

## رفتار جریان و عملکرد حرارتی نانوسیال با خواص متغیر در محفظه با دیواره‌های متحرک

محمد همت اسفه<sup>۱\*</sup> و سیف الله سعدالدین<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>واژگان کلیدی:</b> محفظه کشیده، نسبت منظر، نسبت سرعت، نانوسیال خواص متغیر، انتقال حرارت.	تمرکز این مقاله، بر روی مسئله جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در نانوسیال با چسبندگی دینامیکی و ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما، در یک محفظه کشیده با نسبت منظرهای متفاوت می‌باشد. معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی، به وسیله روش حجم محدود با سیستم شبکه جابجاشده به صورت عددی با استفاده از یک کد کامپیوتری به زبان فرترن، حل شده است. در این مطالعه، تاثیر مربوط به تغییرات نسبت سرعت دیواره‌های متحرک، نسبت منظر و تاثیر وجود نانوذرات، بر مشخصه‌های هیدرودینامیکی و حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌است. دو نوع سیال آب و نانوسیال آب/آلومینا با قطر نانوذرات ۸۰ نانومتر، نسبت قطرها ۰/۰۰۶ و دمای ۲۹۸ کلوین، به عنوان سیال عامل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج حاصله نشان می‌دهد، در یک محدوده پارامتری ثابت، انتقال حرارت در محفظه کشیده با طولی دو برابر ارتفاع (نسبت منظر برابر ۲) از سایر نسبت منظرها، بسیار بیشتر است. همچنین وجود نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت درون محفظه می‌شود.

### ۱- مقدمه

مانعی بر سر راه انتقال حرارت در کاربردهای فوق است. بنابراین برای بهبود انتقال حرارت در کاربردهای یاد شده می‌توان از نانوسیال استفاده نمود. مرور مفصلی در مورد خصوصیات انتقال حرارت در نانوسیالات توسط گادسونت و همکارانش [۱]، سارکار [۲] و محمد و همکارانش [۳] صورت پذیرفته است.

تاکنون تحقیقات متفاوت و دامنه‌داری در مورد انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در نانوسیالات انجام شده‌است. جابه‌جایی طبیعی نانوسیالات در محفظه‌های ساده‌ی مستطیلی با شرایط مرزی متنوع توسط گروه‌های مختلفی از محققان از قبیل خانافر و همکاران [۴]، اوزتوپ و ابوندا [۵]، امین‌الساداتی و قاسمی [۶]، شیخ‌زاده و همکاران [۷]

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

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: M.hemmatesfe@gmail.com

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

گسترش دادند و جابه‌جایی ترکیبی سیال در یک محفظه با دیواره متحرک در محیط متخلخل را به همراه تاثیر تولید حرارت داخلی مطالعه نمودند.

آیدین [۱۶] در یک کار عددی جالب، مکانیزم‌های همراهی و مخالفت نیروی برشی و نیروی شناوری را در جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه مطالعه نمود. او عدد 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 محدوده جابه‌جایی ترکیبی که نیروهای شناوری و برشی درحالات ضعف و شدت مختلف حضور دارند، تاثیر همراهی و مخالفت آن‌ها را نسبت به یکدیگر بررسی نمود. چامخا [۱۷] تحقیقات آیدین را بسط داد و جریان جابه‌جایی ترکیبی هیدرومگنتیک را در محفظه با دیواره متحرک عمودی با جاذب و یا تولیدکننده‌های حرارتی را، با روش حجم محدود مورد مطالعه عددی قرار داد. خانافر و همکارانش [۱۸] جابه‌جایی ترکیبی گذرا در یک محفظه با دیواره متحرک را به صورت عددی شبیه‌سازی کردند.

واحد [۱۹] انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه مستطیلی با دیواره متحرک افقی را مورد بررسی قرار داد. وی در عدد رینولدز ثابت  $100$ ، میزان عدد پرانتل را از  $0/01$  تا  $10$ ، میزان عدد ریچاردسون را از  $0/1$  تا  $100$  و میزان نسبت منظر 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.

تمامی تحقیقات فوق بر روی سیالاتی همچون آب، هوا، اتیلن گلیکول و ... صورت گرفته‌است. با مروری بر روی متون علمی منتشر شده در سال‌های اخیر به بررسی‌های صورت گرفته بر روی نانوسیال می‌رسیم که البته حجم این تحقیقات نسبت به پژوهش‌های صورت گرفته بر روی سیالات پایه بسیار اندک و محدود می‌باشد.

و آلوی و همکاران [۸] صورت پذیرفته‌است. به‌علاوه مطالعات اندکی در مورد جابه‌جایی طبیعی نانوسیالات در محفظه‌هایی غیر از محفظه‌های چهار ضلعی انجام شده‌است. پژوهش‌ها پیرامون انتقال حرارت در محفظه‌هایی با اشکال هندسی مختلف، توسط قاسمی و امین‌الساداتی [۹] در محفظه‌ی مثلثی، توسط محمودی [۱۰] در محفظه‌ی L-شکل، توسط صالح و همکاران [۱۱] در محفظه‌ی دوزنقه‌ای، توسط نیکفر و محمودی [۱۲] در محفظه با جداره‌ی موج‌دار و توسط محمودی و هاشمی [۱۳] در محفظه‌ی C-شکل انجام گرفته‌است.

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 تاثیرگذاری 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 اعداد ریچاردسون خیلی بزرگ‌تر از یک، ۲- جابه‌جایی ترکیبی برای اعداد ریچاردسون در محدوده بین  $0/1$  تا  $10$  و ۳- جابه‌جایی اجباری برای اعداد ریچاردسون خیلی کوچکتر از یک.

از مطالعات عددی معطوف به انتقال حرارت درون محفظه‌ها، انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی (ترکیب جابه‌جایی طبیعی و اجباری) به دلیل طیف وسیع کاربردها و پیچیدگی این پدیده، مورد توجه برخی گروه‌های مطالعاتی قرار گرفته‌است. اکثر این تحقیقات در هندسه‌ها و شکل‌های مختلف با استفاده از سیالاتی مانند آب، اتیلن گلیکول، روغن و ... بوده و اخیراً تحقیقات محدودی نیز با استفاده از نانو سیالات انجام گرفته‌است.

ایواتسو و همکاران [۱۴] جابه‌جایی ترکیبی در یک محفظه با دیواره متحرک با گرادیان دمای افقی پایدار را مورد مطالعه 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 چامخا [۱۵] تحقیقات ایواتسو را

به تازگی سعدالدین و همکاران [۲۴] در یک شبیه‌سازی عددی و استفاده از فرمولاسیون خواص متغیر برای نانو سیالات، جریان و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون رادیاتور اتومبیل پر شده از نانو سیال را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق، اثرات پارامترهای بسیار مهمی مانند عدد ریچاردسون و کسر حجمی، در رفتار حرارتی و جریان سیال درون رادیاتور مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و کاهش عدد ریچاردسون، انتقال حرارت درون محفظه افزایش می‌یابد.

با مروری بر تحقیقات صورت گرفته واضح است که تاکنون هیچ‌گونه تحقیقی با استفاده از نانو سیال خواص متغیر در زمینه انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه‌های کشیده با نسبت سرعت‌های مختلف صورت نگرفته‌است. بررسی نسبت منظرهای مختلف به منظور بهینه‌سازی انتقال حرارت و درک الگوی جریان سیال و رفتار حرارتی آن درون محفظه از جمله موارد بسیار ضروری است که در بسیاری از کاربردهای مهندسی و صنعتی مفید بوده ولی تاکنون تحقیق جامعی پیرامون آن صورت نگرفته‌است. شایان ذکر است انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در محفظه با نسبت منظرهای مختلف دارای دو دیواره متحرک، نه تنها برای نانو سیال، بلکه برای سیالاتی چون آب و یا هوا نیز تاکنون به صورت جدی، دامنه‌دار و نتیجه‌بخش، مورد بررسی قرار نگرفته‌است. 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، فناوری خشک کردن و تکنولوژی روغن‌کاری، هدف تحقیق حاضر بررسی این هندسه با در نظر گرفتن عوامل مختلف موثر مانند عدد ریچاردسون، نسبت سرعت، نسبت منظر، عدد رینولدز و غلظت نانو ذرات می‌باشد. در ادامه به طرح و بررسی هندسه‌ی مسئله، معادلات حاکم، شرایط مرزی، معترسازی و توضیح روش عددی مورد استفاده برای حل معادلات حاکم، پرداخته خواهد شد.

تیواری و داس [۲۰] اولین افرادی بودند که یک مطالعه عددی درباره‌ی جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال مس-آب در یک محفظه‌ی مربعی انجام دادند. محفظه‌ی آن‌ها دارای جداره‌هایی عایق در بالا و پایین بود و جداره‌های کناری، متحرک و داغ بودند. آن‌ها دریافتند که برای اعداد ریچاردسون برابر با یک، عدد ناسلت میانگین به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، افزایش می‌یابد. موتامیسلسوان و همکارانش [۲۱] به صورت عددی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال مس-آب را در یک محفظه‌ی مستطیلی با جداره‌ی متحرک بررسی نمودند. دیواره‌های کناری محفظه‌ی آن‌ها عایق شده بود و جداره‌های بالا و پایین در دمای ثابت قرار داشتند و جداره‌ی بالایی با سرعت ثابت حرکت می‌کرد. در تحقیقی دیگر همت اسفه و همکاران [۲۲]، جابه‌جایی ترکیبی درون محفظه با دیواره‌های متحرک پر شده از نانو سیال را با استفاده از روش حجم محدود مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه عددی، دیواره پایینی و بالایی محفظه آدیاباتیک و دیواره‌های جانبی در دماهای مختلف فرض شده بود. نتایج به دست آمده نشان داد در یک عدد رینولدز مشخص، با افزایش کسر حجمی نانو ذرات، انتقال حرارت در محفظه افزایش یافته است.

فریدون و همکاران [۲۳] به بررسی عددی جابه‌جایی ترکیبی درون یک محفظه مربعی پر شده از نانوسیال با دیواره‌های متحرک پرداختند. در این محفظه دیواره فوقانی در دمای پایین و یک سوم دیواره‌های جانبی در دمای بالا فرض شده، در حالی که سایر دیواره‌ها به صورت آدیاباتیک در نظر گرفته شده بودند. تاثیر پارامترهای بدون بعد عدد ریچاردسون و عدد رینولدز، همچنین کسر حجمی نانو ذرات بر روی جریان سیال و عملکرد حرارتی این محفظه، بررسی شده‌است. نتایج این تحقیق نشان داد انتقال حرارت درون محفظه با افزایش کسر حجمی در عدد رینولدز ثابت، افزایش می‌یابد. همچنین در کسر حجمی ثابت، افزایش عدد ریچاردسون و عدد رینولدز باعث ارتقای عملکرد حرارتی محفظه می‌شود.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی [۲۳]

خواص ترموفیزیکی	سیال پایه (آب)	ذرات جامد (اکسید آلومینیوم)
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	.....
قطر نانوذره	----	۸۰

کلیه خواص سیال و جریان، به استثنای چگالی ثابت فرض شده و خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آلومینیوم در دمای مرجع در جدول ۱ آمده‌است. برای نیروی شناوری ایجاد شده ناشی از تغییرات چگالی از تقریب بوزینس استفاده می‌شود.

نانوسیال به صورت سیال تک فاز با خواص معادل یا موثر فرض می‌شود، گرچه این فرض همیشه معتبر نیست و هنوز محدوده مشخصی برای صحت آن ارائه نشده‌است. معادلات حاکم بر جریان دوبعدی جابه‌جایی ترکیبی، سیال غیرقابل تراکم با فرض تک فاز درون محفظه شامل معادلات پیوستگی، مومنتم وانرژی با استفاده از تقریب بوزینس در معادلات (۱) الی (۴) بیان شده‌اند. در این معادلات، جریان حالت آرام و دائم فرض شده است و شرط عدم لغزش بر روی دیواره‌ها برقرار است. همچنین در این تحقیق از فرمولاسیون خواص متغیر با اندازه نانوذرات ۸۰ نانومتر، نسبت قطرها ۰/۰۰۶ و دمای ۲۹۸ درجه سانتی‌گراد استفاده شده‌است.

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

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

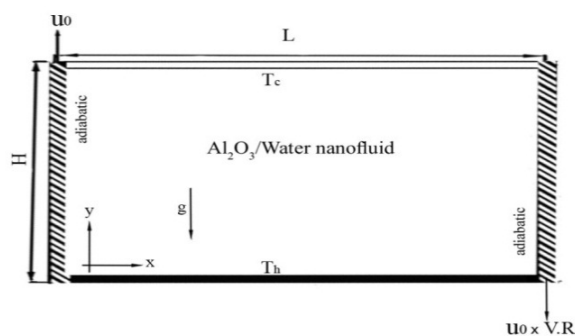
$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_{nf} \nabla^2 v + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g \Delta T, \quad (3)$$

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

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

## ۲- شبیه‌سازی ریاضی و معادلات حاکم؛

نمای شماتیک محفظه با دو دیواره متحرک پر شده از نانوسیال آب/ اکسید آلومینیوم با طول L و ارتفاع H در شکل ۱ نشان داده شده‌است. شکل و اندازه نانوذرات ثابت فرض شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است دو دیواره جانبی متحرک آدیاباتیک بوده و با سرعت‌های متفاوتی نسبت به یکدیگر در جهت مخالف در حرکتند.



شکل ۱- نمای شماتیک محفظه کشیده با دیواره‌های متحرک پر شده از نانوسیال

سرعت دیواره سمت چپ  $u_0$  می‌باشد در حالی که دیواره سمت راست با سرعتی برابر نسبت سرعت ضرب در سرعت دیواره سمت چپ  $(u_0 \times V.R)$  در حرکت است. دیواره‌های فوقانی و تحتانی به ترتیب در دماهای ثابت پایین  $(T_c)$  و بالا  $(T_h)$  فرض گردیده‌است.

پارامترهای بدون بعد عبارتند از:

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

$$\Delta T = T_h - T_c, \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, P = \frac{p}{\rho_{nf} u_0^2} \quad (5)$$

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

$$Ra = \frac{g \beta_f \Delta T L^3}{\nu_f \alpha_f}, Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (6)$$

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

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

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

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} +$$

$$\frac{\nu_{nf}}{\nu_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 V + \frac{Ri}{Pr} \frac{\beta_{nf}}{\beta_f} \Delta \theta \quad (9)$$

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

ضریب پخش حرارتی و چگالی موثر نانوسیال:

ضریب پخش حرارتی و چگالی موثر نانوسیال عبارتند از:

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

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

ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی:

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

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

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

چسبندگی:

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

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

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

چسبندگی دینامیکی سیال پایه (آب) با رابطه پیشنهاد شده توسط ابوندا و همکاران [۲۶] تخمین زده شده است.

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

$$Trc = \text{Log}(T - 273) \quad (16)$$

ضریب هدایت حرارتی نانوذرات در سیال در حالت سکون از رابطه معروف به همیلتون و کروسر [۲۷] به دست می آید که:

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

ضریب هدایت حرارتی کلی بدون بعد نانو سیال:

این مدل برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی توسط زو و همکاران [۲۸] پیشنهاد گردیده است. جمله دوم این معادله ضریب هدایت حرارتی بر پایه جابه جایی حرارتی ناشی از حرکت براونی می باشد.

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

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

مقدار عدد ناسلت متوسط هم از معادله (۲۵) به دست می‌آید:

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

شرایط مرزی این مساله نیز به صورت زیر است:

$$U = 0, V = 1, \partial\theta/\partial X = 0 \quad \text{at} \quad X = 0$$

$$U = 0, V = -V.R, \partial\theta/\partial X = 0 \quad \text{at} \quad X = 1$$

$$U = 0, V = 0, \theta = 1 \quad \text{at} \quad Y = 0$$

$$U = 0, V = 0, \theta = 0 \quad \text{at} \quad Y = 1$$

### ۳- روند محاسبه و روش حل عددی:

در این تحقیق، محاسبات و نتایج با استفاده از یک دک کامپیوتری به زبان FORTRAN صورت گرفته‌است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی به وسیله روش حجم محدود با سیستم شبکه جابجاشده، به صورت عددی حل شده‌اند. برنامه کامپیوتری براساس الگوریتم سیمپلر به حل همزمان معادلات انفصال می‌پردازد. این الگوریتم، برای حل سیستم معادلات بهم پیوسته مورد استفاده قرار گرفته‌است.

برای گسسته‌سازی جمله‌های جابه‌جایی از روش پیوندی که ترکیبی از بسط تفاضل مرکزی و پیشرو است استفاده شده و بسط مرتبه دوم تفاضل مرکزی نیز برای گسسته‌سازی جمله‌های پخش به‌کار گرفته شده‌است. در حل دستگاه معادلات گسسته‌شده حاصل، از روش خطبه‌خط به‌همراه الگوریتم ماتریس سه قطری استفاده شده‌است. در تحقیق حاضر، معیار همگرایی بر روی مقدار خطای نسبی تکرارهای متوالی مقادیر به صورت زیر قرار داده شده است:

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

جمله اول این معادله نیز همان ضریب هدایت حرارتی سیال در حالت سکون می‌باشد.

c یک ثابت تجربی مستقل از نوع نانوذرات است که در ارتباط با لایه مرزی حرارتی و نوع سیال پایه می‌باشد (مثلا برای آب دیونیزه برابر ۸۵ می‌باشد). عدد  $Nu_p$  ناسلت برای سیال در حال گردش در اطراف نانوذرات کروی است و در این مطالعه برابر با دو در نظر گرفته می‌شود.

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 می‌شود:

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

که  $d_{p,\min}$  و  $d_{p,\max}$  به ترتیب قطر بیشینه و کمینه نانوذرات هستند. در صورت وجود و یا محاسبه نسبت قطرها  $(R = d_{p,\min}/d_{p,\max})$ ، می‌توان با استفاده از  $d_p$  و  $D_f$  محاسبه شده در رابطه (۱۹)، قطر بیشینه و کمینه را به صورت مجزا به صورت ذیل محاسبه نمود.

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

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

عدد ناسلت:

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

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

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

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

با جای‌گذاری معادلات (۲۲) و (۲۳) در معادله (۲۱)، عدد ناسلت برای دیواره داغ سمت چپ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

که در این فرمول  $M$  و  $N$  نشان دهنده تعداد نقاط شبکه در جهت  $x$  و  $y$  بوده و  $n$  نشان دهنده تعداد تکرارهاست.

جدول ۲- ارزیابی استقلال شبکه در اندازه شبکه‌های مختلف

Mesh size	$Nu_{ave}$ =0.06, A.R=4, $\phi$ V.R=0.2, Re=100, Ri=1	$Nu_{ave}$ =0.00, $\phi$ Re=100, Ri=1, A.R=1, V.R=0.2
۴۱×۴۱	۷/۴۱۳	۵/۷۹۶
۶۱×۶۱	۸/۰۳۵	۶/۵۰۴
۷۷×۷۷	۸/۲۸۲	۶/۷۱۲
۹۱×۹۱	۸/۳۹۱	۶/۸۹۷
۱۰۱×۱۰۱	۸/۴۲۱	۶/۹۲۸
۱۱۱×۱۱۱	۸/۴۲۲	۶/۹۳۲
۱۲۱×۱۲۱	۸/۴۲۲	۶/۹۳۴

برای بررسی میزان وابستگی نتایج به شبکه انتخاب شده، آزمون استقلال شبکه بر روی یک محفظه نمونه با چندین شبکه متفاوت انجام شده است. هفت شبکه یکنواخت  $۴۱ \times ۴۱$ ،  $۶۱ \times ۶۱$ ،  $۷۷ \times ۷۷$ ،  $۹۱ \times ۹۱$ ،  $۱۰۱ \times ۱۰۱$ ،  $۱۱۱ \times ۱۱۱$  و  $۱۲۱ \times ۱۲۱$  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. جدول ۲ میزان عدد ناسلت متوسط متناظر با انتخاب هریک از این شبکه‌ها را در دو وضعیت مجزا نمایش می‌دهد.

براین اساس شبکه نقاط  $۱۱۱ \times ۱۱۱$ ، باتوجه 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 دیواره متحرک داغ در بالا و دیواره سرد در پایین می‌پردازیم. این مساله توسط گروه‌های مختلف تحقیقاتی از جمله مراجع [۲۰ و ۲۹] مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه میان میزان عدد ناسلت متوسط تحقیق حاضر و سایر تحقیقات در جدول ۳ آورده شده است. این نتایج، انطباق خوبی را میان نتایج کد حاضر با سایر مراجع گزارش شده 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 عدد 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 عدد ناسلت به دست آمده، نشان‌دهنده انطباق و هم‌خوانی بسیار مطلوب میان کد مورد استفاده در این تحقیق و سایر مراجع است.

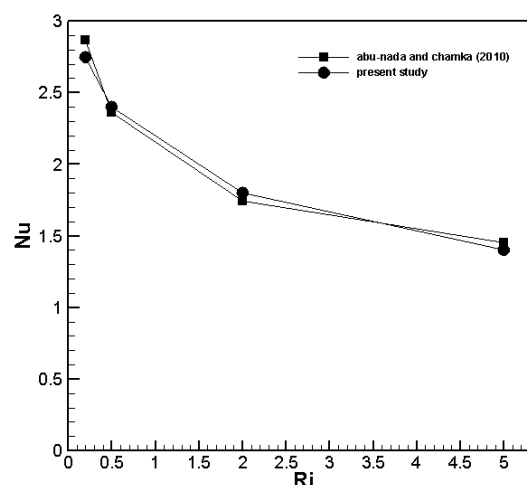
جدول ۳- مقایسه مطالعات پیشین با سیال پایه هوا نسبت به نتایج مطالعه حاضر

	مطالعه حاضر	مرجع [۲۹]	مرجع [۲۰]
<b><math>Ra=10^4</math></b>			
Nu	۲/۲۷۴۴	۲/۲۹ (%۰/۶۸)	۲/۱۹۵ (%۳/۴۹)
$Nu_{max}$	۳/۸۱۲۶	۳/۸۴ (%۰/۷۱)	۳/۵۵۸۵ (%۶/۶۶)
$Nu_{min}$	۰/۶۶۹۱	۰/۶۷ (%۰/۱۳)	۰/۵۸۰۹ (%۱۳/۱۸)
<b><math>Ra=10^5</math></b>			
Nu	۴/۴۸۵۷	۴/۹۶۴ (%۱۰/۶۶)	۴/۴۵ (%۰/۷۹)
$Nu_{max}$	۷/۷۹۵۸	۸/۹۳ (%۱۴/۵)	۷/۹۳۷۱ (%۱۱/۸۱)
$Nu_{min}$	۰/۹۶۱۱	۱/۰۱ (%۵/۰۸)	۰/۷۱۷۳ (%۲۵/۳۶)
<b><math>Ra=10^6</math></b>			
Nu	۹/۸۵۶۵	۱۰/۳۹ (%۵/۴۱)	۸/۸۰۳ (%۱۰/۶۸)
$Nu_{max}$	۲۰/۲۷۴۵	۲۱/۴۱ (%۵/۶)	۱۹/۲۶۷۵ (%۴/۹۶)
$Nu_{min}$	۱/۶۲۴۷	۱/۵۸ (%۲/۷۵)	۰/۹۴۲ (%۴۲)

( $V.R=0.2$ )، نمایش می‌دهد. در این حالت باتوجه به سرعت ۵ برابری دیواره سمت چپ نسبت به دیواره سمت راست، شکل‌گیری یک گردابه اصلی در محفظه، با تراکم بیشتر در نزدیکی دیواره سمت چپ محفظه به وجود می‌آید. شدت جریان در نزدیکی دیواره متحرک سمت چپ، نشان‌دهنده نقش قابل توجه این دیواره در ایجاد جریان درون محفظه نسبت به دیواره سمت راست می‌باشد که این مسئله باتوجه به سرعت پایین دیواره سمت راست نسبت به دیواره چپ قابل توجیه است. از سوی دیگر شکل‌گیری یک گردابه اصلی در تمامی شکل‌ها نشان می‌دهد که نیروی برشی ایجاد شده از حرکت دیواره سمت راست، نیروی ناشی از دیواره سمت چپ را تقویت کرده و به شکل‌گیری جریان و انتقال حرارت کمک می‌کند. این درحالی است که نیروی شناوری ایجاد شده به واسطه گرادیان دما نیز در راستای نیروی ایجاد شده ناشی از حرکت دیواره‌ها بوده و این دو نیرو به شدت جریان و افزایش انتقال حرارت در محفظه کمک می‌کنند. باتوجه به خطوط ممتد و خط‌چین‌های موجود در شکل می‌توان دریافت که وجود نانوسیال تغییر بنیادی و خاصی در الگوی جریان درون محفظه ایجاد نمی‌کند.

خطوط هم‌دما در این شکل نیز بیانگر انتقال حرارت جابه‌جایی در این شرایط است. تراکم خطوط دما در نزدیکی دیواره‌های هم‌دما نشانگر ایجاد گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌ها می‌باشد. با دقت در نمودارهای هم‌دما در نسبت‌های سرعت مختلف، افزایش محدود گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌ها قابل رویت می‌باشد که این مساله نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت محفظه با افزایش نسبت سرعت می‌باشد. دلیل این مسئله را می‌توان در افزایش نیروی برشی دیواره سمت راست و قدرت یافتن گردابه درون محفظه جستجو نمود. خطوط جریان در شکل‌های ۳ (ب، ج و د) نیز نمایش‌دهنده وضعیت جریان و دما در نسبت‌های سرعت مختلف می‌باشند. همان‌گونه که در این اشکال به وضوح مشاهده می‌شود با افزایش نسبت سرعت و رسیدن به  $V.R=1$ ، گردابه شکل‌گرفته

به‌منظور حصول اطمینان کامل، کد حاضر به‌واسطه تحقیق صورت گرفته توسط ابوندا و چامخا [۳۰] نیز، اعتبارسنجی گردید. در این تحقیق از نانوسیال به‌عنوان سیال عامل درون محفظه استفاده شده‌است. نتایج این اعتبارسنجی در شکل ۲ آمده‌است که نشان‌دهنده انطباق عالی نتایج حاصله با نتایج انتشاریافته از تحقیق فوق‌الذکر است.



شکل ۲- اعتبارسنجی کد: مقایسه نتایج حاصله با تحقیق انتشاریافته ابوندا و چامخا

#### ۴- تحلیل و بررسی نتایج

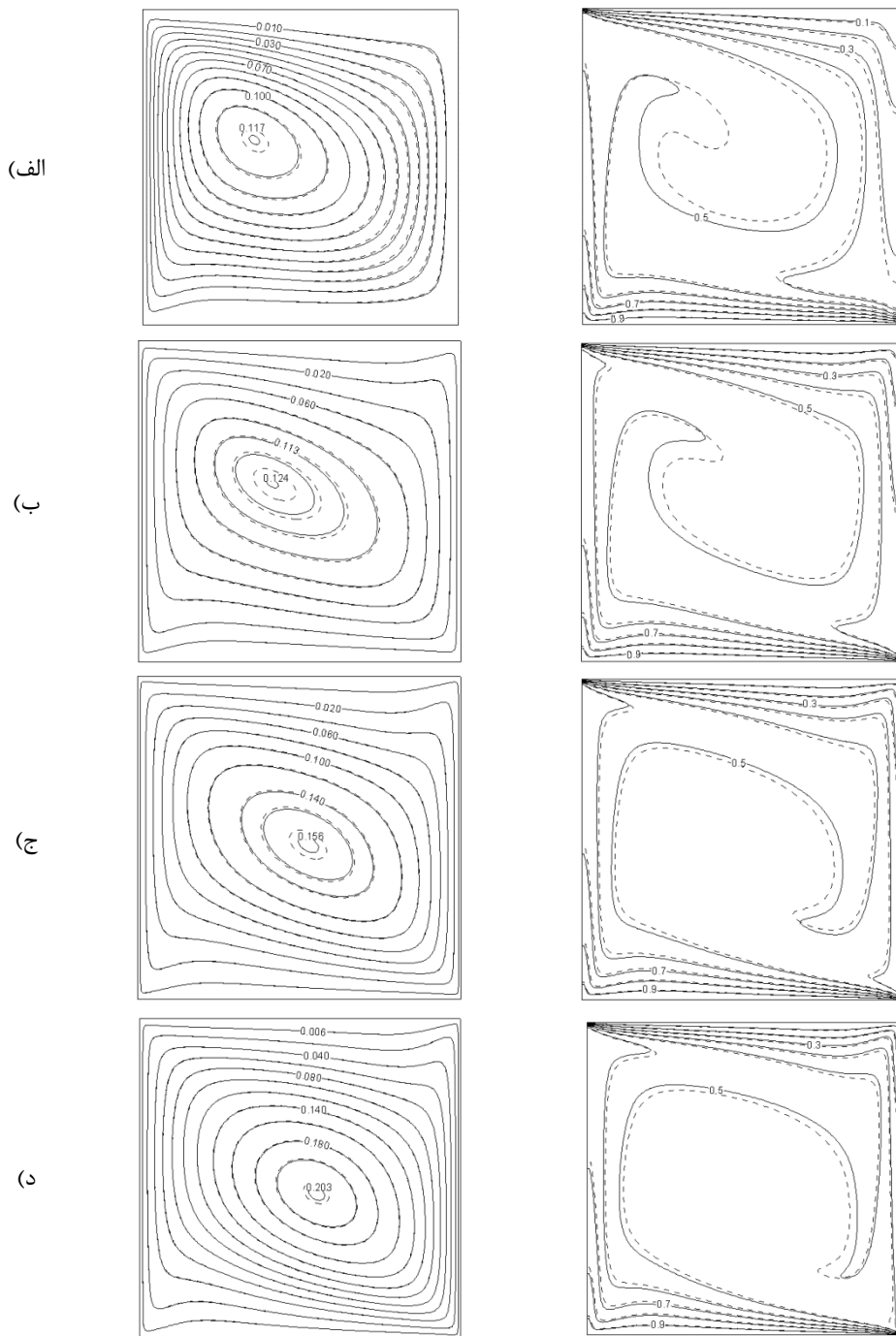
در این مقاله، به بررسی جابه‌جایی ترکیبی در محفظه مربعی با دیواره‌های متحرک و پرشده از سیال پایه و نانوسیال در نسبت سرعت ( $V.R$ ) و نسبت منظرهای ( $A.R$ ) گوناگون خواهیم پرداخت. به منظور بررسی کامل تمامی حالت‌ها، چهار نسبت سرعت  $0.2$ ،  $0.7$ ،  $1$  و  $2$ ، سه نسبت منظر  $1$ ،  $2$  و  $4$  مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

شکل ۳، خطوط جریان و دما را برای  $Re=100$ ،  $Ri=1$  و  $A.R=1$  در نسبت‌های سرعت مختلف را برای سیال پایه (خط ممتد) و نانوسیال با ۶ درصد کسر حجمی نانوذرات (خط‌چین)، نشان می‌دهد. برای نسبت منظر یک ( $A.R=1$ )، محفظه به‌صورت مربعی می‌باشد. شکل ۳-الف وضعیت خطوط جریان و دما را در نسبت سرعت  $0.2$



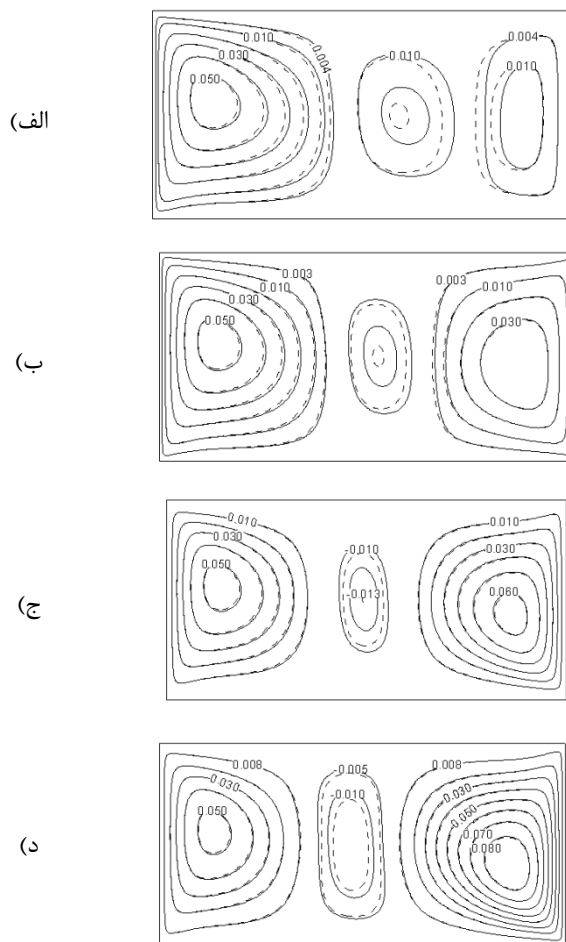
همراستایی نیروهای اعمالی ناشی از حرکت دیواره‌ها و نیروی شناوری محفظه می‌باشد. وجود ذرات نانو در سیال تغییرات اندکی را در خطوط هم‌دما به وجود آورده است. همان‌گونه که در شکل واضح است خطوط ممتد مربوط به سیال پایه، در نزدیک دیواره‌های هم‌دما، تراکمی کمی بیشتر از خط‌چین‌ها دارند در حالی که خط‌چین (نانوسیال) پخش نسبتاً بهتری، درون محفظه دارند.

درون محفظه به شکل کاملاً متقارن درآمد با افزایش بیشتر نسبت سرعت، تراکم خطوط جریان به سمت دیواره سمت راست کشیده خواهد شد. وجه مشترک خطوط جریان در کلیه حالت‌های مورد بررسی وجود یک گردابه اصلی در درون محفظه است که با افزایش نسبت سرعت تراکم خطوط آن در سمت چپ و یا راست افزایش می‌یابد. ایجاد یک گردابه در محفظه در تمامی شرایط هم ناشی از

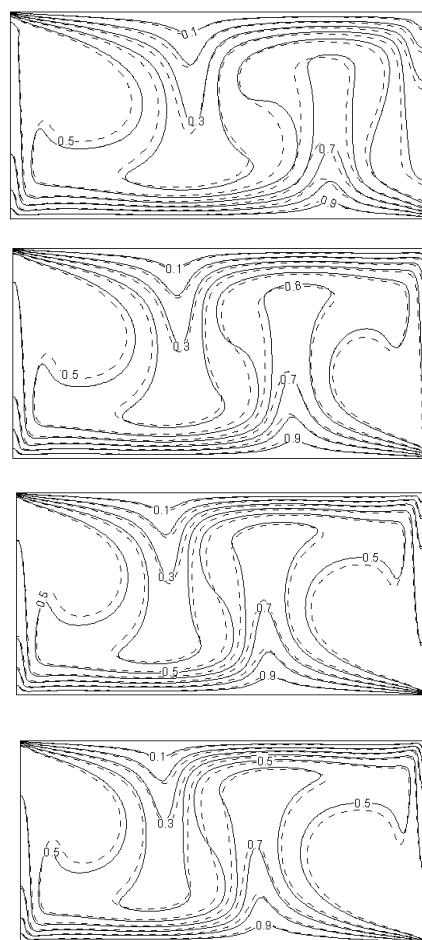


شکل ۳- خطوط جریان و دما برای سیال (خط ممتد) نانوسیال با کسر حجمی ۰/۶ (خط‌چین) در  $A.R=1$ ،  $Re=100$  و  $Ri=1$  در الف) نسبت سرعت ۰/۲ (ب) نسبت سرعت ۰/۷ (ج) نسبت سرعت ۱ (د) نسبت سرعت ۲

ایجاد گردابه‌های منفک در نزدیکی دیواره‌ها خواهد شد. گردابه ناشی از حرکت دیواره سمت چپ در نسبت سرعت‌های کمتر از یک، بسیار قوی‌تر از سایر گردابه‌ها می‌باشد و با افزایش نسبت سرعت، گردابه نزدیک به دیواره سمت راست تقویت می‌گردد. از سوی دیگر با متراکم شدن خطوط جریان در نزدیکی دیواره سمت راست، گردابه میانی ایجاد شده به دلیل نیروی شناوری، کمی از تراکم و قدرت خود را از دست داده و ضعیف‌تر می‌شود. اگر چه این گردابه نسبت به دو گردابه جانبی، سهم زیادی در انتقال حرارت درون محفظه ندارد. انتظار می‌رود با وجود گردابه‌های سه‌گانه درون محفظه و برهم‌کنش‌های پیاپی آن‌ها، انتقال حرارت نسبت به حالت مربعی افزایش قابل توجهی پیدا کند. مقایسه خطوط جریان برای نانوسیال و سیال پایه، عدم تغییرات الگوی جریان با افزودن نانوذرات را نشان می‌دهد.



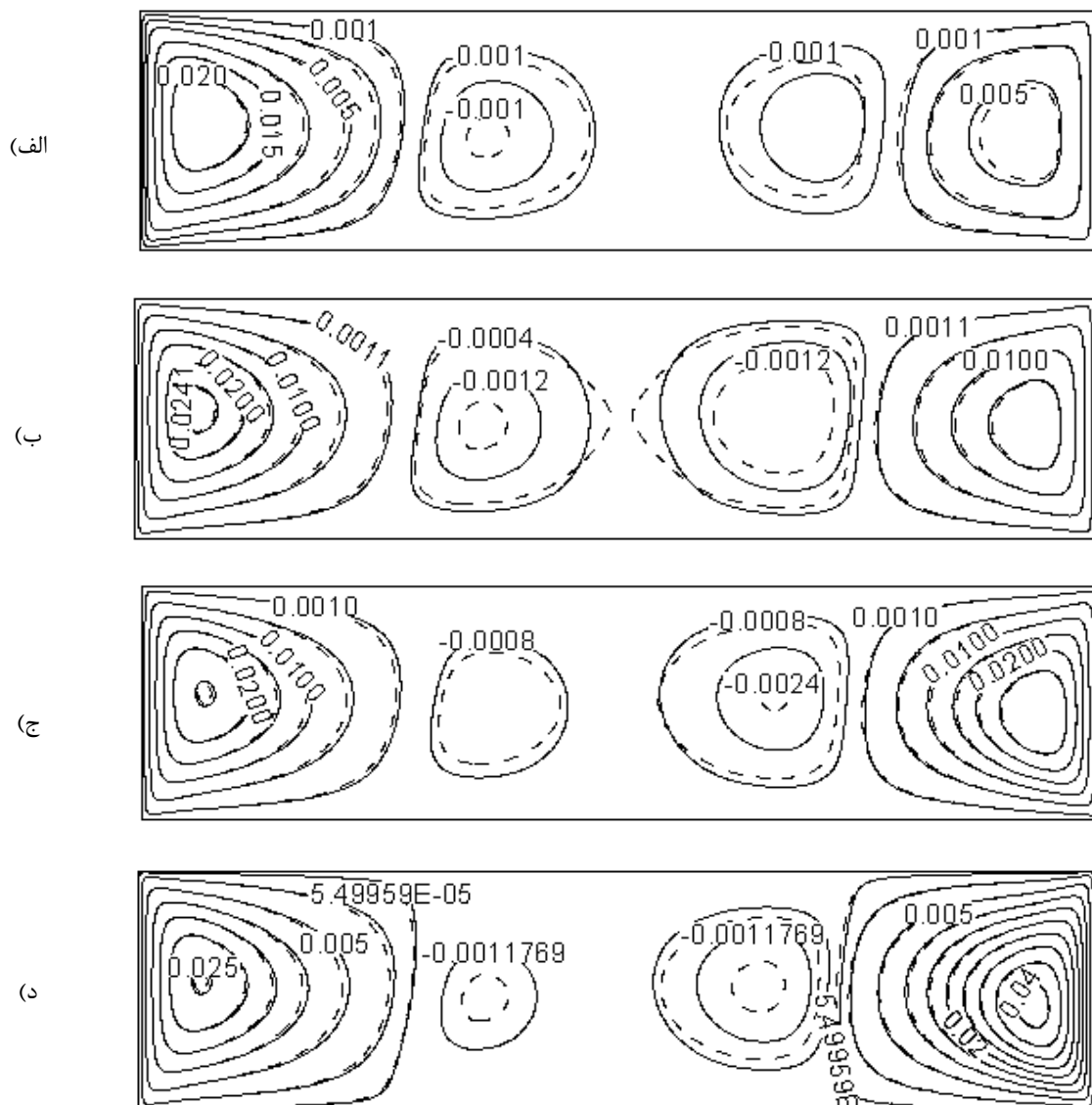
تفاوت‌های مربوط به خطوط جریان و دما در نسبت‌های سرعت مختلف در نسبت منظر ۲ در شکل ۴ در  $Ri=1$  و  $Re=100$  برای سیال و نانو سیال در کسر حجمی ۰.۰۶٪ نانوذرات نشان داده شده است. همان‌گونه که در این اشکال مشاهده می‌گردد، در این حالت محفظه از شکل مربعی خارج شده و به شکل یک مستطیل با طول دو برابر نسبت به عرض محفظه تبدیل شده‌است. با توجه به خطوط جریان در شکل ۴-الف مشاهده می‌شود، خطوط جریان در قالب سه گردابه با قدرت‌های مختلف در طول محفظه قابل ارزیابی است. علت تفکیک این گردابه‌ها را می‌توان با توجه به وضعیت خطوط جریان در حالت مشابه با شکل قبل تحلیل نمود. با افزایش طول محفظه نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما و چگالی که به علت داغ بودن دیواره تحتانی می‌باشد، در میانه محفظه شکل می‌گیرد و نیروهای ناشی از حرکت دیواره‌ها بر روی سیال نیز موجب



شکل ۴- خطوط جریان و دما برای سیال پایه (خط ممتد) و نانوسیال با کسر حجمی ۰.۰۶٪ (خط چین) در  $A.R=2$ ،  $Re=100$  و  $Ri=1$  در الف) نسبت سرعت ۰.۲، ب) نسبت سرعت ۰.۷، ج) نسبت سرعت ۱، د) نسبت سرعت ۲

شکل ۵ خطوط جریان سیال پایه و نانوسیال با کسر حجمی ۶ درصد درون محفظه را برای نسبت منظر برابر ۴، در  $Re=100$  و  $Ri=1$  را برای نسبت‌های سرعت مختلف نشان می‌دهد. به‌منظور درک بهتر وضعیت جریان، خطوط جریان مربوط به چهار نسبت سرعت مختلف در این شکل نمایش داده شده‌است. همان‌گونه که در شکل ۵-الف مشخص است جریان حاصله در این محدوده پارامتری به چهار گردابه با قدرت و شدت‌های مختلف تقسیم شده‌است.

از سوی دیگر وضعیت خطوط ایزوترم در نزدیکی دیواره‌های هم‌دم‌ما نشان می‌دهد که با افزایش نسبت سرعت محفظه و قدرت یافت گردابه سمت راست، تراکم خطوط هم‌دم‌ما در نزدیکی این دیواره‌ها افزایش یافته و گردایان دما افزایش می‌یابد. با افزایش گردایان دما برای نانو سیال و باتوجه به انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی در محفظه در این محدوده پارامتری، انتظار می‌رود که انتقال حرارت نانو سیال با افزایش نسبت سرعت افزایش قابل توجهی داشته باشد. بررسی دقیق این مورد منوط به تحلیل نمودارهای عدد ناسلت در این وضعیت می‌باشد.



شکل ۵- خطوط جریان برای سیال پایه (خط‌چین) و نانوسیال با کسر حجمی ۶٪ (خط ممتد) در  $A.R=4$ ،  $Re=100$  و  $Ri=1$  (الف) نسبت سرعت ۰/۲ (ب) نسبت سرعت ۰/۷ (ج) نسبت سرعت ۱ (د) نسبت سرعت ۲

تغییرات محسوس و قابل توجهی در کل فضای محفظه ایجاد نمی‌گردد ولی افزایش گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌های هم‌دما، باعث افزایش انتقال حرارت موثر در محفظه با افزایش نسبت سرعت می‌گردد.

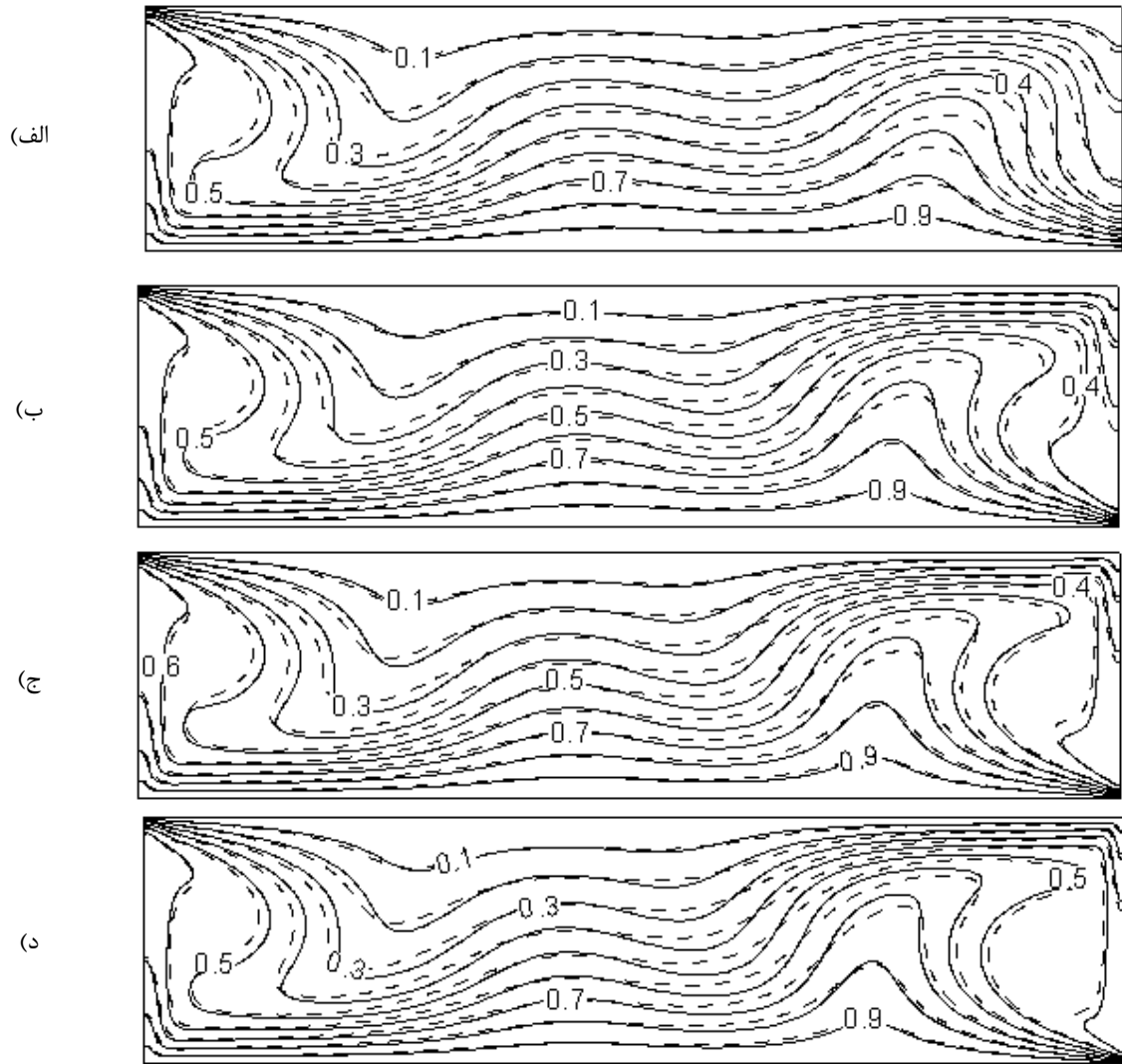
وجود نانوسیال نسبت به سیال پایه در این وضعیت نیز تفاوت جدی در نحوه استقرار خطوط هم‌دما و گرادیان دما را نشان نمی‌دهد. بنابراین باتوجه به این‌که انتقال حرارت نانو سیالات تابعی از گرادیان دما و نسبت هدایت حرارتی است، قطعاً با شرایط موجود (برابر بودن تقریبی گرادیان دما)، و ضریب هدایت حرارتی موثر بالاتر نانوسیال، انتقال حرارت با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد.

نمودارهای عدد ناسلت متوسط برای سیال پایه و نانوسیال در نسبت منظرهای مختلف در شکل ۷ برای  $Re=100$  و  $Ri=1$  نمایش داده شده‌است. همان‌گونه که برای آب و نانو سیال مشخص است، در تمامی نسبت سرعت‌ها، در  $A.R=2$  بیشترین مقدار عدد ناسلت اتفاق می‌افتد. این موضوع به تحرک سیال در قسمت‌های میانی محفظه در این محدوده پارامتری باز می‌گردد. در  $A.R=4$ ، در قسمت‌های میانی محفظه، گردابه‌هایی شکل گرفته‌اند که ناشی از نیروی شناوری می‌باشند. این گردابه‌ها علاوه بر ضعیف‌بودن، قابلیت پوشش کل فضای میانی محفظه را ندارند و بنابراین در بخش عمده‌ای از محفظه انتقال حرارت مناسبی اتفاق نمی‌افتد.

حال آن‌که در  $A.R=2$ ، قسمت‌های محدودی از محفظه توسط گردابه میانی اشغال شده و سایر نواحی توسط گردابه‌های طرفین محفظه که عمدتاً قوی‌تر و ناشی از نیروی برشی دیواره‌ها می‌باشند، پر شده‌است. بنابراین عدد ناسلت متوسط در این حالت بیشتر از تمامی حالات مورد مطالعه می‌باشد. همچنین افزایش نسبت سرعت در تمامی نسبت منظرها، باعث افزایش عدد ناسلت متوسط و در نتیجه انتقال حرارت محفظه می‌گردد.

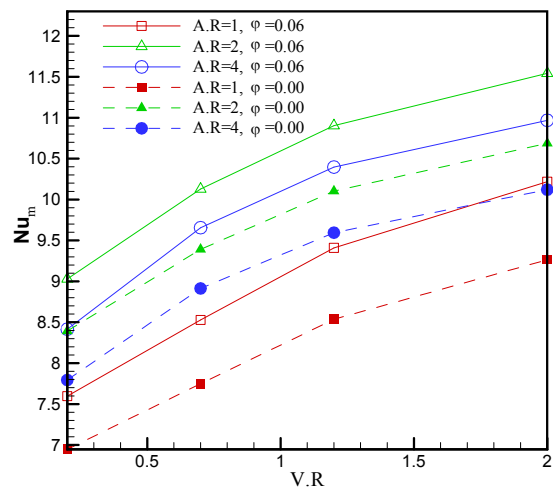
دو گردابه میانی به صورت پادساعت‌گرد و در خلاف جهت گردش دو گردابه جنبی دیواره‌ها حرکت می‌کند. این دو گردابه از نیروی شناوری ناشی از اختلاف دما در میانه محفظه ایجاد شده‌است و باتوجه به اشکال دارای قدرت و شدت کمتری نسبت به گردابه‌های جانبی دیواره‌ها هستند. گردابه سمت چپ از تاثیر نیروی حرکت دیواره بر روی سیال مجاور آن ایجاد شده و در نسبت سرعتی برابر  $0/2$  بسیار قوی‌تر و متراکم‌تر از گردابه سمت راست می‌باشد. با بررسی دقیق وضعیت چهار گردابه موجود در محفظه در این اشکال، مشخص می‌گردد که دو گردابه میانی که در فاصله نسبی قابل توجهی نسبت به یکدیگر واقع شده‌اند بسیار ضعیف بوده و عملاً جریان در نقاط میانی محفظه تقریباً راکد و بدون حرکت است. بنابراین باتوجه به عدم حرکت سیال با سرعت‌های مناسب در قسمت‌های عمده‌ای از محفظه، انتظار می‌رود عدد ناسلت متوسط در این نسبت منظر، مقادیر کمتری نسبت به حالت قبل (با نسبت منظری برابر ۲) داشته باشد. افزایش نسبت سرعت نیز باعث شدت یافتن گردابه سمت راست می‌گردد در حالی که تغییرات عمده‌ای در گردابه‌های میانی ایجاد نمی‌کند بنابراین باتوجه به این شرایط انتظار می‌رود انتقال حرارت مربوط به گردابه سمت راست افزایش یابد.

خطوط ایزوترم متناسب با خطوط جریان شکل ۵ در شکل ۶ نشان داده شده‌است. همان‌گونه که از این خطوط مشخص است، عمده انتقال حرارت جابه‌جایی در محفظه در قسمت‌های نزدیک به دیواره‌های جانبی اتفاق می‌افتد و در قسمت‌های میانی، خطوط هم‌دما به صورت موازی وجود دارد. با افزایش نسبت سرعت علی‌رغم ثابت ماندن خطوط هم‌دما در قسمت‌های میانی محفظه، در نزدیکی قسمت‌های تحتانی دیواره‌های جانبی تغییراتی در جهت افزایش گرادیان دما مشاهده می‌گردد که نشانه قدرت یافتن گردابه سمت راست می‌باشد. بنابراین اگرچه



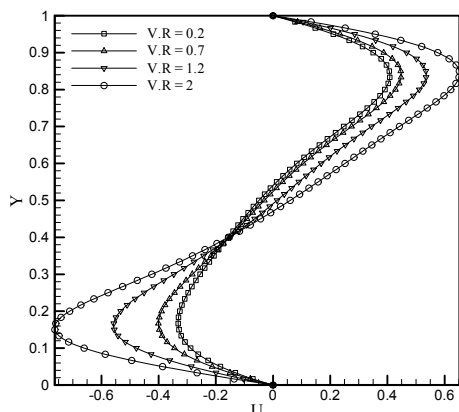
شکل ۶- خطوط دما برای سیال پایه (خط چین) و نانوسیال با کسر حجمی ۶٪ (خط ممتد) در  $A.R=4$ ،  $Re=100$  و  $Ri=1$  (الف) نسبت سرعت ۰/۲ (ب) نسبت سرعت ۰/۷ (ج) نسبت سرعت ۱ (د) نسبت سرعت ۲

در شکل ۸ نمودار ناسلت متوسط به نسبت سرعت در مقادیر مختلف ریچاردسون در  $Re=100$  و  $A.R=2$  برای نانوسیال با کسر حجمی ۶٪ و سیال پایه نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، با افزایش عدد ریچاردسون در یک نسبت سرعت ثابت، میزان عدد ناسلت و انتقال حرارت به شدت افزایش می یابد. با افزایش عدد ریچاردسون از  $Ri=0.1$  به  $Ri=10$  عدد ناسلت با رشد ۴۴ درصدی مواجه می گردد. این رشد انتقال حرارت در سیال پایه در همین تغییرات عدد ریچاردسون برابر ۴۰/۶ درصد می باشد. همچنین از روی نمودارها مشخص است که در یک مقدار ثابت از عدد ریچاردسون، با افزایش نسبت سرعت، تبدلات حرارتی درون محفظه افزایش می یابد.



شکل ۷- نمودار عدد ناسلت متوسط به نسبت سرعت در مقادیر مختلف نسبت منظر در  $Re=100$  و  $Ri=1$  برای نانوسیال با کسر حجمی ۶٪ و سیال پایه

به منظور درک بهتر روند حرکت سیال درون محفظه در چندین حالت مورد بررسی در تحقیق حاضر، نمودارهای سرعت در خطوط میانی محفظه با تغییر پارامترهای مختلف رسم شده است. پروفیل سرعت نانوسیال با کسر حجمی ۶ درصد در خطوط میانی افقی و عمودی محفظه برای نسبت سرعت‌های مختلف با  $Re=100$ ،  $Ri=1$  و  $A.R=1$  در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که در قسمت ۹-الف قابل مشاهده است، مولفه افقی سرعت در  $V.R=2$  بیشترین اندازه را در میان سایر نسبت‌ها داشته و بنابراین با این سرعت طبیعتاً دبی بیشتری از سیال را بر طبیعی است که افزایش سرعت در راستای افقی و جریان دادن سیال بیشتر بر روی دیواره‌های غیرآدیباتیک باعث افزایش انتقال حرارت در محفظه می‌گردد. در نمودار مربوط به مولفه عمودی سرعت، کاملاً مشخص است که جریان سیال به واسطه حضور گردابه‌ها در طرفین محفظه بسیار بیشتر از سایر نواحی است و افزایش نسبت سرعت تغییراتی را بالاخص در سرعت جریان سیال در قسمت سمت راست محفظه به وجود می‌آورد.

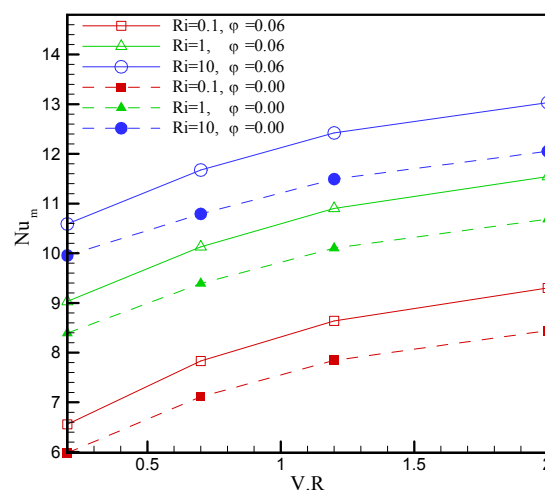


الف) مولفه افقی سرعت بر روی خط میانی محفظه

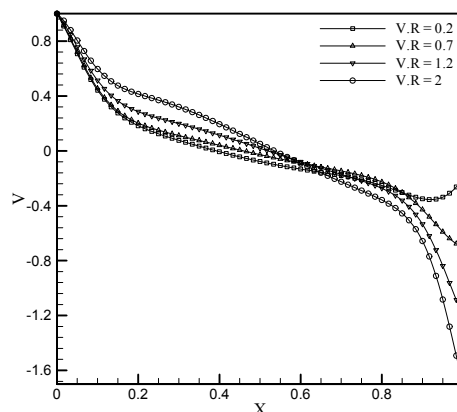
شکل ۹- پروفیل سرعت نانوسیال با کسر حجمی ۶ درصد در خطوط میانی محفظه برای نسبت سرعت‌های مختلف با  $Re=100$  و  $Ri=1$

می‌دهد که در عمل ناشی از تاثیر نسبت سرعت بر کل خط میانی عمودی در محفظه است. مولفه عمودی سرعت در این نسبت منظر خاص نشان می‌دهد که با افزایش نسبت سرعت، توان جریان در قسمت‌های سمت چپ محفظه تقریباً ثابت مانده و هیچ تغییر خاصی از خود

این موارد در نانوسیال و سیال پایه مشترک می‌باشد. برای نانوسیال با کسر حجمی ۶٪، در  $Ri=0.1$ ، تغییر نسبت سرعت از ۰/۲ به ۲ رشدی معادل با ۴۲/۱ درصد در مقدار عدد ناسلت را به همراه دارد این درحالی است که در  $Ri=10$  این رشد به ۲۲/۶ درصد می‌رسد. این بدان معناست که با افزایش عدد ریچاردسون، تغییرات نسبت سرعت، تاثیر محدودتری بر انتقال حرارت دارد.



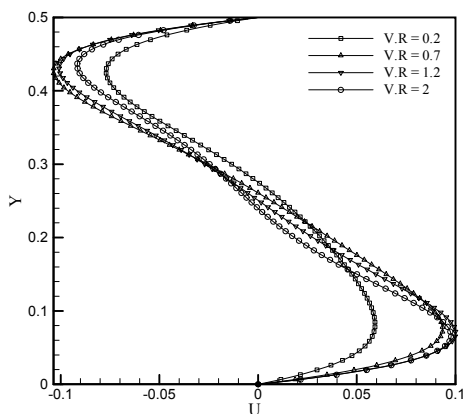
شکل ۸- نمودار عدد ناسلت متوسط به نسبت سرعت در مقادیر مختلف عدد ریچاردسون در  $Re=100$  و  $A.R=2$  برای نانوسیال با کسر حجمی ۶٪ و سیال پایه



ب) مولفه عمودی سرعت بر روی خط میانی محفظه

شکل ۱۰، پروفیل سرعت نانوسیال با کسر حجمی ۶٪ در خطوط میانی محفظه برای نسبت سرعت‌های مختلف با  $Re=100$ ،  $Ri=1$  و  $A.R=2$  را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل‌ها مشخص است، مولفه افقی در تمامی نسبت‌های سرعت، الگویی تقریباً متقارن از خود نشان

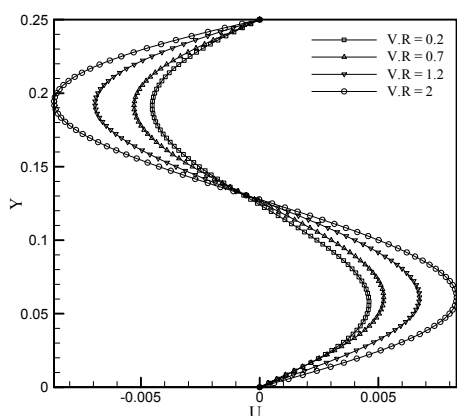
چپ محفظه است تغییرات خاصی در اثر تغییرات سرعت دیواره سمت راست به وجود نیامده است که این موضوع بیش از هر چیز می تواند به الگوی جریان در قسمت های میانی محفظه بستگی داشته باشد.



الف) مولفه افقی سرعت بر روی خط میانی محفظه

شکل ۱۰- پروفیل سرعت نانو سیال با کسر حجمی ۶٪ در خطوط میانی محفظه برای نسبت های مختلف با  $A.R=2$ ،  $Re=100$  و  $Ri=1$

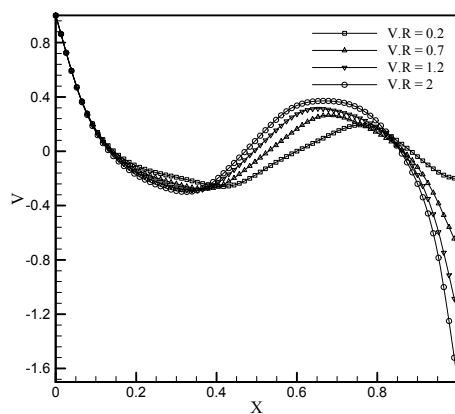
تاثیرپذیری، یکی از دلایل عمده رفتار نامطلوب حرارتی در این حالت خاص است. از سوی دیگر مشاهده می شود محدوده تغییرات که تنها معطوف به گردابه ایجاد شده در سمت راست محفظه و در مجاورت دیواره متحرک سمت راست است، عملاً قسمت بسیار محدودی از کل طول مفید محفظه را اشغال نموده است. بنابراین کل تغییرات انتقال حرارت و عدد ناسلت ناشی از تغییرات نسبت سرعت، در محدوده بسیار کوچکی از طول محفظه اتفاق می افتد که کل این محدوده طولی کمتر از ۳۵٪ طول محفظه را دارد.



الف) مولفه افقی سرعت بر روی خط میانی محفظه

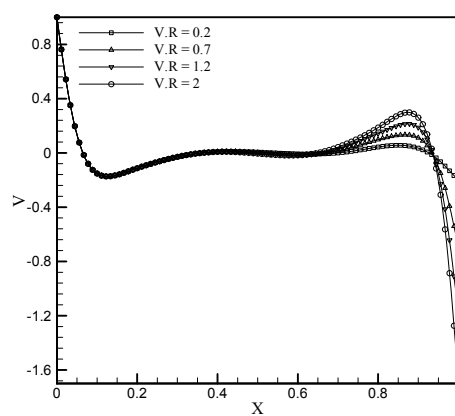
شکل ۱۱- پروفیل سرعت نانو سیال با کسر حجمی ۶٪ در خطوط میانی محفظه برای نسبت های مختلف با  $A.R=4$ ،  $Re=100$  و  $Ri=1$

نشان نمی دهند و عمده تغییرات معطوف به قسمت سمت راست محفظه است که به دلیل تغییر سرعت در دیواره، سرعت جریان مجاور دیواره ها به شدت تغییر یافته است. این نکته در تحلیل حرارتی محفظه بسیار مهم است زیرا نشان می دهد در بخش خاصی که متناظر با گردابه سمت



ب) مولفه عمودی سرعت بر روی خط میانی محفظه

پروفیل سرعت نانو سیال با کسر حجمی ۶٪ در خطوط میانی محفظه برای نسبت های مختلف با  $A.R=4$ ،  $Re=100$  و  $Ri=1$  در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تقارن پروفیل سرعت برای سرعت افقی نشان دهنده تقارن روند حرکت گردابه در راستای عمودی محفظه است. نکته حائز اهمیت در این شکل، رفتار سرعت عمودی سیال با تغییرات نسبت سرعت در این محدوده پارامتری خاص می باشد. همان گونه که در شکل مشخص است در بخش عمده ای از نوار میانی افقی محفظه، سرعت جریان با تغییرات نسبت سرعت، اصلاً تغییر نمی کند. این عدم



ب) مولفه عمودی سرعت بر روی خط میانی محفظه

## ۵- نتیجه گیری

۲- با افزایش طول محفظه، تعداد گردابه‌ها افزایش یافته و قدرت و ناحیه گردش آن‌ها محدود می‌شود. در عین حال گردابه‌های میانی که به واسطه نیروی شناوری ایجاد می‌شوند توان زیادی برای جریان دادن به سیال ایجاد نکرده و موجب رکود جریان در قسمت‌های مرکزی و میانی محفظه می‌گردند.

۳- افزوده شدن نانوذرات به سیال پایه باعث رشد تبادلات حرارتی درون محفظه در کلیه حالات مورد مطالعه شده‌است.

۴- حالت بهینه و بیشینه برای انتقال حرارت در تمامی طول‌های و عرض‌های مورد مطالعه در این تحقیق، طولی در حدود دو برابر عرض محفظه می‌باشد. در این هندسه مشخص، به دلیل همپوشانی نیروهای شناوری و برشی و موقعیت مطلوب گردابه‌ها، بیشترین انتقال حرارت در تمامی محدوده‌های مولفه‌های مورد تحقیق، وجود دارد.

در تحقیق حاضر به ارزیابی جابه‌جایی ترکیبی در محفظه کشیده با دیواره‌های متحرک و پرشده از سیال پایه و نانوسیال در نسبت سرعت (V.R) و نسبت منظرهای (A.R) گوناگون پرداخته شده است. محفظه مورد مطالعه در چهار نسبت سرعت ۰/۲، ۰/۷، ۱ و ۲، و سه نسبت منظر ۱، ۲ و ۴ مورد بررسی قرار گرفته و تغییرات خطوط جریان و دما تحلیل گردیده و نتایج ذیل حاصل شده‌است:

۱- در نسبت منظرهای مختلف مورد مطالعه، نحوه ایجاد گردابه‌ها درون محفظه و شدت آن‌ها نقش مهمی را در انتقال حرارت کلی محفظه ایفاء می‌کند. در محفظه‌های کشیده (نسبت منظرهای بالا) به دلیل ضعف گردابه‌ها و موقعیت قرارگیری آنان، انتقال حرارت دستخوش تغییرات عمده می‌گردد.

## مراجع

- [1] Godson, L., Raja, B., Lal, D.M., Wongwises, S. (2010). "Enhancement of heat transfer using nanofluids-An overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 2, pp. 629-641.
- [2] Sarkar, J. (2011). "A critical review on convective heat transfer correlations of nanofluids". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 6, pp. 3271-3277.
- [3] Mohammed, H.A., Bhaskaran, G., Shuaib, N.H., Saidur, R. (2011). "Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1502-1512.
- [4] Khanafer, k., vafai, k., Lightstone, M. (2003). "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 19, pp. 3639-3653.
- [5] Oztop, H.F., Abu-Nada, E. (2008). "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids". *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, No. 5, pp. 1326-1336.
- [6] Aminossadati, S.M., Ghasemi, B. (2011). "Natural convection of water-CuO nanofluid in a cavity with two pairs of heat source-sink". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 5, pp. 672-678.
- [7] Sheikhzadeh, G.A., Arefmanesh, A., Mahmoodi, M. (2011). "Numerical study of natural convection in a differentially-heated rectangular cavity filled with TiO<sub>2</sub>water nanofluid". *Journal of nanoresearch*, Vol. 13, pp. 75-80.
- [8] Alloui, Z., Vasseur, P., Reggio, M. (2011). "Natural convection of nanofluids in a shallow cavity heated from below". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 3, pp. 385-393.
- [9] Ghasemi, B., Aminossadati, S.M. (2010). "Brownian motion of nanoparticles in a triangular enclosure with natural convection". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 6, pp. 931-940.



- [10] Mahmoodi, M. (2011). "Mixed convection inside nanofluid filled rectangular enclosures with moving bottom wall". *Thermal Science*, Vol. 15, No. 3, pp. 889-903.
- [11] Saleh, H., Roslan, R., Hashim, I. (2011). "Natural convection heat transfer in a nanofluid filled trapezoidal enclosure". *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 54, No. 1, pp. 194-201.
- [12] Nikfar, M., Mahmoodi, M. (2012). "Meshless local Petrov–Galerkin analysis of free convection of nanofluid in a cavity with wavy side walls". *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 36, No. 3, pp. 433–445.
- [13] Mahmoodi, M., Hashemi, S.M. (2012). "Numerical Study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures". *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 55, pp. 76-89.
- [14] Iwatsu, R., Hyun, J., Kuwahara, K. (1993). "Mixed convection in a driven cavity with a stable vertical temperature gradient". *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 36, No. 6, pp. 1601-1608.
- [15] Khanafer, K., Chamkha, A.J. (1999). "Mixed convection flow in a lid-driven enclosure filled with a fluid-saturated porous medium". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, No. 13, pp. 2465-2481.
- [16] Aydin, O. (1999). "Aiding and opposing mechanisms of mixed convection in a shear and buoyancy-driven cavity". *International Communication of Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 7, pp. 1019-1028.
- [17] Chamkha, A.J., (2002). "Hydromagnetic combined convection flow in a vertical lid driven cavity enclosure with internal heat generation or absorption". *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 41, No. 5, pp. 529-546.
- [18] Khanafer, K.M., Al-Amiri, A.M., Pop, I. (2007). "Numerical simulation of unsteady mixed convection in a driven cavity, using an externally excited sliding lid". *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 26, No. 5, pp. 669-687.
- [19] Waheed, M.A. (2009). "Mixed convective heat transfer in rectangular enclosures driven by a continuously moving horizontal plate". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 21, pp. 5055-5063.
- [20] Tiwari, R.K., Das, M.K. (2007). "Heat transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially heated square cavity utilizing nanofluids". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 9, pp. 2002–2018.
- [21] Muthamilselvan, M. Kandaswamy, P., Lee, J. (2010). "Heat transfer enhancement of copper-water nanofluids in a lid-driven enclosure". *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 15, No. 6, pp. 1501-1510.
- [22] Hemat Esfe, M., Ghadak, F., Haghiri, A., Mirtalebi, S. (2012). "Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Two-sided Inclined Lid-driven Cavity Utilizing Nano-fluid with Various Inclination Angles and Ununiformed Temperature". *Aerospace Mechanics Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 69-83.
- [23] Fereidoon, A., Saedodin, S., Hemmat Esfe, M., Noroozi, M.J. (2013). "Evaluation of mixed convection in inclined square lid driven cavity filled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid". *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 55–65.
- [24] Sadodin, S., Hemmat Esfe, M., Noroozi, M.J. (2011). "Numerical simulation of mixed convection of fluid flow and heat transfer within car radiator with an inside obstacle filled with nanofluid". *E-Modeling*, Vol. 9, No. 25, pp. 33-46.
- [25] Jang, S.P., Lee, J.H., Hwang, K.S., Choi, S.U.S. (2007). "Particle concentration and tube size dependence of viscosities of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluids flowing through micro- and minitubes". *Applied Physics Letters*, Vol. 91, pp. 24-31.
- [26] Abu-Nada, E., Masoud, Z., Oztop, H.F., Compo, A. (2010). "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures". *Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 3, pp. 479-491.
- [27] Hamilton, R.L., Crosser, O.K. (1962). "Thermal conductivity of heterogeneous two component systems". *Industrial & Engineering chemistry fundamentals*, Vol. 1, No. 3, pp. 187–191.

- [28] Xu, J., Yu, B., Zou, M., Xu, P. (2006). "A new model for heat conduction of nanofluids based on fractal distributions of nanoparticles". Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 39, No. 20, pp. 4486–4490.
- [29] Hadjisophocleous, G.V., Sousa, A.C.M., Venart, J.E.S. (1998). "Predicting the transient natural convection in enclosures of arbitrary geometry using a nonorthogonal numerical model". Numerical Heat Transfer, Part A Applications, Vol. 13, No. 3, pp. 373–392.
- [30] Abu-Nada, E., & Chamkha, A.J. (2010). "Mixed convection flow in a lid driven square enclosure filled with a nanofluid". European Journal of Mechanics-B/Fluids, Vol. 29, No. 6, pp. 472–482.

فهرست اعلام و اختصارات		Greek symbols	
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه $J kg^{-1} K^{-1}$	$\alpha$	نفوذ حرارتی $m^2 s$
Gr	عدد گراشف	$\beta$	ضریب انبساط گرمایی $K^{-1}$
g	شتاب گرانش $m s^{-2}$	$\theta$	دمای بدون بعد
h	ضریب انتقال حرارت $W m^{-2} K^{-1}$	$\mu$	ویسکوزیته دینامیکی $kg m^{-1} s^{-1}$
L	طول محفظه $m$	$\nu$	ویسکوزیته سینماتیکی $m^2 s^{-1}$
H	ارتفاع محفظه $m$	$\rho$	چگالی $kg m^{-3}$
Nu	عدد ناسلت	$\varphi$	کسر حجمی نانوذرات
p	فشار $N m^{-2}$		
P	فشار بدون بعد		
Pr	عدد پرانتل	<b>زیرنویس</b>	
$U_0$	سرعت دیواره $m s^{-1}$	c	سرد
Re	عدد رینولدز	eff	موثر
Ri	عدد ریچاردسون	f	سیال
k	ضریب هدایت حرارتی $W m^{-1} K^{-1}$	h	داغ
T	دما $K$	nf	نانوسیال
$V.R$	نسبت سرعت دیواره‌های متحرک	s	ذرات جامد
u, v	سرعت در جهت های افقی و عمودی $m s^{-1}$	w	دیواره
$U, V$	سرعت بدون بعد در جهت های افقی و عمودی		
x, y	مختصات کارتیزین $m$		
$X, Y$	مختصات کارتیزین بدون بعد		