# جابجایی ترکیبی نانوسیال آب– اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی باز حاوی یک قطعه جامد گرمازا حجت غلامرضایی<sup>۱</sup>، افراسیاب رئیسی<sup>۲\*</sup> و بهزاد قاسمی<sup>۲</sup>

دانشکده فنی مهندسی دانشگاه شهر کر د (تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۴/۲۲)

#### چکیدہ

در این تحقیق، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی، حاوی یک جسم جامد گرمازا، به روش عددی بررسی شده است. نانوسیال با دما و سرعت یکنواخت از گوشه پایین و سمت چپ محفظه وارد آن میشود و به صورت توسعهیافته از گوشه عددی برلا و سمت راست محفظه خارج میشود. جسم جامد قرار گرفته در مرکز محفظه به صورت یکنواخت انرژی تولید می کند. تمام دیوارهای محفظه از نظر حرارتی عایق هستند. معادلات دیفرانسیل حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شدهاند. در این تحقیق، اثر پارامترهای مختلف خارج میشود. جسم جامد قرار گرفته در مرکز محفظه به صورت یکنواخت انرژی تولید می کند. تمام دیوارهای محفظه از نظر حرارتی عایق هستند. معادلات دیفرانسیل حاکم با استفاده از روش حجم محدود گسسته شده و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شدهاند. در این تحقیق، اثر پارامترهای مختلف از قبیل کسر حجمی نانوذرات، عدد ریچاردسون، عدد رینولدز، نسبت منظری، ضریب هدایت حرارتی منبع گرمازا بر روی میدان جریان و نرخ انتقال حرارت، بررسی شدهاند. نتایج نشان می دهد که با افزایش اعداد رینولدز و ریچاردسون، عدد نوسلت و لذا نرخ انتقال حرارت، بررسی شده مید مند ریک محفظه مربعی جریان و نرخ انتقال حرارت، بررسی شده در این می می می می میدان و درم و افزایش می میدن و ریخ انتقال حرارت، بررسی شده در این می مود که با افزایش اعداد رینولدز و ریچاردسون، عدد نوسلت و لذا نرخ انتقال حرارت افزاین می مید. از طرفی، تغییر اندازه ضلع منبع حرارتی باعث تغییر میدان هرا و دما و افزایش ضریاب خرارتی فرارتی می نانوذرات، می می می می می میان و دما و افزایش ضریان می می این خرارت افزایش می یابد. از طرفی، تغییر اندازه ضلع منبع حرارتی باعث تغییر میدان و دما و افزایش ضریان انتقال حرارت از منبع گرمازا به نانوسیال مجاور آن می شود. همچنین، با افزایش ضری می زان می شود. همچنین، با افزایش ضریان انتقال حرارت از منبع گرمازا به نانوسیال مجاور آن می شود. همچنین، با افزایش می برد.

**واژههای کلیدی:** جابجایی ترکیبی، محفظه، نانوسیال، تولید حرارت، بوسیله جسم جامد

## Mixed Convection of a Water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluid in an Open Square Cavity, Containing a Solid Body Heat Source

H. Gholamrezaee, A. Raisi, and B. Ghasemi

Mechanical Engineering Department Shahrekord University

#### (Received: 2/December/2016; Accepted: 13/July/2017)

## ABSTRACT

In this study, mixed convection of a water- $Al_2O_3$  nanofluid was numerically investigated in an open square cavity. All cavity walls were insulated and a solid body heat source was placed at the center of the cavity. The nanofluid enters the cavity with uniform velocity and temperature and leaves it as a fully developed flow. The governing equations were discretized using finite volume method and using Patankar's SIMPLE algorithm. The effects of relevant parameters, such as Reynolds and Richardson numbers, length ratio (The ratio of the heat source length to the length of the cavity), the source thermal conductivity, and solid volume fraction of the nanoparticles were examined, both from flow field and the heat transfer rate considerations. The results show that the average Nusselt number increases with increase in Reynolds and Richardson numbers. A change in length ratio changes the flow and temperature fields. In addition, Increase of heat source thermal conductivity increases the average Nusselt number. The results also show that thermal performance of cavity is enhanced by increasing solid volume fraction of the nanoparticles.

Keywords: Mixed Convection, Cavity, Nanofluid, Heat Generation, Solid Body

h.gholamrezayi@gmail.com - دانشجوی کارشناسی ارشد:

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): raisi@eng.sku.ac.ir

۳- استاد: ghasemi@eng.sku.ac.ir

## فهرست علائم

а	عرض دهانه ورودی و خروجی محفظه، $\mathrm{m}^2$
Α	عرض بیبعد دهانه ورودی و خروجی محفظه
AR	نسبت ابعادی
$C_P$	ظرفیت گرمایی، J/kgK
g	گرانش، m/s <sup>2</sup>
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، W/m <sup>2</sup> K
$k_f$	ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال پایه، W/mK
k <sub>s</sub>	ضریب انتقال حرارت هدایتی جامد، W/mK
$\overline{k}$	نسبت ضريب انتقال حرارت هدايتي
l	طول ضلع منبع حرارتی، m
L	طول ضلع محفظه، m
Ν	تعداد گل گرەھا
$Nu_m$	عدد نوسلت متوسط
р	فشار، N/m <sup>2</sup>
Р	فشار بىبعد
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
Ri	عدد ریچاردسون
Т	دما، K
<i>u</i> , <i>v</i>	مؤلفههای افقی و عمودی سرعت، m/s
U ,V	مؤلفههای افقی و عمودیی سرعت بیبعد
<i>x</i> , <i>y</i>	مختصات کارتزین، m
XY	مختصات بدمن بعد

## علائم يونانى

α	ضریب پخش گرما، m²/s
β	ضریب انبساط حرارتی، 1/K
$\theta$	دمای بیبعد،
$\theta_{\max}$	ماکزیمم دمای بیبعد
μ	ویسکوزیته دینامیکی، N/m <sup>2</sup> s
υ	ویسکوزیته سینماتیکی، m <sup>2</sup> /s
ρ	چگالی، kg/m <sup>3</sup>
$\phi$	کسر حجمی نانو سیال
$\psi_{\rm max}$	ماكزيمم تابع جريان

## زير نويس ها

مقدار متوسط	m
نانو سيال	nf
سيال پايه	f
نانوذرات	p
ورودى	i
سرد	С

max بیشترین min کمترین

### ۱– مقدمه

انتقال حرارت همواره یکی از جنبههای مهم و تأثیر گذار در زندگی انسان بوده است. سالهاست که تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت می گیرد که عمده آن ها به قصد بهبود و تسریع انتقال حرارت انجام شده است. در دهههای اخیر مقالات و پژوهشهای فراوانی در خصوص نانوسیال ها، محفظههای بسته، انتقال حرارت در کنار هیتر گرمایی و غیره انجام گرفته است. از این تحقیقات می توان به فعالیت محمودی و قاسمی [1]، اشاره کرد که اثر حرکت یک بافل را روی انتقال حرارت جابجایی در یک کانال با قطعات گرمازا بررسی کردند و از نتایج مهم آن می توان به افزایش انتقال حرارت جابه جایی در اعداد ریچاردسون پایین با اضافه کردن بافل به کانال اشاره کرد. محمودی و همکاران [۲]، در مطالعه عددی خنککاری گرمکن افقی در یک محفظه حاوی نانوسیال به روش انتقال حرارت جابه جایی طبیعی به این نتیجه رسیدند که طول گرم کن در محفظه بهشدت روی عدد نوسلت متوسط تأثیرگذار است و با آن رابطه غیرمستقیم دارد. آنها همچنین دریافتند که عدد نوسلت با افرایش کسر حجمی نانو ذرات، زیاد می شود. همت اسفه و همکاران [۳]، پس از مطالعه گسترده پیرامون جریان جابهجایی ترکیبی در محفظه مربعی پرشده از نانوسیال با دو دیوار متحرک، دریافتند که برای یک عدد ریچاردسون مشخص، با افزایش عدد رینولدز تراکم خطوط جریان افزایش یافته و گرادیان دما روی سطح دیوار نیز افزایش می ابد. این پدیده منجر به افزایش انتقال حرارت و عدد نوسلت متوسط می شود. کلته و همکاران [۴]، انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی در یک محفظه پر شده از نانوسیال را به همراه منبع گرم مطالعه کردند. آنها نشان دادند که افزایش عـدد ریچاردسون کمـک اندکی در افزایش عدد نوسلت می کند. همچنین رابطه مستقیم عدد نوسلت و عدد رینولدز اثبات شد. مهمتر اینکه افزایش قطر نانو ذرات، برای همه اعداد ریچاردسون سبب کاهش عدد نوسلت متوسط مي شود. قاسمي و امين الساداتي [۵]، با مطالعه عددی انتقال حرارت جابهجایی ترکیبی در یک محفظه باز واقع در کانال افقی به همراه منبع گرم در دیوار محفظه، دریافتند که در اعداد ریچاردسون پائین خطوط جریان به داخل محفظه

کشیده نمی شوند و برعکس در اعداد ریچاردسون بالا که جریان طبيعي مطرح است، خطوط جريان به داخل محفظه كشيده شده و حاوی گردابههایی هستند. مهم تر اینکه با افزایش عدد ریچاردسون عدد نوسلت متوسط بهصورت نوسانی کاهش میابد. روی و همکاران [۶]، جابجایی ترکیبی درون یک محفظهی مربعی با حرکت دیوارها به صورت افقی و عمودی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که افزایش عدد گراشف و به عبارتی افزایش عـدد ریچاردسون در رینولـدزهای یـایین باعث افزایش عدد نوسلت متوسط می شود، اما با افزایش رینولدز از شدت این افزایش کاسته می شود. همچنین دیده شد که حرکت هر دو صفحه سبب ثابت ماندن نوسلت متوسط با افزایش عدد گراشف در رینولدزهای بالا می گردد. حسن حسیب و همکاران [۷]، راجع به انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون یک محفظه ذوزنقهای شکل حاوی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم تحقیق کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که در محدوده عدد رينولدز از ۰/۱ تا ۱۰۰، عدد نوسلت متوسط هيچ تغییری نمی کند و به نوعی مستقل از عدد رینولدز است. همچنین در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۱٬۰۰۰ از عدد گراشف، میزان انتقال حرارت ثابت است. برهان الدين و همكاران [٨]، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه ذوزنقهای که شار حرارتی متغیر به دیوار آن اعمال می شد را بررسی کردند. آن ها نشان دادند که افزایش عدد نوسلت متوسط منوط به افزایش عدد ریچاردسون است. عدد لوئیس نیز روی این تغییرات بی تأثیر نیست و غالباً کاهش نوسلت را به همراه دارد. آنها همچنین دریافتند که عدد نوسلت متوسط در محدوده ریچاردسون ۰/۱ تا ۱ تقریباً مستقل از این عدد است. حاجی على قلى و همكاران [٩]، انتقال حرارت را در يك ميكرو كانال حاوی نانوسیال (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water) تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن ها حاکی از آن است که افزایش میزان انتقال حرارت با زیاد شدن کسر حجمی نانوذرات در اعداد رینولدز بالا مشهودتر است. همچنین، در این تحقيق افزايش عدد نوسلت متوسط به ازاى افزايش عدد هارتمن در اعداد رینولدز متفاوت، مشاهده شد. میلانی شـیروان و مأموریان[۱۰]، به بررسی عملکرد جابجایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظهی مربعی با هندسه متغیر و شرط مرزی شار حرارتی ثابت پرداختند. آنها شواهد خود را این گونه بیان

کردند: با کاهش عدد ریچاردسون و همراه شدن دو جابجایی اجباری و طبیعی، خطوط همدما شروع به چرخش مینمایند. هرچه عدد ریچاردسون بیشتر کاهش میابد، میدانهای جریان و دما بیشتر تحت تأثیر جابجایی اجباری قرار می گیرند، درنتیجه عدد نوسلت رو به افزایش می رود. پروین و همکاران [۱۱]، جابه جایی طبیعی در یک محفظه بسته پر شده از نانوسیال را مطالعه کردند. در این تحقیق دیوارهای افقی محفظه عایق شده بودند و دیـوارهـای عمـودی در یـک دمـای پایین قرار داشتند. همچنین یک جسم جامد داغ در مرکز محفظه قرار داده شده بود. نتیجه بررسی آنها از این قرار شد که با افزایش عدد پرانتل، قدرت بزرگترین و کوچکترین گردابههای موجود بین دیوار افقی و جسم داغ خیلی باهم تفاوت ندارند و خطوط همدما بیشتر به حالت افقی کشیده می شوند. آن ها همچنین به این مهم دست یافتند که با افزایش عدد پرانتل، عدد نوسلت متوسط و در نتیجه نرخ انتقال حرارت زیاد می شود. با توجه به بررسی های انجام گرفته در رابطه با پژوهشهای قبلی، دیده می شود که انتقال حرارت جابجایی توام نانوسیال درون یک محفظه که حاوی یک منبع گرمازا باشد تا کنون مورد توجه قرار نگرفته است و لازم به ذکر است که در این تحقیق منبع گرمازا هادی حرارت است و به صورت حجمی حرارت تولید می کند. بنابراین، معادله انرژی (هدایت حرارت) در داخل منبع گرمازا حل می شود. قطعات الکترونیکی نصب شده در داخل محفظهها که عملکرد آنها همراه با تولید حرارت است و همچنین منابع گرمازایی که در داخل ساختمانها قرار دارند و توسط جابجایی توام خنک می شوند، نمونههایی از کاربرد این مدل هستند.

## ۲– بیان مسئله

در پژوهش حاضر انتقال حرارت ترکیبی در محفظهای باز و دو بعدی مطابق شکل ۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. یک منبع گرمازا که به صورت حجمی حرارت یکنواختی را تولید می کند در مرکز محفظه قرار گرفته است. تمام دیوارهای محفظه از نظر حرارتی به خوبی عایق شدهاند. نانوسیال آب– اکسید آلومینیوم درون محفظه جریان دارد. به طوری که نانوسیال با سرعت و دمای یکنواخت از سمت چپ وارد محفظه می شود و از سمت راست در حالت توسعهیافته محفظه را ترک می کند.

هدف از این بررسی پیش بینی اثر پارامترهایی مانند اعداد ریچاردسون و رینولدز بر میدان جریان و نرخ انتقال حرارت است. لذا در این تحقیق با استفاده از حل عددی به روش حجم کنترل، ابتدا میدانهای جریان و دما درون محفظه به دست آمده و به کمک آن عدد نوسلت متوسط، پروفیل های سرعت عمودی و همچنین پروفیل دمای بی بعد در مقاطع خاصی از محفظه محاسبه شده است. لازم به ذکر است که رژیم جریان آرام فرض شده است.



## ۳- معادلات اساسی حاکم بر جریان

معادلات حاکم برای جریان آرام، دوبعدی، با فرض سیال نیوتنی غیرقابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسق به صورت روابط (۱) تا (۵) میباشند.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

معادلات مومنتم X و Y :

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{\rm nf}} \left[ -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{\rm nf} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right] \tag{(Y)}$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{\rm nf}}$$

$$\begin{bmatrix} \partial p \\ \partial v \\ \partial v \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \partial^2 v \\ \partial^2 v \\ \partial^2 v \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \partial^2 v \\ \partial^2 v \\ \partial^2 v \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \partial^2 v \\ \partial^2 v \\ \partial^2 v \\ \partial^2 v \end{bmatrix}$$

$$\left[-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{\rm nf} \left(\frac{\partial v}{\partial x^2} + \frac{\partial v}{\partial y^2}\right) + \left(\rho\beta\right)_{\rm nf} g\left(T - T_i\right)\right]$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{\rm nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) \tag{(f)}$$

معادله انرژی درون منبع حرارتی

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{s}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{s}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + q''' = 0 \tag{(a)}$$

برای بیبعد نمودن معادلات حاکم، از پارامترهای تعریـف شـده در رابطه (۶) استفاده میشود.

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{u_i}, V = \frac{v}{u_i}, P = \frac{p}{\rho_{nf} u_i^2}, \theta = \frac{T - T_i}{\Delta T},$$
$$\Delta T = \frac{q'''L^2}{k_s}, \ \bar{k} = \frac{k_s}{k_f} \quad , A = \frac{a}{L}, AR = \frac{l}{L}$$
(7)

اعداد بدون بعد گراشهف، رینولدز، پرانتل و ریچاردسون مطابق رابطه (۲) تعریف می شوند.

$$Gr = \frac{g\beta_f \Delta T L^3}{v_f^2}, Re = \frac{\rho_f u_i L}{\mu_f}, Pr = \frac{v_f}{\alpha_f}, Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$
(Y)

با استفاده از متغیرهای بی بعد موجود در رابطه (۶)، معادلات بدون بعد حاکم بر مسئله عبارتند از:

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

$$U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}v_f}\frac{1}{Re}\nabla^2 U, \qquad (9)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} v_f} \frac{1}{Re} \nabla^2 V \qquad (1 \cdot)$$
$$+ \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} \frac{Gr}{Re^2} \theta ,$$

$$U\frac{\partial\theta}{\partial X} + V\frac{\partial\theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{Re.Pr} \nabla^2 \theta , \qquad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left( \bar{k} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \bar{k} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) + \bar{k} = 0.$$
 (17)

با توجه به هندسه مسئله، عرض دهانه ورودی و خروجی مسئله برابر ۰/۱۵ طول محفظه است.

خواص نانوسیال شامل لزجت [۱۲]، ضریب هدایت حرارتی [۱۳]، چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حجمی و ضریب پخش با استفاده از روابط (۱۳) تا (۲۰) محاسبه میشوند.

$$\mu_{\rm nf} = \mu_{\rm f} \left( 1 - \phi \right)^{-2.5} \tag{17}$$

$$k_{\rm nf} = \left[\frac{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} - 2\phi(k_{\rm f} - k_{\rm p})}{k_{\rm p} + 2k_{\rm f} + \phi(k_{\rm f} - k_{\rm p})}\right]k_{f}$$
  
+5×10<sup>4</sup>  $\beta\phi(\rho C_{\rm p})_{\rm f} \sqrt{\frac{\kappa_{\rm b}T}{\rho_{\rm f}d_{\rm p}}}f(T,\phi)$  (14)

www.SID.ir

در رابطه (۱۴)، تابع  $f(T, \phi)$  و پارامتر  $\beta$  به ترتیب از روابط (۱۵) و (۱۶) حساب می شوند.

$$f(T,\phi) = (2.82 \times 10^{-2} \phi + 3.92 \times 10^{-3}) \frac{T}{T_0}$$
(10)

+
$$(-3.06 \times 10^{-2} \phi - 3.91 \times 10^{-3})$$
  
 $\beta - 8.44 (100 \phi)^{-1.073}$ 
(19)

در رابطه (۱۴)، 
$$\kappa_{
m b}$$
 ثابت بولتزمن است کـه مقـدار آن برابـر $1.3807 imes 1.3807 imes 1/_K$ 

$$\rho_{\rm nf} = (1 - \phi) \rho_{\rm f} + \phi \rho_{\rm p} \tag{1Y}$$

$$\left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm nf} = \left(1 - \phi\right) \left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm f} + \phi \left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm p} \tag{1A}$$

$$\left(\rho\beta\right)_{\rm nf} = \left(1 - \phi\right) \left(\rho\beta\right)_{\rm f} + \phi\left(\rho\beta\right)_{\rm p} \tag{19}$$

$$\alpha_{\rm nf} = k_{\rm nf} / \left(\rho C_{\rm p}\right)_{\rm nf} \tag{(7.)}$$

در روابط (۱۳) تا (۲۰) زیر نویس f،nf و p به ترتیب اشاره به خواص نانوسیال، آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم دارد. خواص آب و نانوذرات اکسید آلومینیوم در جدول f آورده شده است.

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است. با استفاده از پارامترهای بیبعد، نوسلت موضعی روی سطوح افقی و عمودی منبع حرارتی به ترتیب با استفاده از روابط (۲۱) و (۲۲) حساب میشود.

$$Nu = -\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right) \frac{1}{\theta_s} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \tag{(1)}$$

$$Nu = -\left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right) \frac{1}{\theta_s} \frac{\partial \theta}{\partial X} \tag{(YY)}$$

می توان با انتگرال گیری از روابط (۲۱) و (۲۲) روی سطوح منبع حرارتی، نوسلت متوسط روی هر سطح منبع حرارتی را به دست آورد. رابطه (۲۳) عدد نوسلت متوسط روی سطح پایینی منبع حرارتی را بیان می کند.

$$Nu_{m,B} = \frac{1}{AR} \int_{0}^{AR} -\left(\frac{k_{nf}}{k_{f}}\right) \frac{1}{\theta_{s}} \frac{\partial \theta}{\partial Y} dX$$
(YY)

نوسلت متوسط کلی از میانگین گیری نوسلتهای متوسط روی چهار سطح منبع حرارتی بهدست میآید.

www.SID.ir

آب خالص	ذراتآلومينيوم اكسيد	خاصيت فيزيكى
<b>१९४/                                    </b>	۳۹۷۰	$ ho m{(kgm^{-3})}$
4179	٢۶۵	$C_p\left(\mathrm{Jkg}^{-1} ight)$
•/۶١٣	۴.	$K\left(\mathrm{Wm}^{-1}\mathrm{K}^{-1} ight)$
71	• /٨۵	$eta  imes 10^{+5} \left( \mathrm{K}^{-1}  ight)$
٧/١	-	Pr
•/••١••٣	_	$\mu \left( \mathrm{kgm^{-1}s^{-1}}  ight)$

## ۴- شرایط مرزی

برای بهدست آوردن جواب یگانه یک معادله دیفرانسیل پارهای به مجموعهای از شرایط مکمل نیاز است تا توابع اختیاری حاصل از انتگرالگیری معادله دیفرانسیل پارهای را معین کرد.

شرایط مرزی روی دیوارهای محفظه مطابق رابطه (۲۴) می باشند.

$X=0 \ , \ 0 \leq Y \leq A$	$U=\theta=1, V=0$
$X = 0$ , $A < Y \le 1$	$U = V = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$
$Y = 0, 1$ , $0 \le X \le 1$	$U = V = \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$
$X=1 \ , \ 0 \le Y < 1-A$	$U = V = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0$
$X = 1$ , $1 - A \le Y \le 1$	$\frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = V = 0 \qquad (1\%)$
نبع حرارتی مطابق رابطه (۲۵)	شرایط مرزی روی سطوح م
	مىباشند.
U = V = 0	
$\theta_{nf} = \theta_s$	
$k_{nf} \left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)_{nf} = k_s \left(\frac{\partial \theta}{\partial n}\right)_s$	(۲۵)

معادلات بدون بعد (۸) تا (۱۲) به همراه شرایط مرزی ارائه شده در روابط (۲۴) و (۲۵) به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شدند. معادلات مومنتم روی شبکه جابجا شده حل می شوند. در روش شبکه جابجا شده علاوه بر راحتی محاسبه دبیها روی وجوه حجم کنترل به علت معلوم بودن

سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می شود. برای حل هم زمان معادلات جبری شده از الگوریتم سیمپل که جزئیات کامل آن در مرجع [۱۵] آمده است، استفاده شده است. معیار همگرایی، باقیمانده سرعت ها در نظر گرفته شده است که در هر مرحله کوچکتر از <sup>6</sup>-10 می باشد.

## ۶- بررسی صحت کد نوشته شده

برای اجرای الگوریتم مورد نظر برنامهای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شد. برای اطمینان از درستی روش عددی و برنامه نوشته شده، نتایج عددی حاصل از آن با کارهای مشابه انجام گرفته توسط دیگران مقایسه شد.

ابتدا مطابق مرجع [۱۶] یک محفظهی مربعی پر شده از هوا در نظر گرفته شد. دیوارهای افقی محفظه از نظر حرارتی عایق در نظر گرفته شدند در حالی که دیوارهای چپ و راست محفظه، دما ثابت و به ترتیب گرم و سرد بودند. بر اثر اختلاف دمای دیوارهای عمودی در درون محفظه جابجایی طبیعی برقرار میشود. جدول ۲ نتایج حاصل از اجرای برنامه کامپیوتری حاضر را با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۶] مقایسه میکند.

**جدول (۲):** مقایسه عدد نوسلت متوسط دیوار گرم با نتایج ارائه شده در مرجع [ ۱۶].

Nu <sub>m</sub> مرجع [۱۶]	Nu <sub>m</sub> کار حاضر	عدد رايلي		
١/١١٨	۱/۱۱۵	$Ra = v \cdot r$		
۲/۲۴۳	2/220	$Ra = \iota \cdot \iota$		
4/219	4/522	$Ra = \iota \cdot \iota$		
٨/٧١٩	٨/٨١٣	$Ra = v \cdot r$		

همچنین، برای بررسی عملکرد برنامه کامپیوتری در مسائل انتقال حرارت جابجایی ترکیبی آزاد و اجباری در محفظهها، مقایسهای در مورد جریان نانوسیال در یک محفظه باز مطابق با مرجع [۱۷] انجام گرفت. در این بررسی یک محفظه مربعی که دارای یک مجرای ورودی در گوشه پایین و سمت چپ و یک مجرای خروجی در گوشه بالایی و سمت راست است، در نظر گرفته شد. هوا با دمای یکنواخت  $T_i$  به داخل محفظه جریان می یابد و با فرض توسعه یافته از آن خارج می شود. یک جسم جامد بدون تولید انرژی در مرکز محفظه قرار دارد. دیوارهای افقی و دیوار سمت چپ محفظه عایق شدهاند و دیوار سمت

راست آن در دمایی بالا تر از دمای هوای ورودی قرار گرفته است. شکل ۲ مقایسه نتایج مرجع [۱۷] و نتایج گرفتهشده از برنامه کامپیوتری حاضر را نشان میدهد. در این نمودار مقدار عدد نوسلت متوسط بهازای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون روی دیوار گرم سمت راست آورده شده است. همانگونه که مشاهده میشود برای هر دو حالت جابجایی طبیعی و جابجایی ترکیبی برنامه کامپیوتری نتایج قابل قبولی را ارائه می کند.

برای انتخاب شبکه مناسب به گونهای که حل عددی مستقل از تعداد نقاط شبکه باشد، مسئله حاضر برای چند شبکه با تعداد نقاط متفاوت حل شد.

در شکل **۳** تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب تعداد نقاط شبکه برای AR = 0.6، Ri = 1.0، Re = 100، AR = 0.6 و نقاط شبکه برای داده شده است. با توجه به شکل **۳** و بررسیهایی که بر روی تاثیرپذیری پارامترهای دیگر از تعداد نقاط شبکه صورت گرفت، شبکه یکنواخت با تعداد نقاط ۱۲۰×۱۲۰ برای حل مسئله انتخاب شد.



شکل (۳): تأثیر تعداد نقاط شبکه روی مقادیر نوسلت متوسط

## ۷- نتايج

پس از انتخاب شبکه مناسب و اطمینان از درستی کد نوشته شده، اثر تغییر پارامترهایی چون عدد رینولدز، عدد ریچاردسون، نسبت ابعادی، ضریب هدایت حرارتی و درصد حجمی نانوذرات بر روی میدانهای جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است. تمام نتایج برای حالتی است که منبع حرارتی و محفظه به صورت هم مرکز باشند.

#### ۷-۱- اثر عدد رینولدز

در این بخش ۸۵ – k = 10، k = 10 و  $\phi = 0.7$  و  $\phi = 0.7$  در نظر گرفته شدهاند و اثر تغییر عدد رینولدز در بازهی بر روی میدانهای جریان و دما و نرخ انتقال  $Re \leq r \cdot r$ حرارت بررسی شده است. خطوط جریان و خطوط همدما در این حالتها برای اعداد رینولدز مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به خطوط جریان، دیده می شود که در اعداد رینولدز پایین، خطوط جریان به صورت منظم در داخل محفظه گسترش پیدا کردهاند. با توجه به این که برای ثابت ماندن عدد ریچارسون، متناسب با Re<sup>2</sup> عدد گراشهف نیز باید افزایش یابد بنابراین در این بخش، با افزایش عدد رینولدز قدرت جابجایی اجباری و طبیعی هر دو افزایش مییابند و جریان ورودی که بر اثر افزایش رینولدز دارای اینرسی زیادی است تمایل دارد که از مسیری هموارتر به مقطع خروجی برسد. از این رو درصد بیشتری از جریان ورودی از زیر منبع گرم عبور می کند. با افزایش عدد رینولدز، نیروی شناوری نیز افزایش می یابد و به دلیل افزایش نیروی شناوری یک گردابه پاد ساعت گرد در فضای بین منبع حرارتی و دیوار سمت چپ محفظه تشکیل می شود. با توجه به خطوط هم دما، دیده می شود که با افزایش عدد رینولدز، قدرت خنککنندگی جریان نانوسیال بیشتر می شود و دمای بیشینهی منبع حرارتی کاهش می یابد. همچنین تراکم خطوط همدما در اطراف منبع حرارتی بیشتر مىشود.

در شکل **۵** پروفیل مؤلفه افقی سرعت بیبعد سیال روی محور مرکزی عمودی  $X = \cdot/۵$  بهازای اعداد رینولدز متفاوت رسم شده است. با افزایش عدد رینولدز، نیروی اینرسی سیال ورودی افزایش مییابد. از این رو جریان برای حرکت به سمت مقطع خروجی راحتترین مسیر را انتخاب میکند و درصد زیادی از آن با سرعت بالاتری از زیر منبع حرارتی عبور میکند.

با افزایش عدد رینولدز، به دلیل افزایش نیروی شناوری و ایجاد گردابه در سمت چپ منبع حرارتی، سیال کمتری از این قسمت عبور میکند و سرعت سیال در ناحیه بالای منبع حرارتی کاهش پیدا میکند.



**شکل (۴)**: خطوط جریان (چپ) و خطوط هم دما (راست) به ازای اعداد رینولدز مختلف

در شکل P پروفیل مؤلفه عمودی سرعت بیبعد سیال روی محور افقی در P = -1 بهازای اعداد رینولدز متفاوت نشان داده شده است. در Re = 0 جریان تقریبا به نسبت یکسان از هر دو طرف منبع حرارتی عبور میکند. با افزایش عدد رینولدز، به دلیل افزایش نیروی اینرسی، درصد بیشتری از دبی جریان ورودی از قسمت زیر و سمت راست منبع حرارتی عبور میکند.

بنابراین، سرعت جریان در سمت چپ منبع حرارتی کاهش و در سمت راست منبع حرارتی افزایش مییابد. همچنین در رینولدزهای بالا، به دلیل تشکیل گردابه، گرادیان سرعت در ناحیه سمت چپ منبع حرارتی در همسایگی دیوار محفظه کم میشود.

در شکل  $\mathbf{Y}$  پروفیل دمای بیبعد روی محور افقی مرکزی در  $Y = \cdot/\delta$  نشان داده شده است. با افزایش عدد رینولدز و به تبع آن افزایش عدد گراشهف، قدرت خنککنندگی جریان افزایش مییابد و بنابراین، دمای منبع حرارتی کاهش مییابد. با توجه به اینکه ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی نسبتاً خیلی بزرگتر از ضریب هدایت حرارتی نانوسیال است، توزیع دما در عرض منبع حرارتی تقریبا یکنواخت است.



**شکل (۵**): تغییرات مؤلفه افقی سرعت بیبعد روی محور عمودی مرکزی بهازای اعداد رینولدز متفاوت.



**شکل (۶**): تغییرات مؤلفه عمودی سرعت بیبعد روی محور افقی مرکزی بهازای اعداد رینولدز متفاوت.



**شکل (۷**): پروفیل دمای بیبعد روی محور افقی مرکزی بهازای اعداد رینولدز مختلف.

در شکل ۸ مقدار نرخ انتقال حرارت بر واحد سطح در قالب عدد نوسلت متوسط روی سطوح منبع حرارتی، بهازای تغییر عدد رینولدز در نسبتهای ابعادی متفاوت، آورده شده است. با افزایش عدد رینولدز و همچنین افزایش نسبت ابعادی، سرعت جریان سیال در اطراف منبع حرارتی بیشتر می شود و قدرت حنک کنندگی جریان نانوسیال افزایش مییابد. بنابراین، افزایش عدد رینولدز میزان انتقال حرارت را زیاد می کند.

در AR = ...AR، با توجه به این که اندازه منبع حرارتی کوچک است در اعداد رینولدز پائین نانوسیال از اطراف آن عبور می کند و با افزایش عدد رینولدز ابتدا به دلیل افزایش سرعت جریان در مجاورت هر چهار سطح منبع حرارتی، عدد نوسلت متوسط افزایش می یابد. در این حالت وقتی عدد رینولدز از یک مقداری (تقریباً ۱۵۰=R) بیشتر شود، به دلیل افزایش اینرسی، مقداری (تقریباً ۱۵۰=R) بیشتر شود، به دلیل افزایش اینرسی، مقداری (تقریباً ۱۵۰=R) بیشتر شود، به دلیل افزایش اینرسی، مقداری (تقریباً ۱۵۰=R) بیشتر شود، به دلیل افزایش اینرسی، مقداری (تقریباً ۱۵۰=R) بیشتر شود، به دلیل افزایش اینرسی، مقداری (تقریباً ۱۵۰=R) میشتر شود، مادلیل افزایش اینرسی، مقداری در انتقال حرارت کمتر می شود و از اینجا به بعد با افزایش عدد رینولدز، عدد نوسلت متوسط کاهش می یابد. برای R - (16, -16) به دلیل بزرگتر مدوسات از زیر منبع حرارتی در اعداد رینولدز پائین نیز غالب مدن اندازه منبع حرارتی عبور می کند، بنابراین، با افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش سرعت جریان، عدد نوسلت متوسط کاملا یک روند افزایشی دارد.



۲-۷- اثر عدد ریچاردسون

در این بخش با ثابت گرفتن عدد رینولدز، نسبت ابعادی، نسبت ضریب هدایت حرارتی و درصد حجمی نانوذرات ( $\phi = 0.0$  و Ri = -16) اثر عدد ( $\phi = 10$ ، Ri = 10) اثر عدد ریچاردسون بر روی میدانهای جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی می شود.

در شکل ۹، خطوط جریان و خطوط همدما برای مقادیر مختلف عدد ریچاردسون نشان داده شده است. بهازای یک مقدار ثابت برای عدد رینولدز، افزایش عدد ریچاردسون ناشی از افزایش قدرت جابجایی طبیعی و نیروی شناوری است. با توجه به اینکه در این حالت به دلیل بالا بودن عدد رینولدز درصد کمتری از دبی جریان ورودی به محفظه از سمت چپ منبع حرارتی عبور میکند، با افزایش عدد ریچاردسون، شرایط تشکیل گردابه پاد ساعت گرد در سمت چپ منبع حرارتی مهیا می شود. تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی نیز سبب می شود که دبی خالص کمتری از سمت چپ منبع حرارتی عبور کند. با توجه به شکل ۹ دیده می شود که با افزایش عدد ریچاردسون، ماکزیمم تابع جریان اندکی افزایش مییابد. با توجه به این که در این حالت افزایش عدد ریجاردسون تنها به دلیل افزایش عدد گراشهف است و افزایش عدد گراشهف نیز به دلیل افزایش نرخ تولید حرارت در منبع گرمازا رخ میدهد، بنابراین، با افزایش عدد ریچاردسون از یک طرف دمای منبع حرارتی افزایش می یابد و از طرف دیگر به دلیل افزایش قدرت جابجایی طبیعی، نرخ انتقال حرارت به نانوسیال اطراف منبع حرارتی نیز افزایش مییابد. وقوع این دو پدیده سبب میشود

که ابتدا با افزایش عدد ریچاردسون ماکزیمم دمای منبع حرارتی افزایش یابد و سپس شروع به کاهش نماید.

در شکل ۱۰ پروفیل مؤلفه افقی سرعت بیبعد سیال روی محور مرکزی در X = 0/2 بهازای اعداد ریچاردسون مختلف رسم شده است. با توجه به توضیحات ارائهشده برای خطوط جریان (شکل ۹)، با افزایش عدد ریچاردسون سرعت جریان در زیر منبع حرارتی افزایش و در بالای منبع حرارتی کاهش یافته است.



شکل (۹): خطوط همدما (راست) و خطوط جریان (چپ) بهازای اعداد ریچاردسون مختلف

Y = 0.0 در شکل **۱۱**، پرفیل مولفه عمودی سرعت در Y = 0.0 نشان داده شده است. با توجه به شکل **۱۱** اختلاف سرعت در سمت چپ و راست منبع حرارتی دیده می شود. با توجه به تقویت نیروی شناوری و تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی در اعداد ریچاردسون بالا، کاهش مولفه عمودی سرعت

www.SID.ir

در نزدیکی دیوار سمت راست محفظه مشاهده می شود. با مقایسه شکلهای ۱۰ و ۱۱، دیده می شود که با افزایش عدد ریچاردسون، پروفیل مولفه افقی سرعت در بالای منبع حرارتی نسبت به پروفیل مولفه عمودی سرعت در سمت چپ منبع حرارتی، بیشتر تحت تاثیر قرار می گیرد. این موضوع به آن دلیل است که با افزایش عدد ریچاردسون و تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی، این گردابه سبب می شود که جریان کمتری از بالای منبع حرارتی عبور کند و بنابراین، پروفیل سرعت در بالای منبع حرارتی به طور قابل ملاحظهای تحت تاثیر افزایش عدد ریچاردسون قرار می گیرد.





محور افقی مرکزی بهازای اعداد ریچاردسون مختلف.

در شکل **۱۲** تغییرات دمای بی بعد روی محور مرکزی افقی ( $\Lambda = -1$ ) نشان داده شده است. با توجه به این که در این بخش عدد ریخاردسون به دلیل افزایش عدد گراشهف است. از آن جایی که خواص

نانوسیال ثابت فرض شدهاند، افزایش عدد گراشهف ناشی از افزایش نرخ تولید حرارت در منبع حرارتی است. بنابراین با افزایش عدد ریچاردسون، اولا به دلیل افزایش نیروی شناوری قدرت جابجایی افزایش مییابد ولی در عین حال به دلیل افزایش نرخ تولید انرژی بر واحد حجم منبع حرارتی، دمای منبع حرارتی نیز اندکی افزایش مییابد. البته با افزایش عدد ریچاردسون شرایط برای تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی نیز مهیاتر میشود که این خود نیز باعث کاهش انتقال حرارت از سطوح بالای و سمت چپ منبع حرارتی می شود.





در شکل ۱۳ تغییرات عدد نوسلت متوسط به ازای تغییرات عدد ریچاردسون در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شدهاست. در یک مقدار ثابت برای عدد ریچاردسون، افزایش عدد رینولدز همراه با افزایش عدد گراشهف میباشد. به عبارت دیگر چنانچه عدد ریچاردسون ثابت نگهداشته شود و عدد رینولدز افزایش داده شود، بهطور همزمان جابجایی اجباری و طبیعی تقویت می شوند. بنابراین، با افزایش عدد رینولدز در یک عدد ریچاردسون ثابت، عدد نوسلت متوسط به طور قابل ملاحظهای افزایش می یابد. از طرف دیگر، افزایش عدد ریچاردسون در یک عدد رینولدز ثابت، تنها ناشی از افزایش عدد گراشهف است. با توجه به ثابت بودن خواص ترموفيزيكي نانوسيال، افزايش عدد گراشهف به دلیل افزایش نرخ تولید انرژی در منبع حرارتی است. بنابراین، با افزایش عدد گراشهف از یک طرف دمای منبع حرارتی افزایش می یابد که این باعث کاهش عدد نوسلت متوسط می شود، از طرف دیگر نیروی شناوری افزایش می یابد که این باعث افزایش نرخ انتقال حرارت و عدد نوسلت متوسط می شود. بنابراین، با افزایش عدد ریچاردسون به دلیل وقوع دو

پدیده که یکی عدد نوسلت متوسط را افزایش و دیگری آن را کاهش میدهد، عدد نوسلت متوسط با شیب ملایمی افزایش مییابد.



اعداد رینولدز مختلف.

Y - Y - 1 **اثر نسبت ضریب هدایت حرارتی** در این بخش اثر تغییر نسبت ضریب هدایت حرارتی در بازهی
 در این بخش اثر تغییر نسبت ضریب هدایت حرارتی در بازهی
 ( $1 \le \overline{k} \le 1 \cdot 0$ )
 بر روی خطوط جریان و همدما ، توزیع دما و
 عدد نوسلت متوسط، بررسی شده است. برای این منظور
 پارامترهای دیگر ثابت فرض شدهاند به طوری که مقدار آنها
 برابر با Y = -1، Ri = -1، Ri = -1

خطوط جریان و خطوط همدما برای مقادیر مختلف نسبت ضریب هدایت حرارتی در شکل **۱۴** نشان داده شدهاست. با توجه به این که در این بخش عدد رینولدز نسبتا بزرگ است و درصد زیادی از دبی ورودی به محفظه، از قسمت زیر منبع حرارتی عبور می کند، شرایط برای تشکیل گردابه در سمت چپ منبع حرارتی مهیا است. با دقت در معادله انرژی مربوط به منبع حرارتی و روابطی که عدد گراشهف و پارامترهای بیبعد را تعریف می کنند، پیداست که چنانچه اعداد رینولدز و ریچاردسون ثابت باشند و ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی افزایش یابد، این افزایش همراه با افزایش نرخ تولید انرژی در واحد حجم منبع حرارتی است. بانبراین با افزایش نسبت ضریب مدایت حرارتی، اولاً نرخ تولید انرژی و به تبع آن دمای منبع حرارتی افزایش می یابد و دوماً انتقال حرارت از منبع حرارتی به مرارتی افزایش می یابد و دوماً انتقال حرارت از منبع حرارتی به مرارتی افزایش می یابد و دوماً انتقال حرارت از منبع حرارتی به نانوسیال اطراف آن بهتر صورت می گیرد و جابجایی طبیعی

شدن نسبت ضریب هدایت حرارتی نتیجه افزایش دمای منبع حرارتی و انتقال حرارت بهتر به نانوسیال است. همچنین با توجه به شکل **۱۴** دیده می شود که برای مقادیر کوچک  $\overline{k}$ ، در داخل منبع حرارتی گرادیان دما وجود دارد و با افزایش مقدار  $\overline{k}$  گرادین دما در حارتی ناچیز می شود.



**شکل (۱۴)**: خطوط جریان (چپ) و خطوط هم دما (راست) بهازای ضریب هدایت حرارتی مختلف.

در شکل **۱۵** پروفیل دمای بیبعد روی محور افقی مرکزی ((5.0 = Y) بهازای مقادیر محتلف نسبت ضریب هدایت حرارتی نشان داده شده است. همان طور که قبلا اشاره شد چنانچه اعداد رینولدز و ریچاردسون ثابت باشند، افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی با افزایش نرخ تولید انرژی در واحد حجم

www.SID.ir

منبع حرارتی امکان پذیر است. بنابراین، با افزایش نسبت ضریب هدایت حرارتی، از یک طرف دمای منبع حرارتی افزایش می ابد و از طرف دیگر پخش حرارت در منبع حرارتی بهتر صورت می گیرد و حرارت بیشتری به نانوسیال منتقل می شود. همان طور که در شکل **۱۵** دیده می شود، برای مقادیر کوچک  $\overline{k}$ ، در داخل منبع حرارتی گرادیان دما وجود دارد و با افزایش  $\overline{k}$  گرادیان دما در داخل منبع حرارتی از بین می رود و دما در سرتاسر منبع حرارتی یکنواخت می شود.



**شکل (۱۵)**: تغییرات دمای بیبعد روی محور افقی مرکزی به ازای ضرایب هدایت حرارتی مختلف.

در شکل **۱۶** مقدار عدد نوسلت متوسط بر روی اضلاع منبع حرارتی به ازای تغییرات نسبت ابعادی برای مقادیر مختلف نسبت ضریب هدایت حرارتی نشان داده شده است. با افزایش ضریب هدایت حرارتی، به دلیل افزایش نرخ تولید انرژی و انتقال حرارت بهتر از منبع حرارتی به نانوسیال اطراف آن، عدد نوسلت متوسط به طور قابل ملاحظهای افزایش می یابد.

شکل **۱۶** نشان می دهد که عدد نوسلت متوسط خیلی تحت تاثیر تغبیرات نسبت ابعادی قرار نمی گیرد به طوری که با تغییر نسبت ابعادی از ۲/۰ به ۲/۴ عدد نوسلت متوسط با شیب ملایمی کاهش می یابد و سپس با همان شیب کم افزایش می یابد. افزایش نسبت ابعادی سبب افزایش تولید انرژی به دلیل افزایش حجم می شود. بنابراین با افزایش نسبت ابعادی دمای منبع حرارتی افزایش می یابد و طبق تعریف، عدد نوسلت متوسط کاهش می یابد. از طرف دیگر، افزایش نسبت ابعادی باعث می شود که جریان با سرعت بیشتری از اطراف منبع حرارتی عبور کند. افزایش سرعت جریان سبب افزایش گرادیان

متوسط می شود. بنابراین، تغییرات عدد نوسلت متوسط با نسبت ابعادی با این توضیحات قابل توجیه است

#### ۷-۴- اثر درصد حجمی نانو ذرات

در این بخش k = 1،  $Ri = 1/\delta$ ، AR = -1/% و k = 1 در نظر گرفته شده است واثر تغییر کسر حجمی در بازهی بر روی عملکرد حرارتی محفظه بررسی می شود.  $\phi \leq 0/0$ شکل ۱۷ تغییرات عدد نوسلت متوسط را برحسب عدد رینولدز در کسر حجمیهای متقاوت نانوذرات نشان میدهد. با افزایش عدد رینولدز، دمای منبع حرارتی کاهش می یابد و نرخ انتقال حرارت زیاد می شود. همچنین با افزایش درصد حجمی نانوذرات بەدلىل افزايش ضريب ھدايت حرارتى نانوسيال، دماى منبع حرارتی کاهش می یابد و بنابراین، عدد نوسلت افزایش می یابد. با توجه به شکل ۱۷ دیده می شود که افزایش عدد نوسلت ناشی از افزایش درصد حجمی نانوذرات در اعداد رینولدز بالاتر چشمگیرتر است. این ناشی از آن است که در اعداد رینولدز بالاتر، گرادیان دما در اطراف منبع حرارتی افزایش می یابد و با توجه به تعریف عدد نوسلت که به حاصل ضرب گرادیان دما در ضريب هدايت حرارتي وابسته است، بنابراين، افزايش عدد نوسلت ناشی از افزایش کسر حجمی نانوذرات در اعداد رینولدز بالاتر، بيشتر است.



## ۸- نتیجهگیری

در این مقاله جریان جابجایی ترکیبی نانوسیال در یک محفظه مربعی به همراه منبع حرارتی در مرکز محفظه، به روش عددی بررسی شد. نتایج حاصل از مطالعات انجام شده به صورت ذیل قابل جمع بندی است:

- در عدد ریچاردسون ثابت، با افزایش عدد رینولدز قدرت جابجایی اجباری و طبیعی هر دو افزایش پیدا میکنند و به دلیل افزایش اینرسی، جریان ورودی تمایل دارد از مسیری هموارتر به مقطع خروجی برسد. بنابراین، درصد بیشتری از جریان ورودی از زیر منبع گرم عبور می کنند.

- در یک نسبت ابعادی ثابت، با افزایش عدد رینولدز، جابجایی اجباری نقش مهمتری را در فرایند انتقال حرارت ایجاد میکند و مقدار عدد نوسلت متوسط افزایش پیدا میکند. مقدار این افزایش برای تغییر عدد رینولدز در محدوده ۲۰۰ ≥ Re ≥ ۵۰ حدودا برابر % ۳۴ است.

- افزایش عدد ریچاردسون در یک عدد رینولدز ثابت ناشی از افزایش عدد گراشهف است. به دلیل ثابت بودن خواص ترموفیزیکی نانوسیال، افزایش عدد گراشهف نیز ناشی از افزایش نرخ تولید انرژی در منبع حرارتی است. بنابراین، افزایش عدد ریچاردسون در یک عدد رینولدز ثابت دو اثر متقابل بر روی عدد نوسلت دارد. اول این که به دلیل افزایش دمای منبع حرارتی عدد نوسلت را کاهش می دهد و دوم این که با افزایش نیروی شناوری عدد نوسلت را افزایش می دهد. نتیجه این دو اثر متقابل در افزایش عدد نوسلت با شیب ملایم در اثر افزایش عدد ریچاردسون خلاصه شده است به طوری که با افزایش عدد ریچاردسون در بازه  $T \ge Ri \ge 1$  در بهترین حالت اقزایش عدد ریچاردسون در بازه  $T \ge R$  است.

- با افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی، تولید انرژی و دمای منبع حرارتی افزایش پیدا می کند و بنابراین، نرخ انتقال حرارت از منبع حرارتی به نانوسیال مجاور آن نیز افزایش می یابد. همچنین نیروی شناوری در نانوسیال نیز با افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی زیاد می شود. از این رو با افزایش ضریب هدایت حرارتی منبع حرارتی عدد نوسلت متوسط افزایش چشمگیری می یابد. به طوری که با افزایش نسبت ضریب انتقال حرارت هدایتی از  $\overline{k} = 1$  تا ۱۰۰ $=\overline{k}$  عدد نوسلت متوسط حدود % ۱۷۸ افزایش می یابد.

- بررسی بر روی کسر حجمی نانوذرات نشان داد که افزایش این پارامتر به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، موجب افزایش عدد نوسلت متوسط می گردد. در این حالت افزایش عدد نوسلت در اعداد رینولدز بالاتر چشمگیرتر است.

بهازای (Re=۲۰۰)، افزایش چهار درصدی کسر حجمی نانوذرات سبب % ۶ افزایش عدد نوسلت متوسط شده است.

۹- مراجع

- 1. Mahmoudi, Gh. and Ghasemi, B. "Effect of Baffle on Mixed Convection Heat Transfer from an Open Cavity with Heat Sources", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 45-56, 2012 (In Persian).
- Mahmoudi, A.H., Shahi, M., Honarbakhsh Raouf, A., and Ghasemian, A. "Numerical Study of Natural Convection Cooling of Horizontal Heat Source Mounted in a Square Cavity Filled with Nanofluid", Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 37, No. 8, pp. 1135-1141, 2010.
- Hemmat Esfe, M., Ghadak, F., Haghiri, A., and Mir-Talebi S.S. "Numerical Study of Mixed Convection Flows in a Two-sided Inclined Liddriven Cavity, Utilizing Nano-fluid with Various Inclination Angles and Non-uniform Temperature", Aerospace Mechanics Journal, Vol. 8, No. 2, pp. 69-83, 2012 (In Persian).
- Kalteh, M., Javaherdeh, K., and Azarbarzin, T. "Numerical Solution of NanoFluid Mixed Convection Heat Transfer in a Lid-driven Square Cavity with a Triangular Heat Source, Powder Tech., Vol. 253, No. 1, pp. 780-788, 2014.
- Ghasemi, B. and Aminossadati, S.M. "A Numerical Study of Mixed Convection in a Horizontal Channel with a Discrete Heat Source in an Open Cavity", Eur. J. Mech., B-Fluids, Vol. 28, No. 4, pp. 590-598, 2009.
- Roy, M., Roy, S., and Basak, T. "Analysis of Entropy Generation on Mixed Convection in Square Enclosures for Various Horizontal or Vertical Moving Wall(s)", Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 68, No. 1, pp. 258-266, 2015.
- Hasib, M.H., Hossein, M.S., and Saha, S. "Effect of Tilt Angle on Pure Mixed Convection Flow in Trapezoidal Cavities Filled with Water-Al2O3 Nanofluid", Procedia Engineering, Vol. 105, No. 1, pp. 388 – 397, 2015.
- Uddin, M.B., Rahman, M.M., Khan, M.A.H., Saidur, R., and Ibrahim, T.A. "Hydromagnetic Double-Diffusive Mixed Convection in Trapezoidal Enclosure Due to Uniform and Nonuniform Heating at the Bottom Side: Effect of Lewis Number", Alexandria Engineering Journal, Vol. 55, No. 2, pp. 1165–1176, 2016.
- 9. Hajialigol, N., Fattahi, A., Ahmadi, M.H., Qomi, M.E., and Kakoli, E. "MHD Mixed Convection

rch

and Entropy Generation in a 3-D Microchannel, Using Al2O3–Water Nanofluid", J. Taiwan Inst. Chem. Eng., Vol. 46, No. 1, pp. 30-42, 2014.

- Milani Shirvan, K. and Mamourian, M. "Numerical Investigation and Optimization of Mixed Convection and Entropy Generation in Square Cavity with Lid-Driven", J. Modarres Mech. Eng., Vol. 15, No. 8, pp. 164-174. 2015 (In Persian).
- 11. Parvin, S., Nasrin, R., and Alim, M. A. "Heat Transfer Performance of Nanofluid in a Complicated Cavity Due to Prandtl Number Variation", Procedia Engineering, Vol. 90, No. 1, pp. 377-382, 2014.
- Brinkman, H.C. "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution", J. Chem Phys., Vol. 20, pp. 571-581, 1952.
- 13. Vajjha, R.S. and Das D.K., "Experimental Determination of Thermal Conductivity of Three Nanofluids and Development of New Correlations", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 52, No's. 21-22, pp. 4675–4682, 2009.
- 14. Sheikhzadeh, G.A. and Ehteram, H. "Numberical Study of Natural Convection in a Nanofluid Filled Enclosure with Central Heat Source and Presenting Correlations for Nusselt Number", J. Modarres Mech. Eng., Vol. 13, No. 10, pp. 62-74, 2013 (In Persian).
- 15. Patankar S.V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Taylor and Francis Group, New York, 1980.
- de Vahl Davis G., "Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Bench Mark Numerical Solution", Int. J. Numer Meth Fluid, Vol., pp. 249-264,1983.
- Rahman, Md.M., Alim, M.A., Saha, S., and Chowdhury, M.K. "A Numerical Study of Mixed Convection in a Square Cavity with a Haet Conductin Square Cylinder at Different Locations", J. Mech. Eng., Vol. 39, No. 2, pp. 78-85, 2008

۲۶