



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره چهل و شش، شماره ۱، تابستان ۱۳۹۳، صفحه ۱ تا ۱۲  
Vol. 46, No. 1, Summer 2014, pp. 1-12



نشریه علمی - پژوهشی امیرکبیر (مهندسی مکانیک)  
Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering)  
(AJSR - ME)

## مطالعه اثر زاویه قرارگیری محفظه و جهت حرکت دیوارهای متحرک آن روی جابجایی ترکیبی نانوسیال با خواص متغیر

حسین خراسانی زاده<sup>۱\*</sup>، نجمه حاجی علی گل<sup>۲</sup>، معصومه ابراهیم قمی<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

۳- مربی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد الیگودرز

(دریافت ۱۳۹۰/۳/۳۱، پذیرش ۱۳۹۱/۱۱/۹)

### چکیده

در این مقاله اثر زاویه قرارگیری محفظه مربعی شکل و جهت حرکت دیواره‌ها روی جابجایی ترکیبی نانوسیال در دو حالت متفاوت بررسی شده است. در حالت اول جابجایی اجباری و طبیعی یکدیگر را تقویت می‌نمایند ولی در حالت دوم اثر مخالف روی یکدیگر دارند. زاویه قرارگیری محفظه از صفر تا ۹۰ درجه تغییر داده شده است. مدلسازی‌ها برای شرایطی که رسانایی و ویسکوزیته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با دما و غلظت نانوذره متغیر فرض شده و نیز برای شرایط ثابت بودن آنها با دما انجام شده و کسر حجمی نانوذرات بین صفر تا ۸٪ تغییر داده شده است. برای حل معادلات حاکم از الگوریتم سیمپل و روش حجم کنترل استفاده شده است. بر مبنای نتایج، افزایش زاویه محفظه که باعث افزایش نقش جابجایی اجباری می‌شود، باعث می‌شود سه عدد سلول جابجایی‌کننده در زوایای کم تبدیل به یک سلول در زوایای زیاد شود. در هر زاویه روند تغییرات ناسلت متوسط با کسر حجمی برای وضعیت با خواص ثابت با دما، مشابه با وضعیت خواص متغیر با دما نیست. بنابراین، اگر نتایج دقیق مورد نظر است، باید وابستگی خواص به دما همواره در مدلسازی‌ها مورد توجه قرار گیرد.

### کلمات کلیدی

محفظه مربعی شکل، نانوسیال، زاویه قرارگیری، خواص متغیر، کسر حجمی نانوذرات.

\* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات  
Email: khorasan@kashanu.ac.ir

## ۱- مقدمه

بدلیل محدودیت‌های خواص حرارتی سیالات معمولی استفاده از نانوسیال‌ها رو به گسترش است. در واقع نانوسیال شامل ذراتی با ابعاد نانومتر است که در سیال پایه پخش می‌شوند. چوی [۱] نشان داد که انتقال حرارت در نانوسیال حاوی نانوذرات با رسانایی بالا افزایش می‌یابد. خانافر و همکاران [۲] بر روی انتقال حرارت نانوسیال در یک محفظه دوعدی در محدوده‌های متفاوتی از عدد گراشف و کسر حجمی نانوذرات تحقیقاتی انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در هر عدد گراشف با افزایش کسر حجمی نانوذرات انتقال حرارت افزایش می‌یابد. مطالعه روی انتقال حرارت ترکیبی در یک محفظه شامل نانوسیال توسط طالبی و همکاران [۳] انجام شد. آنها اثر کسر حجمی، عدد رایلی و عدد ریچاردسون را بر روی الگوی جریان و مشخصه‌های انتقال حرارت بررسی نمودند و به این نتیجه رسیدند که افزایش کسر حجمی نانوذره تاثیر مثبتی بر روی انتقال حرارت دارد.

خواص نانوسیال مانند ویسکوزیته و رسانایی، بر روی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی اثر دارند؛ با این وجود تاکنون در بیشتر مطالعات عددی انجام شده وابستگی ویسکوزیته و رسانایی سیالات استفاده شده به دما در نظر گرفته نشده است. اخیراً نامبرو و همکاران [۴] تاثیر اندازه نانوذره را بر روی ویسکوزیته در محدوده‌های دمایی مختلف به طور آزمایشگاهی بررسی نمودند. علاوه بر آنها، جانگ و چوی [۵] نیز تاثیر دما و اندازه نانوذره را بر روی رسانایی نانوسیال به طور آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایش‌های نامبرو و همکاران [۴] و جانگ و چوی [۵] ثابت نمود که خواص نانوسیال به دما و کسر حجمی وابسته است و این وابستگی باید همواره مورد توجه باشد.

اثر وابستگی ویسکوزیته نانوسیال به غلظت نانوذره در محدوده‌های دمایی متفاوت توسط نوین و همکاران [۶] و آنگومینستا و همکاران [۷] به‌طور آزمایشگاهی بررسی شد. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما، به خصوص در

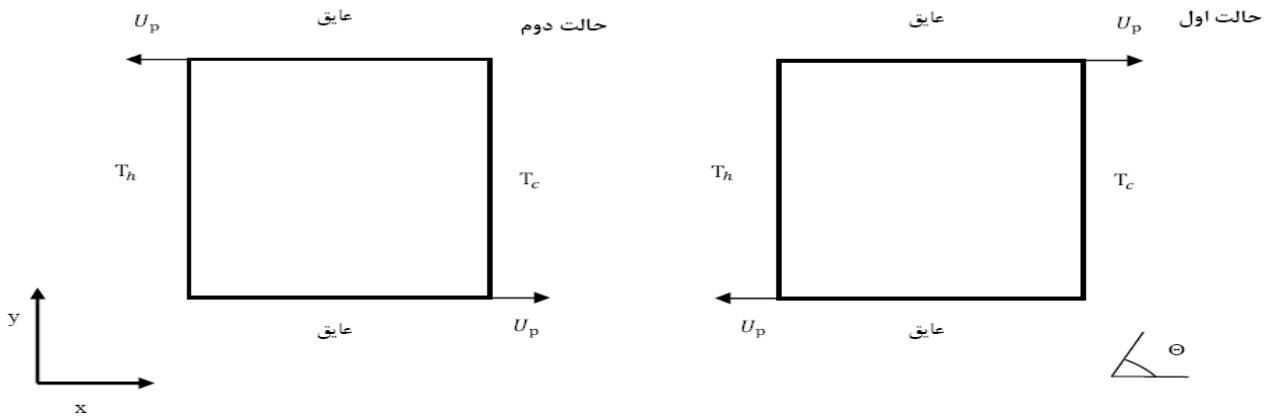
غلظت‌های بالای نانوذره، ویسکوزیته کاهش می‌یابد. همچنین چون و همکاران [۸] با انجام آزمایش وابستگی رسانایی نانوسیال به دما و کسر حجمی را تشخیص دادند.

ابونادا [۹ و ۱۰] اثر خواص متغیر نانوسیال‌های آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید مس را بر روی جابجایی طبیعی در یک هندسه حلقوی بررسی نمود. او به این نتیجه رسید که با افزایش کسر حجمی انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در یک مطالعه عددی دیگر مقایسه بین اثر خواص متغیر با خواص ثابت در موضوع جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی توسط ابونادا و همکاران [۱۱] انجام شد. نتایج حاصل از کار آنها نشان داد که وابستگی ویسکوزیته و رسانایی به دما و کسر حجمی نقش مهمی در الگوی جریان و انتقال حرارت دارد.

تاکنون مطالعه‌ای بر روی اثر خواص متغیر با دمای نانوسیال بر روی انتقال حرارت از نوع جابجایی اجباری یا ترکیبی انجام نشده است. در این تحقیق جابجایی ترکیبی در یک محفظه مربعی شکل در زوایای مختلف قرارگیری آن در دو حالت متفاوت از نظر حرکت دیواره‌های بالایی و پایینی بررسی شده است. ویسکوزیته نانوسیال به عنوان تابعی از دما و کسر حجمی نانوذره در نظر گرفته شده و در این خصوص از نتایج آزمایشگاهی نوین و همکاران [۶] استفاده شده است. برای رسانایی نیز رابطه ارائه شده توسط چون و همکاران [۸] که تابعی از دما و کسر حجمی نانوذره است بکار گرفته شده است.

## ۲- هندسه مساله و معادلات حاکم

هندسه مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این محفظه مربعی شکل، دیواره‌های بالایی و پایینی عایق فرض شده و دیواره‌های چپ و راست در دو دمای متفاوت ولی ثابت قرار دارند. در حالت اول دیوار بالایی با سرعت  $U_p U_p$  به سمت راست و دیوار پایین با همان سرعت به سمت چپ حرکت می‌نماید.



شکل (۱): محفظه با شرایط مرزی اعمال شده

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

$$\rho_{nf,0} \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + [\phi \rho_{p,0} \beta_s + (1-\phi) \rho_{f,0} \beta_f] g (T - T_c) \sin \theta \quad (2)$$

$$\rho_{nf,0} \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + [\phi \rho_{p,0} \beta_s + (1-\phi) \rho_{f,0} \beta_f] g (T - T_c) \cos \theta \quad (3)$$

$$(\rho c_p)_{nf} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (4)$$

در معادلات (۱) تا (۳):

$$\rho_{nf,0} = (1-\phi) \rho_{f,0} + \phi \rho_{p,0} \quad (5)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1-\phi) (\rho \beta)_f + \phi (\rho \beta)_p \quad (6)$$

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

در حالت دوم حرکت دیوارهای بالا و پایین بر عکس حالت اول است. برای زوایای قرارگیری محفظه مقادیر صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است. فرض شده محفظه از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم پر شده باشد. نانوسیال به صورت نیوتنی و غیر قابل تراکم فرض شده و جریان، آرام در نظر گرفته شده است. سیال پایه و نانوذره در شرایط تعادل دمایی و با سرعت یکسان فرض شده‌اند. خواص ترموفیزیکی سیال پایه (آب) و نانوذرات در جدول (۱) به نمایش درآمده است.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی سیال پایه (آب) و نانوذرات [۸]

خواص	آب	نانوذرات $Al_2O_3$
گرمای ویژه (J/Kg.K)	۴۱۷۹	۷۶۵
چگالی ( $kg/m^3$ )	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
قطر (nm)	۰/۳۸۴	۴۷
رسانایی (W/m.K)	۰/۶	۲۵
ضریب انبساط (1/K)	$12 \times 10^{-5}$	$0.085 \times 10^{-5}$

به جز در جمله شناوری در معادله مومنتوم، چگالی ثابت در نظر گرفته شده است و در این جمله برای چگالی از تقریب بوزینسک استفاده شده است. در تمام معادلات ویسکوزیته و رسانایی نانوسیال با دما و کسر حجمی متغیر در نظر گرفته شده است. با توجه به فرضیات انجام شده، معادلات حاکم شامل پیوستگی، مومنتوم در راستای  $x$  و  $y$  و انرژی به ترتیب عبارتند از:

برای شرایطی که ویسکوزیته فقط تابعی از کسر حجمی نانوسیال به صورت تابعی از دما و کسر حجمی نانوسیال بدست می‌آید عبارتست از:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (14)$$

برای راحتی حل لازم است که معادلات بی‌بعد شوند. عوامل بدون بعد عبارتند از:

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

$$P = \frac{p}{\rho_f U_p^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$

معادلات حاکم به صورت بدون بعد عبارتند از:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (15)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\rho_{f,0}}{\rho_{nf,0}} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re} \times \nu_f \times \rho_{nf,0}} \left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Y} \right) + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial Y} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial X} \frac{\partial U}{\partial X} \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\beta_f \rho_{nf,0}} \text{Ri} \theta \sin \theta \quad (16)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\rho_{f,0}}{\rho_{nf,0}} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re} \times \nu_f \times \rho_{nf,0}} \left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial Y} \right) + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial Y} \frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial X} \frac{\partial U}{\partial Y} \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\beta_f \rho_{nf,0}} \text{Ri} \theta \cos \theta \quad (17)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re} \times \text{Pr} \times \alpha_f \times (\rho c_p)_{nf}} \times \left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \quad (18)$$

Ri در معادلات (16) و (17) نماد عدد بدون بعد ریچاردسون و عبارت از نسبت گراشف به رینولدز به توان دو است. شرایط مرزی عبارتند از:

برای رسانایی موثر که با استفاده از رابطه چون و همکاران [8] به صورت تابعی از دما و کسر حجمی نانوسیال بدست می‌آید عبارتست از:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 64.7 \phi^{0.4076} \left( \frac{d_f}{d_p} \right)^{0.3690} \left( \frac{k_p}{k_f} \right)^{0.7476} \text{Pr}_T^{0.9955} \text{Re}^{1.2321} \quad (8)$$

در رابطه (8) اعداد پرانتل و رینولدز عبارتند از:

$$\text{Pr}_T = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (9)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f k_b T}{3\pi \mu_f l_f} \quad (10)$$

$k_b k_p$  ثابت بولتزمن و برابر با  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  و  $l_f$  فاصله آزاد مولکولی و برابر با  $0.117$  نانومتر است [8].

برای شرایطی که رسانایی فقط تابعی از کسر حجمی نانوذرات فرض شود از رابطه ماکسول-گرات [12] استفاده می‌شود:

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

ویسکوزیته نانوسیال آب-اکسیدآلومینیوم به صورت تابعی از دما و کسر حجمی نانوذرات عبارتست از [6]:

$$\mu_{nf} = \exp(3.003 - 0.04203T - 0.5445\phi + 0.0002553T^2 + 0.0524\phi^2 - 1.622\phi^{-1}) \times 10^{-3} \quad (12)$$

در رابطه (12) واحد لزجت سانتی‌پویز و واحد دما درجه سلسیوس است. لزجت سیال پایه نیز با دما متغیر در نظر گرفته می‌شود [11] و رابطه تغییراتش عبارت است از:

$$\mu_f = (1.2723 \ln T^5 - 8.736 \ln T^4 + 33.708 \ln T^3 - 246.6 \ln T^2 + 518.78 \ln T + 1153.9) \times 10^{-6} \quad (13)$$

جدول (۲): مقدار ناسلت متوسط در مطالعه استقلال نتایج از شبکه

شبکه بندی	ناسلت متوسط
۶۱×۶۱	۴/۸۵۰
۸۱×۸۱	۴/۹۳۴
۱۰۱×۱۰۱	۴/۹۴۵
۱۲۱×۱۲۱	۴/۹۵۶
۱۴۱×۱۴۱	۴/۹۷۳
۱۶۱×۱۶۱	۴/۹۷۳

برای بررسی اعتبار روش عددی به کار گرفته شده و درستی نتایج، جابجایی آزاد داخل محافظه برای شرایط مشابه با کارهای محققین دیگر مدلسازی شد و عدد ناسلت متوسط بدست آمده با نتایج این محققین در جدول (۳) مقایسه شده است.

جدول (۳): مقایسه بین ناسلت متوسط روی دیوار گرم در مطالعه حاضر

با نتایج سایر محققین

Ra=۱۰ <sup>۵</sup>	Ra=۱۰ <sup>۴</sup>	Ra=۱۰ <sup>۳</sup>	
۴/۵۱۴	۲/۲۴۲	۱/۱۲۰	مطالعه حاضر
۴/۵۲۲	۲/۲۴۵	۱/۱۱۸	خانافر و همکاران [۲]
۴/۵۱۹	۲/۲۴۳	۱/۱۱۸	دیول دیویس [۱۴]
۴/۰۱	۲/۲۴۵	۱/۱۱۴	باراکوس و میتسولیس [۱۵]
۴/۶۴۶	۲/۳۰۲	۱/۰۵۲	فوسگی و همکاران [۱۶]
۴/۴۳	۲/۲۰۱	۱/۱۰۸	مارکاتس و پریکلس [۱۷]

همچنین برای اطمینان از صحت نتایج مدلسازیها با خواص متغیر، جابجایی آزاد مربوط به هندسه و شرایط تحقیق ابونادا و همکاران [۱۱] شبیه سازی شد. عدد ناسلت محاسبه شده روی دیوار گرم حاصل از شبیه سازی حاضر با نتایج حاصل از کار ابونادا و همکاران در شکل (۲) مقایسه شده است. از نتایج بدست آمده مشخص است که تطبیق بسیار خوبی وجود دارد. بنابراین با توجه به مجموع نتایج مربوط به اعتبارسنجیهای انجام شده نسبت به صحت نتایج شبیه سازیها در تحقیق حاضر اطمینان حاصل شده است.

$$Y = 0, 0 \leq X \leq 1: \quad U = 1 \text{ or } -1, V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

$$Y = 1, 0 \leq X \leq 1: \quad U = 1 \text{ or } -1, V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

$$X = 0, 0 \leq Y \leq 1: \quad U = V = 0, \theta = 1$$

$$X = 1, 0 \leq Y \leq 1: \quad U = V = 0, \theta = 0$$

معادلات (۱۵) تا (۱۸) با توجه به شرایط مرزی گفته شده به طور عددی با روش حجم کنترل و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل می شوند. پس از مشخص شدن میدان دما و جریان، میزان انتقال حرارت تخمین زده می شود. بدین منظور ناسلت محلی و متوسط روی دیوار گرم محاسبه می شوند. مقدار ناسلت محلی در هر  $Y$  عبارتست از:

$$Nu = \frac{-k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{x=0} \quad (19)$$

برای محاسبه  $k_{nf}/k_f$  در رابطه (۱۹) بسته به مورد از رابطه (۸) یا (۱۱) استفاده شده است. مقدار ناسلت متوسط روی دیوار گرم عبارتست از:

$$Nu_{avg} = \int_0^1 Nu(Y) dY \quad (20)$$

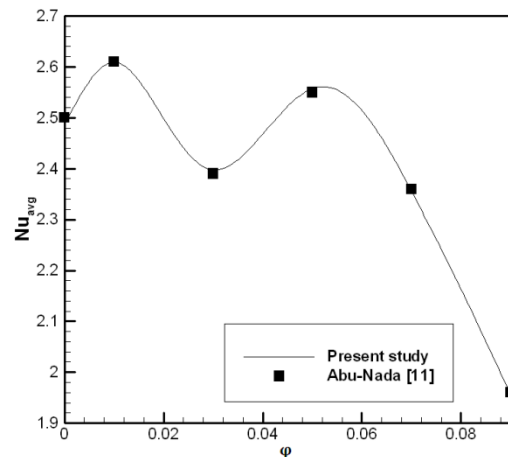
### ۳- روش حل عددی، استقلال از شبکه و اعتبارسنجی

در شبیه سازی انجام شده، معادلات حاکم به روش عددی و با استفاده از روش حجم کنترل حل شده اند و بدین منظور از شبکه بندی یکنواخت استفاده شده است. الگوریتم سیمپل برای تصحیح فشار به کار برده شده است. برای جداسازی جملات جابجایی در معادلات، طرح بالادست مرتبه دوم و بسط مرکزی استفاده شده است. برای یافتن شبکه بهینه، عدد ناسلت متوسط بدست آمده با استفاده از تعداد گره های متفاوت بررسی شد. این مطالعه برای حالت دوم، زاویه صفر درجه، عدد ریچاردسون ۱۰ و کسر حجمی ۴٪ صورت گرفت و نتایج حاصل در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) می توان به این نتیجه رسید که برای شبکه  $141 \times 141$  عدد ناسلت بدست آمده از تعداد نقاط شبکه مستقل شده است. بنابراین در تمام شبیه سازیها از این شبکه استفاده شده است.

قرارگیری محفظه، در شکل (۵) الف مولفه  $x$  سرعت روی خط میانی برای حالت اول و زوایای مختلف قرارگیری محفظه وقتی کسر حجمی ۰.۴٪ باشد نشان داده شده است. در شکل (۵) الف دیده می‌شود که افزایش زاویه، مقدار مطلق مولفه  $x$  سرعت را بیشتر می‌نماید. این واقعیت بیانگر افزایش اثر جابجایی اجباری با افزایش زاویه و نقش آن روی قدرت سلول جابجایی‌کننده است. برای بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات، در شکل (۶) الف همین سرعت برای زاویه صفر قرارگیری محفظه و سه مقدار از  $\phi$  به نمایش درآمده است. از شکل (۶) الف این نتیجه بدست می‌آید که افزایش کسر حجمی، باعث تقویت جابجایی اجباری داخل محفظه شده و بنابراین مقدار مطلق مولفه  $x$  سرعت افزایش یافته است.

در شکل (۷) الف برای حالت اول ناسلت موضعی روی دیوار گرم، برای زوایای مختلف قرارگیری محفظه و کسر حجمی ۰.۴٪، نشان داده شده است. با افزایش زاویه، تغییر زیادی در ناسلت موضعی دیده نمی‌شود و این به دلیل اثر موافق جابجایی طبیعی ناشی از نیروی بویانسی و جابجایی اجباری ناشی از حرکت دیوار بالایی و پایینی است. برای پی‌بردن به اثر افزایش کسر حجمی، در شکل (۸) الف ناسلت موضعی برای زاویه صفر قرارگیری محفظه و سه مقدار از  $\phi$  به نمایش درآمده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت محلی را بطور جزئی افزایش می‌دهد.

**حالت دوم:** حرکت دیوار بالایی از راست به چپ و دیوار پایینی از چپ به راست است. خطوط جریان و خطوط همدمای برای این حالت در شکل (۴) آمده است. در این مورد جابجایی طبیعی و اجباری هم‌جهت نیستند و اثر یکدیگر را تضعیف می‌نمایند. جابجایی طبیعی در این حالت در جهت عقربه‌های ساعت است در صورتی‌که جابجایی اجباری ناشی از حرکت دیواره‌های بالایی و پایینی جهتی مخالف دارد. در زوایای صفر و ۳۰ درجه گردابه‌ای که در مرکز دیده می‌شود به علت اثر جابجایی طبیعی است و گردابه‌هایی که در سمت پایین و بالای محفظه ایجاد شده و دارای قدرت بیشتری نیز هستند، توسط جابجایی اجباری ایجاد شده‌اند. در این حالت، اثری که افزایش کسر حجمی دارد بیشتر در زوایای قرارگیری صفر و ۳۰ درجه محفظه دیده می‌شود. این اثر کمکی است که افزایش نانوذرات به قدرت جابجایی اجباری می‌نمایند.



شکل (۲): مقایسه بین عدد ناسلت متوسط روی دیوار گرم در مطالعه حاضر

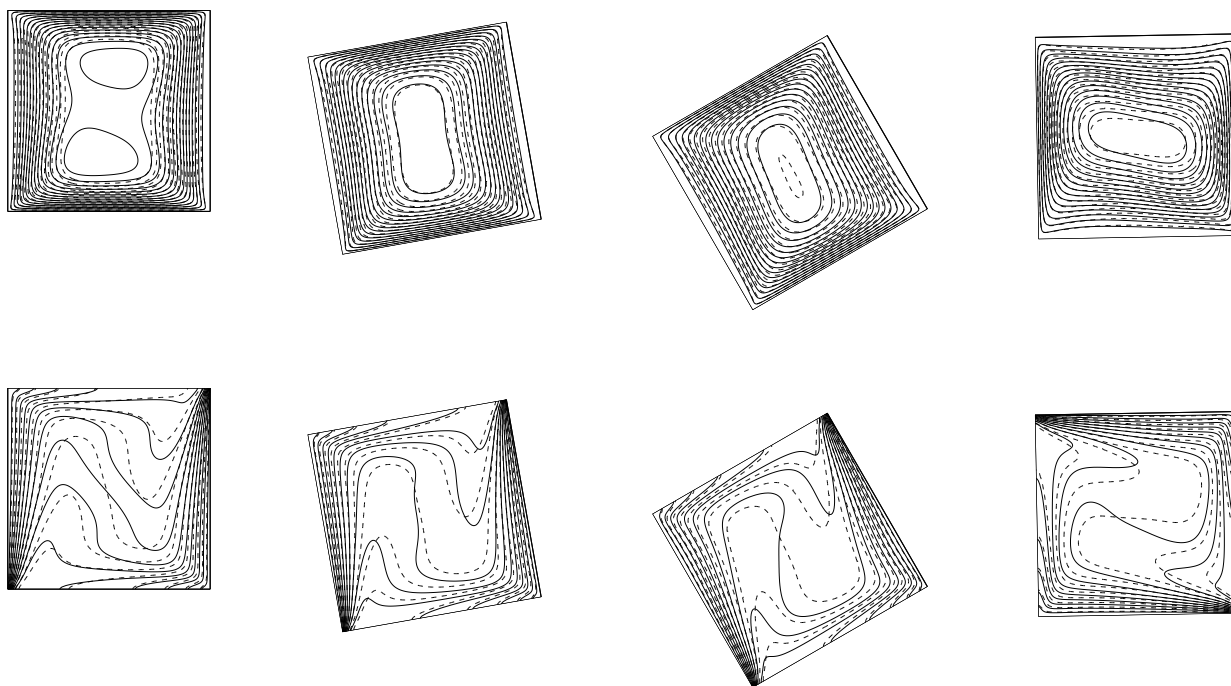
با نتایج حاصل از کار ابونادا و همکاران [۱۱] در زاویه ۱۰° با  $10^{-4}$

#### ۴- بحث و نتایج

در انجام شبیه‌سازی‌ها عدد گراشف ثابت و برابر با  $10^4$ ، عدد ریچاردسون ثابت و برابر ۱۰ و کسر حجمی نانوذرات بین صفر تا ۸ درصد در نظر گرفته شده است. بخشی از نتایج بدست آمده برای دو حالت مختلف از نظر حرکت دیواره‌های بالایی و پایینی در شکل‌های (۳) تا (۸) و جداول (۴) و (۵) ارائه شده‌اند؛ با این وجود در ادامه نتایج مربوط به حالت‌های اول و دوم به ترتیب بحث می‌شوند.

**حالت اول:** حرکت دیوار بالایی از چپ به راست و دیوار پایینی از راست به چپ است. خطوط جریان و خطوط همدمای برای این حالت در زوایای مختلف قرارگیری محفظه در شکل (۳) به نمایش درآمده است. در این مورد جابجایی طبیعی و اجباری جهت موافقی دارند و اثر همدیگر را تقویت می‌نمایند. زمانی که محفظه در زاویه صفر درجه باشد دو ناحیه گردابه‌ای با قدرت کم در مرکز حفره دیده می‌شود. با افزایش زاویه محفظه، جابجایی اجباری در مقایسه با جابجایی آزاد اهمیت بیشتری می‌یابد. بنابراین ناحیه بازگردش از بین می‌رود و متأثر از جهت حرکت دیواره‌ها انحنای سلول جابجایی‌کننده به سمت راست محفظه دیده می‌شود. از مقایسه خطوط همدمای در زوایای مختلف دیده می‌شود که با افزوده شدن کسر حجمی نانوذرات، قدرت جریان افزایش یافته است. این افزایش قدرت به صورت مشخص در زاویه صفر درجه دیده می‌شود، به گونه‌ای که برای این زاویه گردابه‌های ضعیف در مرکز محفظه وجود ندارند. برای بررسی اثر زاویه





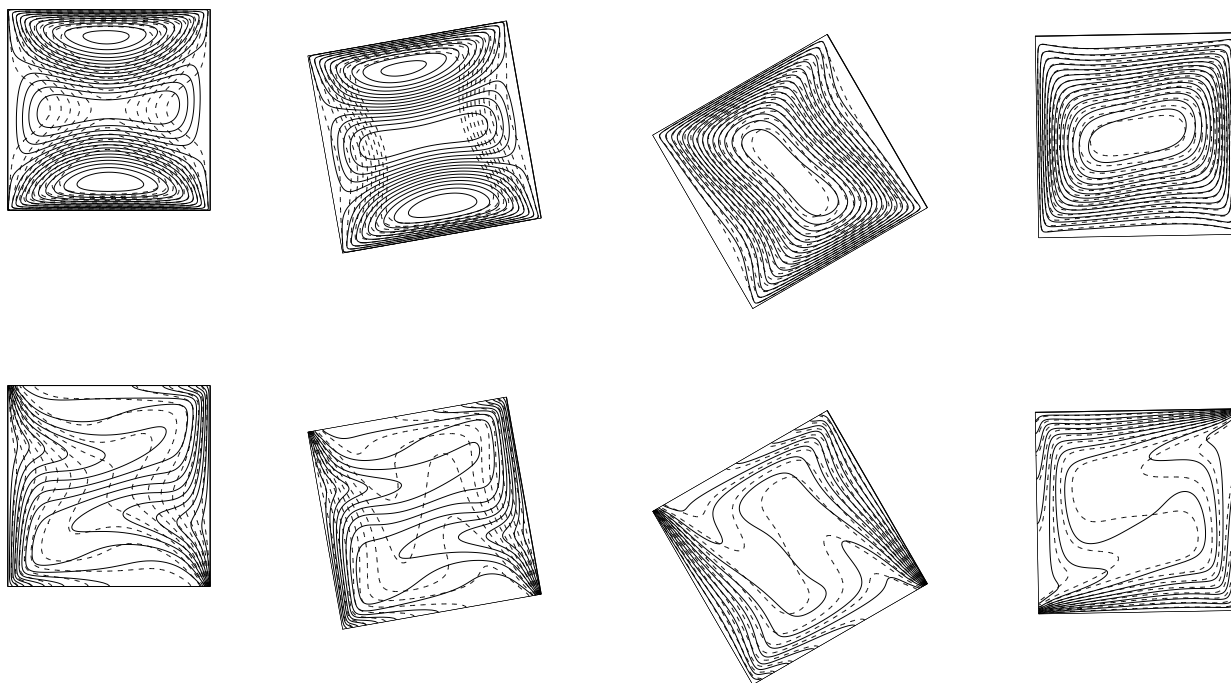
$$\theta = 0^\circ$$

$$\theta = 30^\circ$$

$$\theta = 60^\circ$$

$$\theta = 90^\circ$$

شکل (۳): خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط همدم (ردیف پایین) در زوایای مختلف قرارگیری محفظه و  $Ri=10$  برای حالت اول (خطوط پر سیال خالص و خط چین‌ها نانوسیال با  $\varphi=7.8$ )



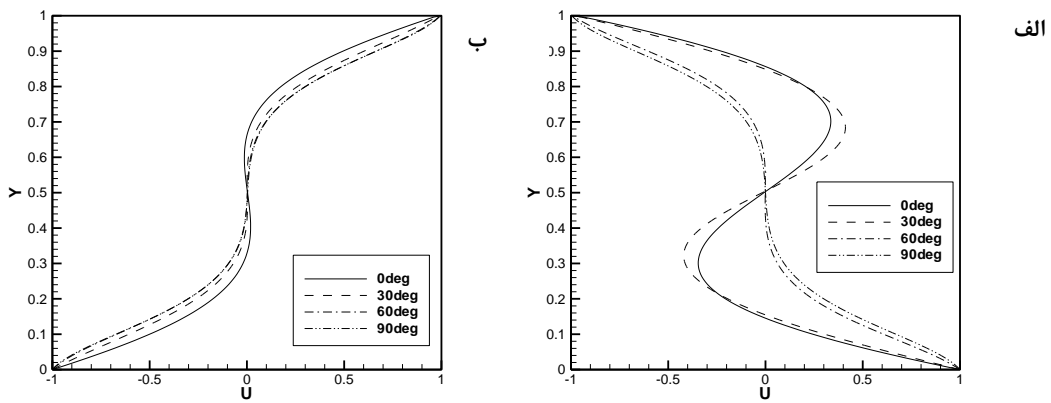
$$\theta = 0^\circ$$

$$\theta = 30^\circ$$

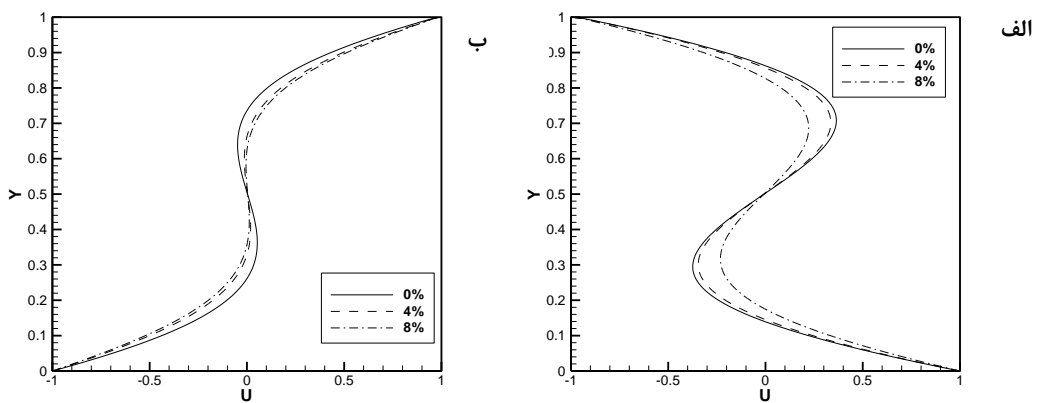
$$\theta = 60^\circ$$

$$\theta = 90^\circ$$

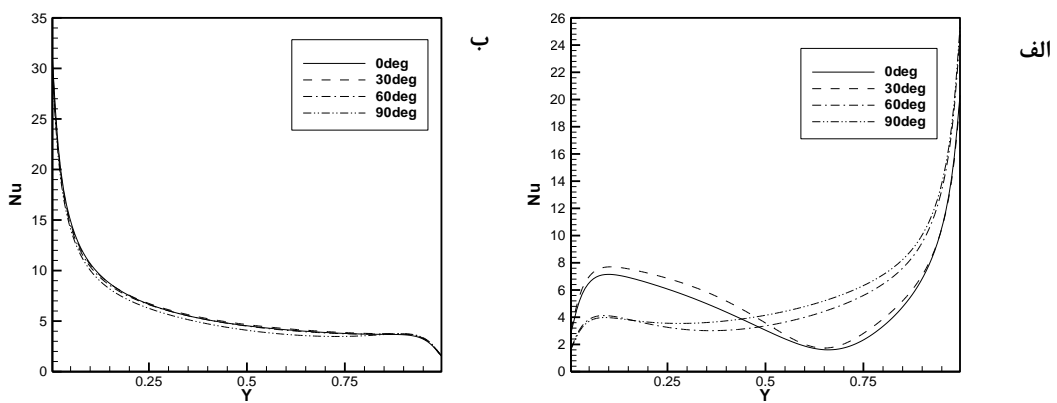
شکل (۴): خطوط جریان (ردیف بالا) و خطوط همدم (ردیف پایین) در زوایای مختلف قرارگیری محفظه و  $Ri=10$  برای حالت دوم (خطوط پر سیال خالص و خط چین‌ها نانوسیال با  $\varphi =$ )



شکل (۵): سرعت افقی روی خط میانی در زوایای مختلف قرارگیری محفظه و  $\varphi = 0.4$  (الف: حالت اول، ب: حالت دوم)

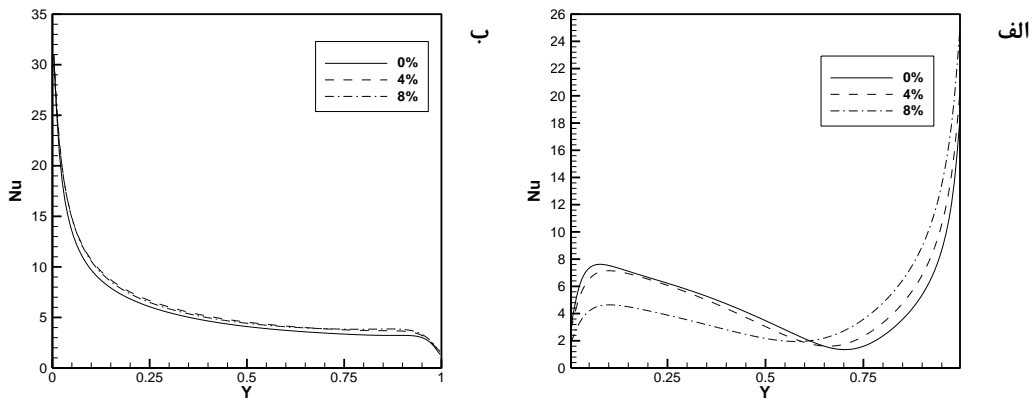


شکل (۶): سرعت افقی روی خط میانی برای  $\varphi = 0$  و  $\theta = 0^\circ$  و ۰.۴ و ۰.۸ (الف: حالت اول، ب: حالت دوم)



شکل (۷): ناسلت موضعی روی دیوار گرم در زوایای مختلف قرارگیری محفظه و  $\varphi = 0.4$  (الف: حالت اول، ب: حالت دوم)





شکل (۸): ناسلت موضعی روی دیوار گرم برای  $\phi = 0$ ، ۴٪ و ۸٪ و  $\theta = 0^\circ$  (الف: حالت اول، ب: حالت دوم)

نشان داده شده است. تا نزدیکی  $Y=1$  به دلیل گرادیان دمایی شدید ناشی از حرکت دیواره پایینی عدد ناسلت افزایش می‌یابد و سپس به دلیل افزایش طول، لایه مرزی حرارتی تا حدود  $Y=0.75$  کاهش در عدد ناسلت دیده می‌شود. همچنین در انتهای بالایی دیواره به علت وجود گرادیان شدید دمای ناشی از حرکت دیواره بالایی عدد ناسلت دوباره افزایش می‌یابد. در شکل (۸) - ب ناسلت موضعی برای زاویه صفر قرارگیری محفظه و سه مقدار از  $\phi$  به نمایش درآمده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث کاهش عدد ناسلت محلی در ناحیه پایینی دیوار و افزایش آن در نواحی بالایی دیوار شده است. در این زاویه انتقال حرارت ناشی از جابجایی آزاد در مقایسه با دیگر زوایا بیشترین اثر را دارد. در این خصوص لازم است به جهت حرکت دیواره‌های پایینی و بالایی توجه شود. با افزایش کسر حجمی نانوذرات اثر مخالف جابجایی اجباری تقویت شده و در گوشه پایینی دیوار گرم باعث کاهش ناسلت و در گوشه بالایی باعث افزایش ناسلت می‌شود.

مقادیر عدد ناسلت متوسط بر روی دیوار گرم برای دو حالت اول و دوم به ترتیب در جداول (۴) و (۵) گردآوری شده است. برای حالت اول با در نظر گرفتن خواص متغیر، برای همه کسر حجمی‌ها با افزایش زاویه قرارگیری محفظه عدد ناسلت کاهش می‌یابد. این به دلیل کاهش اثر جابجایی آزاد و افزایش طول لایه مرزی حرارتی روی دیوار گرم همراه با افزایش زاویه قرارگیری محفظه است. در این حالت در زوایای بیشتر قرارگیری محفظه، افزایش کسر حجمی نانوذرات اثر بیشتری از نظر افزایش عدد ناسلت داشته است، چون اثر افزایش کسر حجمی نانوذرات تقویت اثر جابجایی اجباری است که در زوایای بیشتر غالب است. در این

برای حالت دوم و زاویه  $30^\circ$  درجه قرارگیری محفظه، در شکل (۴) دیده می‌شود که ناحیه گردابه‌ای در مرکز محفظه برای  $\phi=8\%$  از بین رفته است. ولی برای قرارگیری محفظه در زوایای  $60^\circ$  و  $90^\circ$  درجه افزایش کسر حجمی تاثیر کمتری روی الگوی جریان داشته است و بطور کلی جهت گردش گردابه‌ها توسط جابجایی اجباری تحمیل می‌شود. برای این حالت تضاد در اثر دو نوع جابجایی آزاد و اجباری به خوبی از خطوط همدمای تشخیص داده می‌شود، بگونه‌ای که با افزایش زاویه قرارگیری محفظه به  $60^\circ$  و  $90^\circ$  درجه به تدریج اثر جابجایی طبیعی از بین رفته و جابجایی اجباری حکمفرما شده است. در شکل (۵) - ب برای حالت دوم مولفه  $x$  سرعت روی خط میانی برای زوایای مختلف قرارگیری محفظه و کسر حجمی ۴٪ نشان داده شده است. از این شکل دیده می‌شود که افزایش زاویه قرارگیری محفظه به  $30^\circ$  درجه باعث افزایش مقدار مطلق مولفه افقی سرعت شده است ولی افزایش بیشتر این زاویه، ابتدا به  $60^\circ$  و سپس به  $90^\circ$  درجه، باعث کاهش آن شده است. این به دلیل نقش بیشتری است که جابجایی اجباری در مقایسه با جابجایی آزاد در زوایای بالاتر می‌یابد. در شکل (۶) - ب همین سرعت برای زاویه قرارگیری محفظه برابر صفر و سه مقدار از  $\phi$  به نمایش درآمده است. در شکل (۶) - ب دیده می‌شود که افزایش کسر حجمی باعث افزایش مقدار مطلق مولفه افقی سرعت در نواحی نزدیک به دیواره‌های متحرک ولی باعث کاهش سرعت در نواحی میانی محفظه شده است. این بدلیل تأثیر بیشتر جابجایی اجباری نزدیک دیواره‌های متحرک و جابجایی آزاد در نواحی مرکزی می‌باشد.

در شکل (۷) - ب برای حالت دوم ناسلت موضعی روی دیوار گرم برای زوایای مختلف قرارگیری محفظه و کسر حجمی ۴٪

شبهه‌سازی برای زوایای مختلف قرارگیری محفظه و مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات، برای شرایطی که رسانایی و ویسکوزیته نانوسیال فقط تابعی از کسر حجمی نانوذرات فرض شود، انجام شد. مقادیر ناسلت متوسط روی دیوار گرم، بدست آمده برای این شرایط، نیز در جداول (۴) و (۵) ارائه شده‌اند. دیده می‌شود که با بکارگیری خواص ثابت در هر دو حالت، برای هر زاویه قرارگیری محفظه، با افزایش کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت متوسط همیشه افزایش یافته است. این روند متفاوت با نتایجی است که با فرض خواص متغیر با دما بدست آمده و در جداول (۴) و (۵) ارائه شده‌اند. وقتی از خواص ثابت، بدون توجه به اثر تغییر دما، استفاده می‌شود با افزایش کسر حجمی مطابق رابطه (۱۱) همیشه رسانایی نانوسیال افزایش می‌یابد و بنابراین روند صعودی افزایش ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی قابل توجیه است. در صورتی که در شرایط واقعی تغییر دما باعث تغییر خواصی مثل رسانایی و لزجت نانوسیال می‌شود. مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق برای خواص متغیر و ثابت در موافقت با نظرات محققین دیگر [۴، ۵، ۸ و ۱۱] می‌باشد و مشخص می‌سازد که ضروری است در مطالعاتی که انجام می‌شوند وابستگی خواص به دما در نظر گرفته شوند.

حالت برای هر زاویه قرارگیری محفظه با افزایش کسر حجمی به ۰.۴٪ ناسلت افزایش پیدا نموده است ولی افزایش آن به ۰.۸٪ نه تنها باعث افزایش ناسلت نشده است بلکه باعث کاهش اندک آن شده است.

برای حالت دوم با در نظر گرفتن خواص متغیر، در همه کسر حجمی‌ها با افزایش زاویه قرارگیری محفظه عدد ناسلت افزایش می‌یابد. این دلیل کاهش اثر جریان ناشی از جابجایی آزاد در مقایسه با جریان اجباری همراه با افزایش زاویه می‌باشد. بگونه‌ای که برای زاویه ۹۰ درجه حتی اگر دیواره‌های بالایی و پایینی ساکن نیز فرض شوند هیچ ترجیحی برای جهت چرخش سلول جابجایی کننده ناشی از نیروی بویانسی وجود ندارد. بنابراین در این زاویه هیچ مخالفتی بین اثر جابجایی آزاد و اجباری جود ندارد و به همین دلیل ناسلت بیشترین مقدار است.

مقایسه بین مقادیر ناسلت در جدول (۴) و (۵) نشان می‌دهد که در شرایط برابر از نظر کسر حجمی نانوذرات و زاویه قرارگیری محفظه عدد ناسلت مربوط به حالت دوم نسبت به حالت اول کمتر است. این به دلیل وجود تضاد در جهت جریان‌های ناشی از جابجایی طبیعی و اجباری در حالت دوم است.

برای بررسی بهتر اثر متغیر گرفتن خواص با دما در مقایسه با خواص ثابت، برای دو حالت نشان داده شده در شکل (۱)

جدول (۴): ناسلت متوسط روی دیوار گرم برای حالت اول

نتایج با استفاده از خواص ثابت (رابطه ۱۱ و ۱۴)			نتایج با استفاده از خواص متغیر (رابطه ۸ و ۱۲)			
$\varphi=8\%$	$\varphi=4\%$	$\varphi=0\%$	$\varphi=8\%$	$\varphi=4\%$	$\varphi=0\%$	
۶/۱۵	۵/۸۸	۵/۶۲	۵/۹۸	۶/۰۵	۵/۵۰	$\theta = 0^\circ$
۶/۲	۵/۹۱	۵/۶۱	۶/۰۴	۶/۰۹	۵/۴۹	$\theta = 30^\circ$
۶/۰۸	۵/۷۹	۵/۴۷	۵/۹۵	۵/۹۷	۵/۳۶	$\theta = 60^\circ$
۵/۷۷	۵/۴۶	۵/۱۴	۵/۷۳	۵/۶۸	۵/۰۴	$\theta = 90^\circ$

جدول (۵): ناسلت متوسط روی دیوار گرم برای حالت دوم

نتایج با استفاده از خواص ثابت (رابطه ۱۱ و ۱۴)			نتایج با استفاده از خواص متغیر (رابطه ۸ و ۱۲)			
$\varphi=8\%$	$\varphi=4\%$	$\varphi=0\%$	$\varphi=8\%$	$\varphi=4\%$	$\varphi=0\%$	
۵/۰۷	۴/۹۷	۴/۸۴	۴/۷۰	۵/۰۵	۴/۸۸	$\theta = 0^\circ$
۵/۶۴	۵/۵۳	۵/۳۷	۵/۱۰	۵/۵۲	۵/۳۸	$\theta = 30^\circ$
۵/۵۷	۵/۵۳	۵/۵۲	۵/۴۹	۵/۲۹	۴/۵۶	$\theta = 60^\circ$
۵/۷۷	۵/۴۶	۵/۱۴	۵/۸۳	۵/۷۸	۵/۱۴	$\theta = 90^\circ$

## ۵- نتیجه گیری

در این مطالعه اثر جابجایی ترکیبی نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در محفظه‌ای با زوایای مختلف قرارگیری و دو حالت از نظر حرکت دیوارهای بالایی و پایینی آن بررسی شده است. برخی از نتایج عبارتند از:

در هر دو حالت و با افزایش زاویه قرارگیری محفظه، اثر جابجایی طبیعی کمتر و اثر جابجایی اجباری بیشتر شده است. در حالت اول که جابجایی طبیعی و اجباری جهت موافقی دارند، افزایش زاویه جابجایی اجباری را در مقایسه با جابجایی آزاد قوی‌تر می‌نماید. از مقایسه خطوط هم‌دما در همه زوایا دیده می‌شود که با افزوده شدن کسر حجمی نانوذرات، قدرت جریان افزایش می‌یابد. این افزایش قدرت به‌طور مشخص در زاویه صفر درجه باعث حذف گردابه‌های ضعیف در مرکز محفظه می‌شود.

برای حالت دوم که جابجایی طبیعی با جابجایی اجباری اثر مخالف دارد، در زوایای کم محفظه و متأثر از اثر جابجایی اجباری گردابه‌هایی با قدرت بیشتر در سمت پایین و بالای محفظه و گردابه ضعیفی نیز متأثر از اثر جابجایی طبیعی در مرکز محفظه ایجاد می‌شود. در زوایای بیشتر با تقویت اثر جابجایی اجباری فقط یک سلول جابجایی در محفظه ایجاد می‌شود.

برای حالت اول با در نظر گرفتن خواص متغیر، به دلیل اثر موافق جابجایی طبیعی و اجباری، ناسلت موضعی روی دیوار گرم با تغییر زاویه محفظه کمی کاهش می‌یابد. این به دلیل کاهش اثر جابجایی آزاد و افزایش طول لایه مرزی حرارتی روی دیوار گرم همراه با افزایش زاویه قرارگیری محفظه است. در این حالت در زوایای بیشتر قرارگیری محفظه، افزایش کسر حجمی نانوذرات اثر بیشتری از نظر افزایش عدد ناسلت متوسط دارد؛ این بدین دلیل است که افزایش کسر حجمی نانوذرات جابجایی اجباری که در زوایای بیشتر غالب است را تقویت می‌نماید.

برای حالت دوم و با در نظر گرفتن خواص متغیر، برای همه کسر حجمی‌ها با افزایش زاویه قرارگیری محفظه اثر مخالف جابجایی آزاد با جابجایی اجباری کاهش می‌یابد و عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.

مقایسه بین مقادیر ناسلت متوسط برای شرایط برابر از نظر کسر حجمی نانوذرات و زاویه قرارگیری محفظه نشان می‌دهد که ناسلت متوسط برای حالت دوم نسبت به حالت اول کمتر است. این به دلیل وجود تضاد در جهت جریان‌های ناشی از جابجایی طبیعی و اجباری در حالت دوم است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که اگر رسانایی و ویسکوزیته نانوسیال فقط تابعی از کسر حجمی نانوذرات باشند، همیشه با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. اما اگر وابستگی آنها به دما نیز در نظر گرفته شود افزایش کسر حجمی همیشه باعث افزایش انتقال حرارت نمی‌شود و روند تغییرات ناسلت ثابت نیست. بنابراین لازم است در مدلسازی‌ها وابستگی خواص به دما و کسر حجمی در نظر گرفته شوند.

## ۶- فهرست علائم

$g$	شتاب گرانش، $m/s^2$
$Gr$	عدد گراش
$k_f$	رسانایی سیال، $W/m.K$
$k_p$	رسانایی ذره، $W/m.K$
$Nu$	عدد ناسلت
$Nu_{avg}$	عدد ناسلت متوسط
$p$	فشار، $Pa$
$P$	فشار بدون بعد، $\frac{P}{\rho U_p^2}$
$T$	دما، $K$
$u, v$	سرعت، $m/s$
$U, V$	سرعت بدون بعد
$U_p$	سرعت دیوارها، $\frac{m}{s}$
<b>علائم یونانی</b>	
$\alpha$	پخش حرارتی، $m/s$
$\beta$	ضریب انبساط حجمی، $1/K$
$\phi$	کسر حجمی
$\mu$	لزجت دینامیکی، $Pa.s$
$\nu$	لزجت سینماتیکی، $m^2/s$
$\rho$	چگالی، $kg/m^3$
$\theta$	دمای بدون بعد
$\theta$	زاویه قرارگیری محفظه
<b>زیرنویس‌ها</b>	
$f$	سیال
$nf$	نانوسیال
$0$	مرجع

- ۷- مراجع
- E. Abu-Nada, "Effect of variable viscosity and thermal conductivity of  $Al_2O_3$ -water nanofluid on heat transfer enhancement in water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection", *Int. J. Heat Fluid Flow* 30, 679– 690, 2009. [۹]
- E. Abu-Nada, "Effects of variable viscosity and thermal conductivity of CuO-water nanofluid on heat transfer enhancement in natural convection", *Journal of Heat Transfer*, 132, 052- 401, 2010. [۱۰]
- E. Abu-Nada; Z. Masoud, H. Oztop; A. Campo, "Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures", *Int. J. Thermal Sci.*, 49, 479-491, 2010. [۱۱]
- J.C. Maxwell-Garnett, "Colours in metal glasses and in metallic films", *Philos. Trans. Roy. Soc*, 203, 385– 420, 1904. [۱۲]
- H.C. Brinkman, "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *J. Chem. Phys*, 20, 571– 581, 1952. [۱۳]
- G. De Vahl Davis, "Natural convection of air in a square cavity, a benchmark numerical solution", *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 3, 249– 264, 1983. [۱۴]
- G. Barakos; E. Mitsoulis, "Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall functions", *Int. J. Num. Meth. Fluids*, 18, 695– 719, 1994. [۱۵]
- T. Fusegi; J.M. Hyun; K. Kuwahara; B. Farouk, "A numerical study of three dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34, 1543– 1557, 1991. [۱۶]
- N.C. Markatos; K.A. Pericleous, "Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27, 772– 775, 1984. [۱۷]
- S.U.S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *FED-vol. 231/MD-vol. 66, Developments and Applications of Non- Newtonian Flows*, ASME, New York; 99– 105, 1995. [۱]
- K. Khanafer; K. Vafai; M. Lightston, "Buoyancy- driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, 3639– 3653, 2003. [۲]
- F. Talebi; A.H. Mahmoudi; M. Shahi, "Numerical study of mixed convection flows in a square lid-driven cavity utilizing nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (1), 79– 90, 2010. [۳]
- P.K. Namburu; D.P. Kulkarni; D. Misra, D.K. Das, "Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture", *Exp. Thermal Fluid Sci*, 32, 297– 402, 2007. [۴]
- S.P. Jang; S.U.S. Choi, "Effects of various parameters on nanofluid thermal conductivity", *ASME J. Heat Transfer*, 129, 617– 623, 2007. [۵]
- C.T. Nguyen; F. Desgranges; G. Roy, N. Galanis; T. Mare; S. Boucher; H. Angue Minsta, "Temperature and particle-size dependent viscosity data for water-based nanofluids – hysteresis phenomenon", *Int. J. Heat Fluid Flow*, 28, 1492– 1506, 2007. [۶]
- H. Angue Minsta; G. Roy; C.T. Nguyen; D. Doucet, "New temperature and conductivity data for water-based nanofluids", *Int. J. Therm. Sci*, 48 (2), 363– 371, 2009. [۷]
- C.H. Chon; K.D. Kihm, S.P. Lee; S.U.S. Choi, "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid ( $Al_2O_3$ ) thermal conductivity enhancement", *Appl. Phys. Lett*, 87, 153-107, 2005. [۸]