰۰۴.

با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش نیروی برشی، اثر انتقال حرارت جابه‌جایی بیشتر می‌شود (شکل ۶). چنان‌چه در این شکل مشاهده می‌شود، خطوط هم‌دما به دیواره‌های غیر آدیاباتیک نزدیک می‌شود که نشان دهنده گرادیان بالای دما در این نواحی است. خطوط جریان نیز نشان می‌دهند که نیروی برشی بیشتر شده و قدرت جریان بیشتر می‌شود. در این حالت نیز، افزایش کسر حجمی تاثیر چندانی بر الگوی جریان و دما در محفظه ندارد.



شکل (۳): تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد ریچاردسون در تحقیق حاضر و مطالعه ابوندا و چامخا [۱۳].

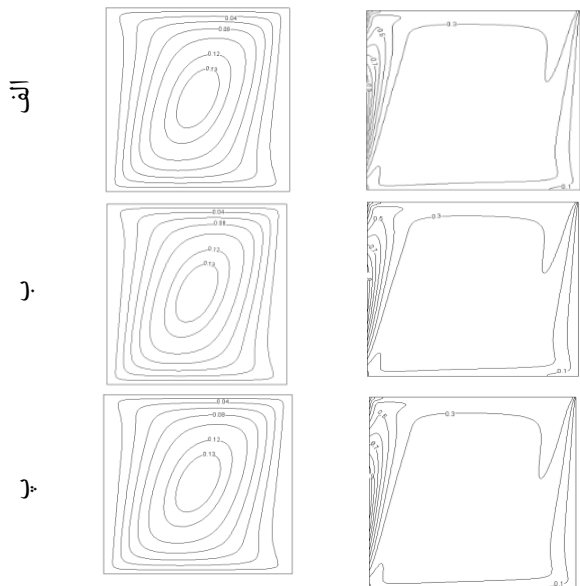
به‌منظور ارزیابی مدل زو، شکل ۴ مشخصه‌های ضریب هدایت حرارتی را که تابعی از قطر نانوذرات، دما و نسبت قطرها هستند را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها این مدل با مدل قدیمی هم‌پایه‌توان کروسر مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، نسبت قطر کمینه به بیشینه ( $R$ ) تأثیر قابل توجهی برای قطرهای نانوذرات کوچک نسبت به بزرگ دارد.

#### ۴- بحث و بررسی پیرامون نتایج

اثر افزایش نیروی برشی و کسر حجمی نانوذرات بر الگوی جریان و دما در یک محفظه مربعی پر شده از نانوسیال با کسرهای حجمی مختلف نانوذرات و قطر ۴۷ نانومتر، عدد گراشف  $10^4$  و دمای ۳۰۰ درجه در شکل‌های ۷-۵ نشان داده شده است. شکل ۵ مربوط به عدد رینولدز ۱ است. چنان‌چه در این شکل مشخص است، در این محدوده پارامترها، انتقال حرارت به‌طور عمده از طریق هدایت حرارتی صورت می‌گیرد. خطوط دمای ثابت نشان می‌دهند که گرادیان دمای چندانی در نزدیکی دیواره‌های هم‌دما وجود ندارد و توزیع این خطوط در محفظه نیز یکنواخت است که نشان دهنده هدایت حرارتی می‌باشد. افزایش کسر حجمی نانوذرات، تأثیر چندانی بر توزیع دما در این محفظه ندارد. الگوی جریان در این محفظه نشان می‌دهد که نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره فوقانی، تأثیر چندانی بر خطوط جریان ندارد. در این محدوده پارامترهای تحت بررسی، الگوی جریانی کاملاً متقارن در محفظه مشاهده می‌شود. در اثر نیروی برشی ناشی از حرکت دیواره فوقانی و نیروی شناوری ناشی از اختلاف دمای



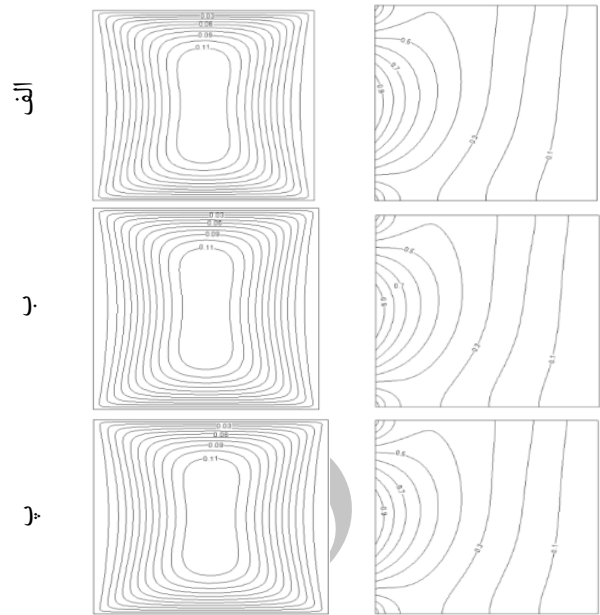
مقدار، الگوی جریان و دما در محفظه به طور کامل نسبت به اعداد رینولدز کوچک تر تغییر می کند. در این عدد رینولدز نواحی لایه مرزی حرارتی در کناره دیواره ها به وضوح مشاهده می شود و همچنین ناحیه مرکزی محفظه همدماست. افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به کاهش گرادیان دما در نواحی مجاور دیواره ها می شود که به دلیل افزایش هدایت حرارتی رخ می دهد. خطوط جریان نیز تشکیل یک گردابه ساعتگرد با ناحیه مرکزی بیضوی شکل را نشان می دهد.



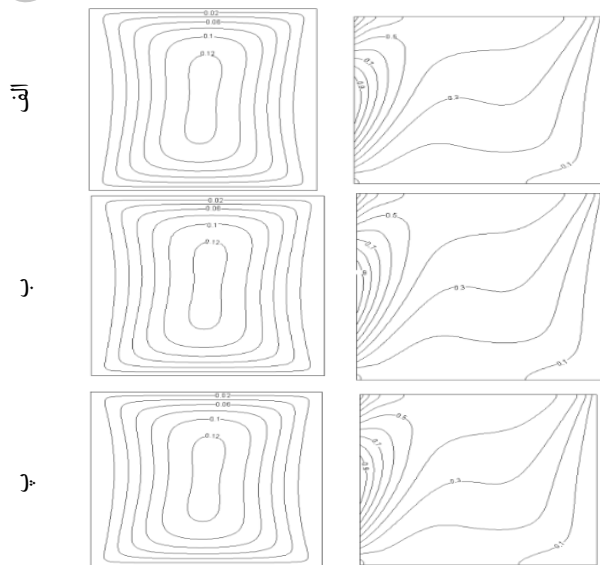
شکل (۷): خطوط جریان (سمت چپ) و خطوط همدم (سمت راست) برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با قطر ۴۷ نانومتر، عدد گراشف  $10^4$ ، عدد رینولدز ۱۰۰ و دمای ۳۰۰ درجه برای کسر حجمی الف (۰/۰۱، ب) ۰/۰۳ و ج) ۰/۰۵.

اثر افزایش نیروی شناوری در یک عدد رینولدز ثابت بر الگوی جریان و دما در یک محفظه مربعی حاوی نانوسیال با کسرهای حجمی گوناگون و قطر نانوذرات ۴۷ نانومتر، دمای ۳۰۰ درجه و عدد رینولدز ۱۰۰ در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. در شکل ۸ نتایج مربوط به عدد گراشف  $10^3$  نشان داده شده است.

همان گونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، در این اعداد گراشف و رینولدز، انتقال حرارت عمدتاً از طریق جابه جایی صورت می گیرد. این پدیده را می توان از شکل گیری خطوط همدمای متراکم در نزدیکی دیواره گرم دریافت. با افزایش کسر حجمی نانوذرات از این ضخامت کاسته می شود که در نتیجه افزایش



شکل (۵): خطوط جریان (سمت چپ) و خطوط همدم (سمت راست) برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با قطر ۴۷ نانومتر، عدد گراشف  $10^4$ ، عدد رینولدز ۱ و دمای ۳۰۰ درجه برای کسر حجمی الف (۰/۰۱، ب) ۰/۰۳ و ج) ۰/۰۵.

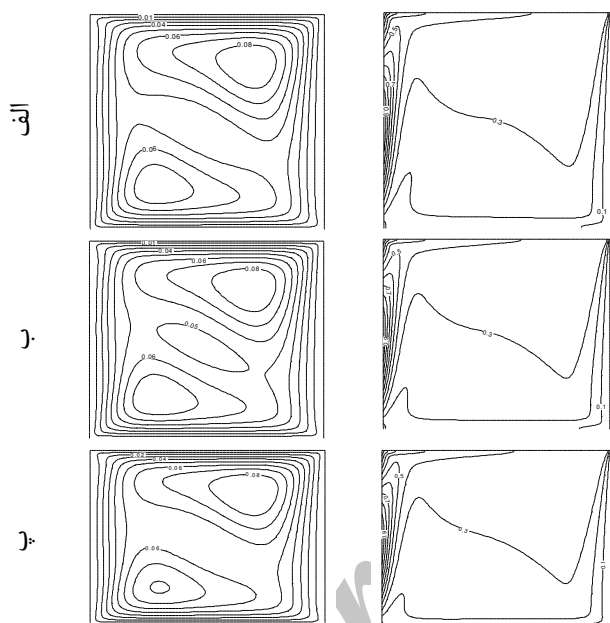


شکل (۶): خطوط جریان (سمت چپ) و خطوط همدم (سمت راست) برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با قطر ۴۷ نانومتر، عدد گراشف  $10^4$ ، عدد رینولدز ۱۰ و دمای ۳۰۰ درجه برای کسر حجمی الف (۰/۰۱، ب) ۰/۰۳ و ج) ۰/۰۵.

نتایج مربوط به عدد رینولدز ۱۰۰ در شکل ۷ ترسیم شده است. این شکل نشان می دهد که با افزایش نیروی برشی تا این

افزایش کسر حجمی نانوذرات به  $0/05$  بار دیگر دو گردابه در محفظه تشکیل می‌شود.

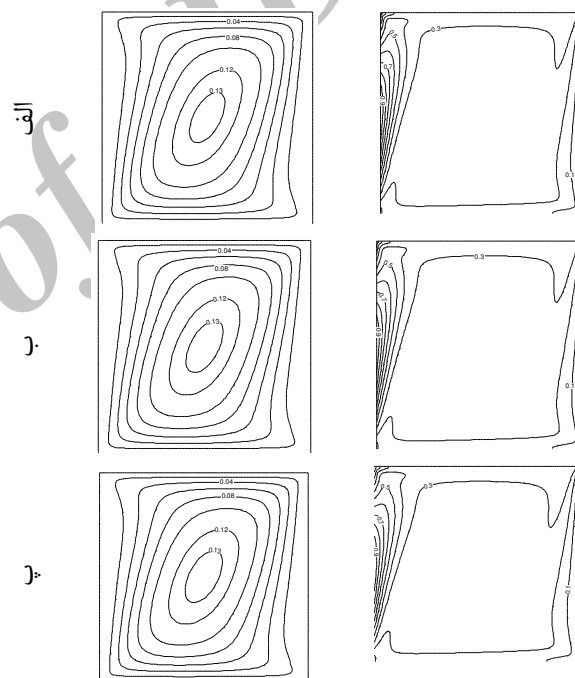
اثر تغییرات عدد رینولدز، قطر و کسر حجمی نانوذرات بر میزان انتقال حرارت در محفظه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل دما برابر با  $300$  درجه، عدد گراشف  $10^4$  قرار داده شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود، برای کلیه حالت‌های در نظر گرفته با افزایش کسر حجمی نانوذرات میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. به‌علاوه هنگامی که قطر نانوذرات ثابت باشد، با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش نیروی برشی می‌توان میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین در یک عدد رینولدز ثابت، با افزایش قطر نانوذرات میزان انتقال حرارت کاهش می‌یابد.



**شکل (۹):** خطوط جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با قطر  $47$  نانومتر، عدد گراشف  $10^5$ ، عدد رینولدز  $100$  و دمای  $300$  درجه برای کسر حجمی، الف)  $0/01$ ، ب)  $0/03$  و پ)  $0/05$ .

اثر افزایش عدد گراشف، قطر و کسر حجمی نانوذرات بر میزان انتقال حرارت در محفظه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این حالت مشاهده می‌شود که به ازای تمامی پارامترهای در نظر گرفته شده، با افزایش کسر حجمی نانوذرات میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

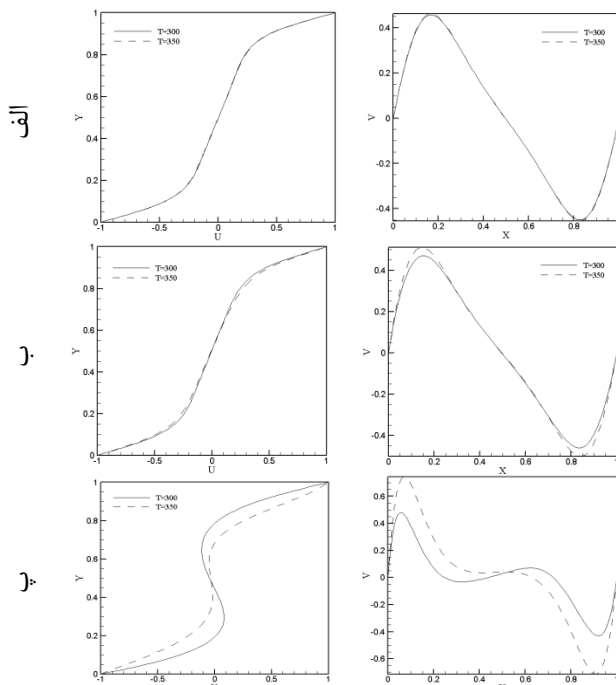
هدایت حرارتی نانوسیال است. خطوط جریان نیز نشان‌دهنده شکل‌گیری یک گردابه اصلی ساعتگرد با هسته بیضی شکل می‌باشند. الگوی خطوط جریان با افزایش کسر حجمی نانوذرات تغییر چندانی نمی‌کند. نتایج مربوط به عدد گراشف  $10^4$  پیشتر در شکل ۷ نشان داده شده است که تفاوت چندانی با نتایج عدد گراشف  $10^3$  نداشته و پدیده‌های مشاهده شده و ذکر شده در شکل ۸ در این مورد نیز صدق می‌کند. با افزایش عدد گراشف به  $10^5$  شکل ۹ الگوی جریان و دما درون محفظه تغییر می‌کند. هرچند در این حالت هنوز لایه‌های مرزی حرارتی در کناره‌های دیواره‌ها به چشم می‌خورد ولی ناحیه مرکزی محفظه، دیگر هم‌دما نیست.



**شکل (۸):** خطوط جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با قطر  $47$  نانومتر، عدد گراشف  $10^3$ ، عدد رینولدز  $100$  و دمای  $300$  درجه برای کسر حجمی الف)  $0/01$ ، ب)  $0/03$  و پ)  $0/05$ .

تداخل نیروهای شناوری و برشی در این حالت باعث می‌شود که ناحیه مرکزی گردابه اصلی به چند گردابه کوچک‌تر بشکند. در کسر حجمی  $0/01$  دو گردابه درونی کوچک‌تر در نزدیک دیواره‌های فوقانی و تحتانی شکل می‌گیرد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات به  $0/03$  سه گردابه مشاهده می‌شود. اما با

در سرعت‌ها در خط میانی محفظه به واسطه تغییر دما به وجود آمده است.

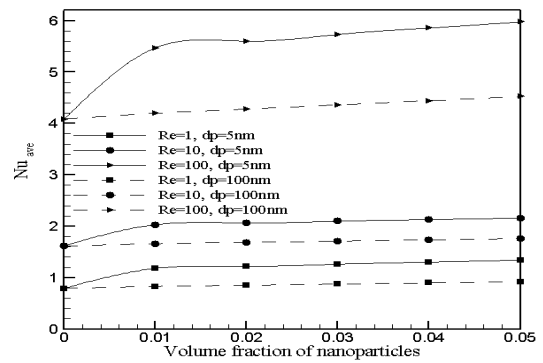


شکل (۱۲): اثر تغییرات دما بر سرعت‌های عمودی و افقی در خط میانی محفظه در کسر حجمی ۰/۰۵، رینولدز ۱۰۰ و قطر نانوذرات ۵ نانومتر برای اعداد گراش (الف)  $10^3$ ، (ب)  $10^4$  و (پ)  $10^5$ .

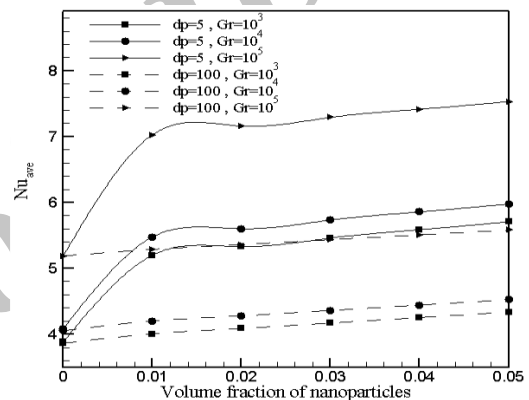
#### ۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر تأثیر خواص متغیر نانوسیال بر انتقال حرارت ترکیبی در محفظه مربعی با دو دیواره متحرک و پخش دمای سینوسی به صورت عددی و با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر مورد بررسی قرار گرفت. کد مورد استفاده به واسطه قیاس با نتایج به دست آمده توسط پژوهشگران مختلف در انتقال حرارت ترکیبی در محفظه پر شده از هوا و نانوسیال به صورت مجزا، معتبرسازی شد. در این کد تأثیرات ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی متغیر بر روی خطوط جریان و هم‌دما در محفظه لحاظ شده و نتایج به دست آمده در این بررسی‌ها به شرح زیر است:

۱- با افزایش عدد رینولدز و ثابت بودن عدد گراش، جابه‌جایی اجباری افزایش یافته و باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود.



شکل (۱۰): تغییرات عدد رینولدز نسبت به کسر حجمی نانوذرات در گراش  $10^4$  و دمای  $300$  درجه برای مقادیر مختلف قطر نانوذرات و عدد رینولدز.



شکل (۱۱): تغییرات عدد رینولدز نسبت به کسر حجمی نانوذرات در رینولدز  $100$  و دمای  $300$  درجه برای مقادیر مختلف قطر نانوذرات و عدد گراش.

همچنین به ازای مقدار ثابت قطر نانوذرات با افزایش عدد گراش و افزایش نیروی شناوری، مقدار انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. در یک عدد گراش ثابت با افزایش قطر نانوذرات مقدار انتقال حرارت کاهش می‌یابد. شکل ۱۲ اثر تغییرات دما را بر سرعت‌های عمودی و افقی در خط میانی محفظه برای اعداد گراش مختلف نشان می‌دهد. در این شکل‌ها، بررسی‌ها بر مبنای کسر حجمی ۰/۰۵، رینولدز  $100$  و قطر نانوذرات  $5$  نانومتر انجام شده است.

همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، در اعداد گراش پایین‌تر، تفاوت میان سرعت‌های عمودی و افقی در دماهای  $300$  و  $350$  درجه نامحسوس می‌باشد. این در حالی است که با افزایش عدد گراش و به تبع آن افزایش نیروی شناوری، تفاوت آشکاری

- Nanofluids”, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 10, pp. 2002-2018, 2007.
9. Hemmat Esfe, M., Saedodin, S., and Mahmoodi, M. “Experimental Studies on the Convective Heat Transfer Performance and Thermophysical Properties of Mgo–Water Nanofluid under Turbulent Flow”, *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, Vol. 52, No. 1, pp. 68–78, 2014.
  10. Ho, C.J., Chen, M.W., and Li, Z.W. “Numerical Simulation of Natural Convection of Nanofluid in a Square Enclosure: Effects Due to Uncertainties of Viscosity and Thermal Conductivity”, *Int. J. Heat Mass Tran.*, Vol. 51, No. 1, pp. 4506-4516, 2008.
  11. Muthamilselvan, M., Kandaswamy, P., and Lee, J. “Heat Transfer Enhancement of Copper-Water Nanofluids in A Lid-Driven Enclosure”, *Commun. Nonlinear, Sci. Numer. Simulat.*, Vol. 15, No. 6, pp. 1501-1510, 2010.
  12. Talebi, F., Mahmoodi, A.H., and Shahi, M. “Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Square Lid-Driven Cavity Utilizing Nanofluid”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 1, pp. 79-90, 2010.
  13. Abu-Nada, E. and Chamkha, A.J. “Mixed Convection Flow in a Lid Driven Square Enclosure Filled with a Nanofluid”, *Eur. J. Mech., B/Fluids* Vol. 29, No. 6, pp. 472-482, 2010.
  14. Mansour, M.A., Mohamed, R.A., Abd-Elaziz, M.M., and Ahmed, S.E. “Numerical Simulation of Mixed Convection Flows in a Square Lid-Driven Cavity Partially Heated from Below Using Nanofluid”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 10, pp. 1504-1512, 2010.
  15. Ghasemi, B. and Aminossadati, S.M. “Mixed Convection in a Lid-Driven Triangular Enclosure Filled with Nanofluids”, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, No. 8, pp. 1142-1148, 2010.
  16. Arefmanesh, A. and Mahmoodi, M. “Effects of Uncertainties of Viscosity Models for Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e water Nanofluid on Mixed Convection Numerical Simulations”, *Int. J., Thermal Sci.*, Vol. 50, No. 9, pp. 1706-1719, 2011.
  17. Mahmoodi, M. and Mazrouei Sebdani, S. “Natural Convection in a Square Cavity Containing a Nanofluid and an Adiabatic Square Block at the Center”, *Superlattice Microst.*, Vol. 52, No. 2, pp. 261-275, 2012.
  18. Mazrouei Sebdani, S., Mahmoodi, M., and Hashemi, S.M. “Effect of Nanofluid Variable Properties on Mixed Convection in a Square Cavity”, *Int. J., Thermal Sci.*, Vol. 52, No. 1, pp. 112–126, 2012.
  19. Jang, S.P., Lee, J.H., Hwang, K.S., and Choi, S.U.S. “Particle Concentration and Tube Size Dependence of Viscosities of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluids Flowing Through Micro- and Minutubes”, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 91, No. 24, pp. 243112-243113, 2007.
  20. Abu-Nada. E., Masoud., Z.H.F., Oztop. F., and Compo, A. “Effect of Nanofluid Variable Properties همچنین در رینولدزهای بالا (حدود ۱۰۰)، با کاهش قطر نیز نرخ انتقال حرارت افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد.
  - ۲- ثابت بودن مقدار عدد رینولدز و افزایش عدد گراشف، باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. در تمامی مقادیر گراشف مورد بررسی در این نوشتار، وجود نانوذرات در سیال پایه باعث افزایش نرخ انتقال حرارت در محفظه شد.
  - ۳- در مقادیر پایین عدد گراشف، اختلاف میان سرعت افقی و عمودی در دماهای مختلف محسوس نیست در حالی که با افزایش عدد گراشف تفاوت‌های عمده و قابل توجهی در سرعت‌های عمودی و افقی (در خط میانی) در دماهای ۳۰۰ و ۳۵۰ درجه مشاهده می‌شود.
  - ۴- در مقادیر بالای عدد گراشف و رینولدز، افزودن بر کسر حجمی نانوذرات تأثیر قابل توجهی بر الگوی خط جریان و توزیع دما در درون محفظه دارد.
- ### ۶- مراجع
1. Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., and Keblinski, P. “Nanofluids”, *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 6, No. 1, pp. 757-773, 2004.
  2. Patel, H.E., Das, S.K., Sundararajan, T., Nair, A.S., George, B. and Pradeep, T. “Thermal Conductivity of Naked and Monolayer Protected Metal Nanoparticles Based Nanofluids. Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical”, *Effects. Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, No. 14, pp. 2931-2933, 2003.
  3. Nazari, M., Kayhani, M., and Soltanzadeh, H. “Experimental Study of Heat Transfer of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Water Nanofluid through Horizontal Tube. *Aero. Mech. J.*, Vol. 9, No. 1, pp. 45-52, 2013 (In Persian).
  4. Godson, L.B, Raja, D.M., and Lal, S. “Wongwises, Enhancement of Heat Transfer Using Nanofluids an Overview”, *Renewable Sustainable Energy Review*, Vol. 14, No.2, pp. 629-641, 2010.
  5. Hwang, K.S., Lee, J.H., and Jang, S.P. “Buoyancy-Driven Heat Transfer of Water-Based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids in a Rectangular Cavity”, *Int. J. Heat and Mass Transfer.*, Vol. 50, No. 20, pp. 4003-4010, 2007.
  6. Wen, D. and Ding, Y. “Formulation of Nanofluids for Natural Convective Heat Transfer Applications”, *Int. J. Heat and Fluid Flow.*, Vol. 26, No. 6, pp. 855-864, 2005.
  7. Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M. “Buoyancy Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nano Fluids”, *Int. J. Heat and Mass.* Vol. 46, No. 19, pp. 3639-3653, 2003.
  8. Tiwari, R.K. and Das, M.K. “Heat Transfer Augmentation in a Two-Sided Lid-Driven Differentially Heated Square Cavity Utilizing

23. 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.
24. Lin, K.C. and Violi, A. "Natural Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Vertical Cavity: Effects of Non-Uniform Particle Diameter and Temperature on Thermal Conductivity", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 2, pp. 236-245, 2010.
25. 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 Transfer A*, Vol. 13, No. 3, pp. 373-392, 1998.
20. Abu-Nada. E., Masoud., Z.H.F., Oztop. 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.
21. 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.
22. HemmatEsfe, M., Ghadak, F., Haghiri, A., Mirtalebi, S. "Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Two-Sided Inclined Lid-Driven Cavity Utilizing Nano-Fluid with Various Inclination Angles and Ununiformed Temperature". *Aero. Mech. J.* Vol. 8, No. 2, pp. 69-83, 2012 (In Persian).

Archive of SID