والماريس

مقاله پژوهشی کامل تاریخ دریافت ۹۱/۱۲/۹ تاریخ پذیرش ۹۲/۱*۶* اراثه در سایت ۹۲/۷/۳۰

بررسی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال در محفظه مربعی با منبع حرارتی مرکزی و ارائه روابطی برای محاسبه عدد ناسلت

دی ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۰ صص ۶۲–۷٤

قنبرعلى شيخزاده (*، حميدرضا احترام ، عليرضا آقايي ا

مجله علمى يژوهش

۱- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
 * کاشان، صندوق پستی ۱۱۶۷-۵۱۱۶۷

چکیده – هدف از مطالعه حاضر، بررسی عددی جابجایی طبیعی نانوسیالهای مختلف داخل یک محفظه مربعی با منبع حرارتی مرکزی در نسبتهای منظری مختلف و بهدست آوردن روابطی برای عدد ناسلت بر حسب عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات میباشد. منبع حرارتی در دمای *T_h* و دیواره محفظه در دمای *T_c* میباشد. نانوسیالها بر پایه آب با نانوذرات مس، اکسید مس، نقره، اکسید آلومینیم و یا اکسید تیتانیوم در نظر گرفته شدهاند. برای تحلیل جابهجایی طبیعی از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن بر اساس روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر استفاده شده است. مطالعه برای نسبت منظری ۲/۰ تا ۲/۰، عدد رایلی ^۳ ۱۰ تا ^۲ ۱۰ و کسر حجمی نانوذرات تا حداکثر کسر حجمی ۲۰۰ انجام شده است. نتایج عددی نشان میدهد که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات و افزایش نسبت منظری زیاد میشود. با افزایش عدد رایلی در فضای بالایی بین منبع و دیواره محفظه گردابههایی از نوع رایلی-بنارد ایجاد میشود. براساس نتایج عددی حاصل، روابط همبسته با دقت بسیار خوبی برای ارزیابی عدد ناسلت ارائه شده است.

كليدواژگان: حل عددي، نانوسيال، جابهجايي طبيعي، محفظه، عدد ناسلت متوسط.

Numerical study of natural convection in a nanofluid filled enclosure with central heat source and presenting correlations for Nusselt number

G. A. Sheikhzadeh^{1*}, H. Ehteram², A. Aghaei²

1- Assoc. Prof., Mech. Eng., Kashan Univ., Kashan, Iran

2- MSc. Student, Mech. Eng., Kashan Univ., Kashan, Iran * P.O.B. 87317-51167, Kashan, Iran. sheikhz@kashanu.ac.ir

* P.O.B. 8/31/-5116/, Kashan, Iran. sheikhz@kashanu.ac.ir

Abstract- The present study aims to investigate numerically the natural convection of various nanofluids inside a square enclosure with a central heat source at different aspect ratio. Also, some correlations are presented in order to calculate the Nusselt number in terms of Rayleigh number and volume fraction of nanoparticles. The heat source and cavity walls are kept at constant temperatures of T_h and T_c , respectively. The nanofluids are considered to be water as the base fluid and different nanoparticles such as Cu, CuO, Ag, Al₂O₃, or Tio₂. To discretize the governing equations, the control volume method and SIMPELER algorithm have been employed. The study has been carried out for aspect ratios from 0.2 to 0.8, Rayleigh numbers from 10^3 to 10^6 and the volume fractions of nanoparticles ranging in 0-0.05. The results indicated that the Nusselt number increases with increasing the volume fraction of nanoparticles as well as the aspect ratio. Furthermore, by increasing the Rayleigh number, some eddies, of kind of Rayleigh-Benard, are developed in the space between the heat source and the upper wall of the enclosure. Based on the obtained results, several correlations with high accuracy have been present in order to evaluate the Nusselt number. Keywords: Numerical Study, Nanofluid, Natural Convection, Enclosure, Average Nusselt Number.

۱– مقدمه

انتقال حرارت جابجایی طبیعی، بهعلت ساده بودن فرآیند، صرفه اقتصادی، صدای کم و بازیابی مجدد، در شاخههای مختلف صنعت مانند صنايع برودتی، دستگاههای ترانسفورماتور الکتریکی و سیستمهای تهویه مطبوع کاربرد فراوانی دارد. همچنین در تجهیزات صنعتی گوناگون مثل قطعات الکترونیکی، مبدل های حرارتی، کلکتورهای خورشیدی و دیگر موارد مشابه، انتقال حرارت جابهجایی طبیعی به کار می رود. همواره دستیابی به وسایلی با ابعاد کوچکتر، سبکتر و بازده بیشتر برای انتقال حرارت مطلوب بوده است. استفاده از سطح بیشتر یکی از روشهای مناسب جهت افزایش انتقال حرارت است ولى اين روش در تمام ابزارهاى الكترونيكى قابل كاربرد نیست. سیالهای مورد استفاده در انتقال حرارت جابهجایی طبيعي داراي ضريب انتقال حرارت كمي ميباشند، لذا استفاده از روش مناسب جهت افزایش ضریب هدایت حرارتی می تواند در بهبود انتقال حرارت جابهجایی طبیعی مؤثر باشد. با مطرح شدن نانوسیالها که اغلب ترکیبی از اکسید نانوذرات فلزی با سیالات پایه ای مثل آب، روغن و اتیلن گلیکول میباشند، دستیابی به این منظور میسر شده است [۱].

قبل از معرفی نانوسیالها، استفاده از ذرات در ابعاد میلیمتر و میکرومتر که منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می شود مورد استفاده قرار گرفته بود. ولی مشکلاتی چون پایداری ضعیف، افت فشار بالا و غیره، باعث شد استفاده از این شیوه چندان عملی نباشد [۲]. جهانشاهی و همکاران [۳]، مطالعهای تجربی و عددی با روش حجم محدود برای بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد آب-اکسید سیلیسیم در محفظهای مربعی با دیوارههای قائم گرم و سرد و دیوارههای افقی عایق انجام دادند. بر اساس یافتههای آنان عدد ناسلت متوسط در تمامی اعداد رایلی با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد. صالح و همکاران [۴] انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نانوسیال های آب- اکسید آلومینیوم و آب- مس را داخل محفظه ذوزنقهای یهصورت عددی بررسی کردند. آنها اثر تغییرات زاویه ساق ذوزنقه با راستای قائم، کسر حجمی نانوذرات و عدد گراشف را بررسی نمودند. بر اساس نتایج آنها بیشترین عدد ناسلت متوسط در بالاترین کسر حجمی مورد بررسی (۰/۰۵) برای نانوذره مس و در بیشترین زاویه ساق با

راستای قائم روی میدهد. آگوت [۵]، جابهجایی طبیعی نانوسیالهای مختلف با سیال پایه آب را در یک محفظه زاویهدار با گرمایش موضعی مورد بررسی قرار داد. براساس یافتههای او با افزایش کسر حجمی نانوذرات انتقال حرارت جابهجایی طبیعی افزایش مییابد و نانوذرات نقره و مس، افزایش بیشتری در انتقال حرارت جابهجایی طبیعی را سبب میشوند. در زوایای کوچک با افزایش طول گرمکننده، میزان انتقال حرارت جابهجایی طبیعی کاهش مییابد. همچنین او بیان نمود که بیشترین میزان انتقال حرارت جابهجایی طبیعی در زاویه °۳۰ رخ میدهد.

خانافر و همکاران [۶] اثر کاربرد نانوسیال را در یک حفره بر افزایش انتقال حرارت بررسی کردند. آنها برای محاسبه خواص نانوسیال مدلهای مختلفی را مورد استفاده قرار دادند. بر اساس نتایج آنها در هر عدد گراشفی با افزایش کسر حجمی نانوذرات، انتقال حرارت افزایش مییابد. هو و همکاران [۷] مطالعهای عددی با روش حجم محدود برای بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد آب-اکسید آلومینیم در محفظهای مربعی با دیوارههای افقی عایق و دیوارههای قائم گرم و سرد انجام دادند. بر اساس یافتههای آنان انتخاب مدلهای مختلف برای لزجت مقادیر متفاوتی برای عدد ناسلت پیشبینی میکند. از تپ ابوندا [۸]، جریان سیال و انتقال حرارت جابهجایی طبیعی را در یک حفره گرم شده را که با نانوسیالها با نانوذرات مختلف پرشده بود بررسی کردند. براساس یافتههای آنان با کاربرد نانوسیال در نسبتهای منظری کم افزایش بیشتری در انتقال حرارت نسبت

محمودی و هاشمی [۹] جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال آب مس را در یک محفظه C-شکل در نسبتهای منظری و اعداد رایلی مختلف بررسی نمودند. بر اساس نتایج آنها عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی و کسرحجمی نانوذرات افزایش مییابد. همچنین آنها گزارش کردند که در یک نسبت منظری ثابت با افزایش عدد رایلی نرخ انتقال حرارت افزایش مییابد. امینالساداتی و قاسمی [۱۰] جابهجایی طبیعی نانوسیال آب- اکسید مس را در اعداد گراشف و کسر حجمیهای مختلف در محفظهای مربعی با گرمایش موضعی به صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آنها با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات عدد ناسلت

> مهندسی مکانیک مدرس دی ۱۳۹۲. دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۰ www.SID.ir

متوسط افزايش مييابد.

ابوندا و همكاران [11]، انتقال حرارت جابجایی طبیعی بین دو استوانه هم محور پرشده با نانوسیال را به کمک روش حجم محدود انجام دادند. آنها نانوسیالهای مختلفی شامل نانوذرات Al₂O₃ ،Ag ،Cu و TiO₂ را بر اساس سیال پایه آب مورد بررسى قرار دادند و نتايج خود را بهصورت منحنى تغييرات عدد ناسلت ارائه نمودند. آنها گزارش کردند که در اعداد رایلی و نسبتهای منظری بزرگ نانوذرات با ضریب هدایت حرارتی بالاتر موجب انتقال حرارت بیشتری میشوند ولی در اعداد رایلی متوسط، نانوذرات با ضریب هدایت حرارتی پایین باعث کاهش در انتقال حرارت می شوند. عارف منش و همکاران [۱۲] جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید تیتانیوم را در فضای بین دو محفظه هم محور در نسبتهای منظری و اعداد رایلی مختلف بررسی نمودند. بر اساس نتايج آنها مقدار ضريب انتقال حرارت جابجايي طبيعي بر حسب عدد رایلی با افزایش نسبت منظری و کسر حجمی نانوذرات افزايش مييابد.

شیخزاده و همکاران [۱۳] در یک مطالعه عددی برای نانوسیال آب-مس در یک محفظه با وجود منبع گرم و سرد در دیوارههای عمودی آن انجام دادند. آنها رابطه عدد ناسلت را بەصورت Nu=(0.477\varphi+0.3554)Ra^{0.25} براى حالتى كە منابع گرم و سرد در وسط دیوارههای عمودی قرار دارند، در محدوده ۰/۱۵ $\phi < 0.14$ و $Ra \leq 10^{\circ}$ محدوده $\phi < 0.16$ ارائه نمودند. بر اساس یافته های آنان عدد ناسلت متوسط کمینه، هنگامی که گرمایش موضعی در دیوارههای طرف راست و چپ محفظه به ترتیب در بالا و پایین باشد، روی میدهد. منصور و همکاران [۱۴] در مطالعه تجربي كـه بـراي نانوسـيال أب-اكسـيدألومينيم انجـام دادنید رابطیه عیدد ناسیات را بیه صورت برای لولـه Nu=Nu $_0 (1-\varphi^{0.625})(1+5.25\times 10^5\times {
m Ra})^{0.135}$ افقے ارائے نمودنے د. رابطے آنہے بے رای ۴ /۰/۰ ج > و ⁶×1۰⁶≤Ra≤۱۰ میباشد. بر اساس یافتههای آنها با افـزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ تا ۰/۰۲ عدد ناسلت متوسط کاهش ناچیزی دارد.

با انجام یک بررسی مفصل مشخص می شود که برای جابهجایی طبیعی در محفظه های مربعی مطالعات زیادی انجام شده است ولی در مورد انتقال حرارت نانوسیال ها در

محفظه های مربعی هم محور مطالعه کمتری انجام شده است. در بیشتر مطالعات قبلی، نتایج به کارگیری نانوسیال به صورت نمودارهای تغییرات عدد ناسلت در مقادیر مختلف عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات نشان داده شده است و روابطی مناسب برای پیش بینی عدد ناسلت ارائه نشده است. در مطالعه حاضر با استفاده از شبیه سازی عددی جابجائی طبیعی در داخل محفظه با منبع حرارتی مرکزی، تاثیر به کارگیری انوسیال بر میدان جریان و انتقال حرارت بررسی شده و بر اساس آن روابطی برای پیش بینی ضریب انتقال حرارت بر منظری مختلف ارائه می شود. این روابط برای نانوسیال های منظری مختلف (آب مس، آب اکسید مس، آب نقره، آب اکسید آلومینیم، آب اکسید تیتانیوم) با دقت مناسبی به دست می آید.

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

نمای شماتیک هندسه مورد بررسی در شکل ۱ نشان داده شده است. ابعاد منبع حرارتی و محفظه به ترتیب برابر $l \ L$ میباشد. نسبت منظری که بهصورت |T| = AR تعریف میشود، برابر ۲/۰، ۵/۰ و ۸/۰ در نظر گرفته میشود. منبع حرارتی در دمای ثابت T_6 و دیوارههای محفظه در دمای ثابت T_6 نگه داشته میشود. طول در جهت z به اندازهای بلند میباشد که میتوان مسأله را دو بعدی فرض کرد. فاصله z که از گوشه منبع گرم سنجیده میشود نیز در شکل ۱ مشخص شده است. محفظه با نانوسیالهای آب-مس، آب-اکسیدمس، آب-نقره، آب-اکسید آلومینیم و آب-اکسید تیتانیوم پر میشود. خواص ترموفیزیکی آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است [۱،۱۰].



شکل ۱ نمای شماتیک و شرایط مرزی مسئله

$$U\frac{\partial V}{\partial X} + V\frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{v_{nf}}{a_f} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right) + \frac{\beta_{nf}}{\beta_f} \operatorname{RaPr}\theta$$
(9)

$$U\frac{\partial\theta}{\partial X} + V\frac{\partial\theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right) \tag{(1.1)}$$

$$Ra = \frac{s_f \sigma_{f} \sigma_{f}}{v_f \alpha_f}, Pr = \frac{v_f}{\alpha_f}$$
(11)

تابع جریان بیبعد نیز از رابطه (۱۲) بهدست میآید.

$$\Psi(X,Y) = \int UdY + \Psi_0$$
 (۱۲)

$$U=V=0, \ \theta=1$$
 روی منبع حرارتی $\theta=1$ (۱۳)
 $U=V=0, \ \theta=0$ روی محفظه خارجی $U=V=0, \ \theta=0$ ، ضریب هدایت
خواص نانوسیال شامل لزجت [۱۶]، ضریب هدایت
حرارتی [۱۷]، چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط
حجمی و ضریب پخش به ترتیب از روابط (۱۹–۱۴)
محاسبه می شوند.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{f}}{(1-\varphi)^{2.5}}$$

$$k_{nf} = \frac{k_{f} \left(k_{s}+2k_{f}-2\varphi(k_{f}-k_{s})\right)}{\left(k_{s}+2k_{f}+\varphi(k_{f}-k_{s})\right)}$$

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_{f}+\varphi\rho_{p}$$

$$(15)$$

$$(\rho c_{p})_{nf} = (1-\varphi)(\rho c_{p})_{f}+\varphi(\rho c_{p})_{p}$$

$$(17)$$

$$\beta_{nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho\beta)_{f}+\varphi(\rho\beta)_{p}}{(1-\varphi)\rho_{s}+\varphi\rho}$$

$$(18)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}}$$
(19)

ضریب انتفال حرارت جابجایی از رابطه (۲۰) بهدست می آید
$$h = -\frac{q}{2}$$

$$h_{nf} = \frac{1}{T_h - T_c} \tag{(7.)}$$

$$Nu = \frac{h_{nf}L}{k_f}$$
(71)

$$k_{f}$$
 شار حرارتی روی دیوارههای گرم از رابطه (۲۲) بهدست میآید.
 $q = -k_{nf} \frac{T_{h} - T_{c}}{L} \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{\text{wall}}$ (۲۲)

بررسی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال در محفظه مربعی با . . .

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی سیال پایه (در دمای K ۳۰۰) و نانوذرات [۱۱،۱۰]

آب (سیال پایه)	TiO ₂	Al_2O_3	Ag	CuO	Cu	خواص فیزیکی
4179	۶8۶/۲	٧۶۵	۲۳۵	۵۳۵/۶	۳۸۵	$c_p(J/kg-K)$
99V/1	4200	۳۹۷۰	۱۰۵۰۰	۶۳۲۰	٨٩٣٣	$\rho(\text{kg/m}^3)$
٠/۶١٣	٨/٩۵٣٨	۲۵	479	۷۶/۵	4.1	<i>k</i> (w/mK)
۲۱	٠/٩	٠/٨۵	١/٨٩	۱/٨	١/۶٧	$\beta \times 10^{-5} (\mathrm{K}^{-1})$
•/••١••٣	-	-	-	-	-	μ (kg/ms)

خواص نانوسیالهای مورد استفاده به جز چگالی که تغییرات آن متناسب با تقریب بوزینسک منظور شده، ثابت فرض میشوند [۱۵].

معادلات حاکم شامل بقای جرم (۱)، بقای مومنتم در راستای x (۲)، راستای y (۳) و بقای انرژی (۴) برای جریان دو بعدی، دائم و آرام از روابط (۱) تا (۴) محاسبه می شوند.

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

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)$$
(7)

$$\frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{\rm nf}}{\rho_{nf}} g(T - T_c)$$
(*)

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

تابع جریان از رابطه (۵) بهدست میآید.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} \Rightarrow \psi(x, y) = \int u dy + \psi_0$$
 (Δ)

با کمک متغیرهای بیبعد (۶)، معادلات حاکم بیبعد (۱۰–۷)، بهدست میآیند.

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, S = \frac{s}{L}, U = \frac{uL}{\alpha_f}, V = \frac{vL}{\alpha_f}$$
$$P = \frac{pL^2}{\rho_{nf}\alpha_f^2}, \Psi = \frac{\psi}{\alpha_f} \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}$$
(\$

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

$$U\frac{\partial U}{\partial X} + V\frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{v_{nf}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) \tag{A}$$

مهندسی مکانیک مدرس دی ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۰ www.SID.ir

با قرار دادن رابطههای (۲۰) و (۲۲) در رابطهی (۲۱) عـدد ناسلت بهصورت رابطه (۲۳) محاسبه می شود.

$$\mathbf{N}\mathbf{u} = -\frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{n}} \Big|_{\mathbf{wall}} \tag{(YT)}$$

عدد ناسلت متوسط روی سطح منبع حرارتی با کمک رابطه (۲۴) بهدست میآید.

$$Nu_{avg} = \frac{1}{4 \times AR} \int_{\text{on heat source walls}} Nu \, dS$$
 (Y*)

۳ - شبیه سازی عددی معادلات حاکم به کمک روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر به صورت عددی حل شدند. ابتدا شبکهای یکنواخت و مناسب بر میدان حل منطبق می شود و سپس حول هر گره، حجم کنترلی ایجاد می شود و از معادلات حاکم روی هر حجم کنترل انتگرال گیری شده و معادلات منفصل شده و دستگاهی از معادلات جبری به دست می آید. برای جملات پخش از طرح جابه جایی روش پیوندی (هیبرید) بکار می رود. در این روش برای اعداد پکلت کوچکتر از ۲، از طرح تفاضل مرکزی و در اعداد پکلت بزرگتر از ۲ از طرح جریان بالادست استفاده می شود. برای دستیابی به همگرایی از ضرایب زیر تخفیف که برای مؤلفه های سرعت ۵/۰ و برای دما ۲/۰ می باشد استفاده شده است.

۳-۱- اعتبارسنجی برنامه

به منظور اعتبار سنجی نتایج برنامه کامپیوتری تهیه شده، دو شبیهسازی عددی انجام و نتایج حاصل از آن با نتایج ارائه شده در مقالات مقایسه میشود.

۳-۱-۱- در مسأله اول جابهجایی طبیعی در محفظه مربعی پرشده با هوا (Pr=۰/۷۲) مطابق هندسه شکل ۲ شبیهسازی شده و نتایج حاصل با نتایج دیگران در جدول ۲ مقایسه شده است.

 ۳−۲−۱− در مسئله دوم جابهجایی طبیعی در محفظه مربعی پرشده با نانوسیال آب–مس مطابق هندسه شکل ۳ شبیهسازی شده است. نتایج حاصل از کار حاضر با نتایج ازتپ و ابوندا [۸]
 برای رایلیها و کسر حجمیهای مختلف در جدول ۳ مقایسه

شده است. نتایج از تطابق مناسبی برخوردارند.

۳-۲- استقلال نتایج از شبکه

به منظور یافتن شبکه مناسب که منجر به نتایج مستقل از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب-اکسیدآلومینیم با شبکهای با تعداد نقاط مختلف یعنی ۳۱×۳۱، ۵۱×۵۱، ۷۱×۷۱، ۹۱×۹۱ و ۱۱۱×۱۱۱ بهدست آمده و در جدول ۴ مقایسه شدهاند. با توجه به مقادیر ناسلت متوسط مشاهده می شود که شبکه با تعداد نقاط ۹۱×۹۱ مناسب است.



شکل ۲ نمای شماتیک و شرایط مرزی در حفرهای پر شده با هوا [۶]

هندسه	هوا در	آزاد	جابجايي	برای	متوسط	ناسلت	عدد	جدول ۲
	گران	ايج دي	حاضر و نتا	تايج -	سه بین ن	۲ مقایہ	شكل	

Ra=1.'	Ra=۱・ ^۵	Ra=1. [*]	Ra=1."	
۸/۹۰۴	4/221	7/241	١/١١٨	كارحاضر
۸/۸۰۶	۴/۵۱۰	2/240	1/114	باراکس [۱۸]
٨/٧٩٩	4/219	2/262	1/114	ديويس [١٩]
۹/۰۱۲	4/949	۲/۳۰۲	1/1 • ۵	فاسقی [۲۰]
۸/۸۲۶	4/222	2/240	1/11A	خانافر [۶]
۸/۷۵۴	4/42.	۲/۲۰۱	۸۰۱/۱	پریکلیوس و مارکاتس [۲۱]



شکل ۳ نمای شماتیک و شرایط مرزی در حفرهای پر شده نانوسیال آب-مس [۸] آلومينيم و آب-اكسيد تيتانيوم به ازاى اعداد رايلي ۱۰۴، ۱۰۴، ۱۰⁶ و ۱۰⁶، کسر حجمی های ۰، ۱۰/۰، ۲۰/۰۲، ۲۰/۰، ۱۰۴، ۰/۰۵ و سه نسبت منظری ۰/۲، ۵/۰، ۸/۸ بررسی می شود. در شکلهای ۴ و ۵ خطوط جریان و خطوط همدما آب و نانوسیال آب-نقره برای اعداد رایلی (^۱۰۴ تا ^{۱۰}^۴) و نسبتهای منظری (۰/۲، ۵/۵ و ۰/۸) در کسر حجمی ۰/۰۵ آورده شده است. همچنین در جدول ۵ مقادیر بیشینه قدرمطلق تابع جریان ($|\Psi|_{max}$) ارائه شده است. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می شود، دریک عدد رایلی ثابت با افزایش نسبت منظری قدرت جریان کاهش می یابد. بیشترین کاهش قدرت جریان، در Ra=۱۰⁶ از نسبت منظری ۰/۵ به ۰/۸ و کمترین کاهش قدرت جریان در Ra=۱۰⁶ از نسبت منظری ۲/۲ به ۰/۵ روی میدهد که به ترتیب برابر ۹۲/۹۵ و ۲۵/۹۵ درصد میباشد. در یک نسبت منظری ثابت با افزایش عدد رایلی قدرت جریان به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. با توجه به شکل ۴ در رایلی ۱۰^۳ گردابههای ضعیفی در دو طرف منبع حرارتی در امتداد دیوارههای عمودی شکل می گیرند. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود، در رایلی ۱۰^۲ در تمامی نسبتهای منظری، خطوط دمایی انحنای کمی دارند که نشان از غالب بودن انتقال حرارت هدایتی میباشد. از طرفی با افزایش نسبت منظری خطوط همدما فشردهتر شده و انتقال حرارت افزایش مییابد.

در یک نسبت منظری ثابت با افزایش عدد رایلی مرکز گردابههای جریان به طرف بالای محفظه متمایل شده و قدرت آنها افزایش می ابد و حجم بیشتری از جریان در بالای محفظه وجود دارد. در $AR^{=}$ در اعداد رایلی 0 ۱ و 9 در فضای بالای بین محفظه و منبع حرارتی گردابههای ثانویه نیز به وجود می آیند.

جدول ۵ مقادیر ماکزیمم قدرمطلق تابع جریان در اعداد رایلی و نسبتهای منظری مختلف برای نانوسیال آب- نقره در

			$\varphi = \cdot / \cdot \Delta$
$AR = \cdot / \lambda$	$AR = \cdot / \Delta$	$AR = \cdot / \Upsilon$	Ra
•/••۲٧	•/•٣٨•	۰/۱۳۱۵	١٠٣
•/• ٢٧•	•/٣٧٩۴	١/٣٧٠٣	۱۰۴
•/٢۶٨٣	۳/۸۰۶۵	٩/۵٨•٨	۱۰۵
۲/۶۸۷۶	18/2009	24/8080	۰۶

همچنین در یک نسبت منظری ثابت با افزایش عدد رایلی، انحنای خطوط همدما افزایش یافته و تمایل این خطوط به بررسی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال در محفظه مربعی با . . .

ه از از تپ و ابوندا [۸]	نتايج حاصل شد	و مقایسه با	مس،
از تپ و ابوندا [۸]	کار حاضر	φ	Ra
۱/۰۰۴	١/••٨	•/••	
1/177	1/119	•/۵	
1/201	1/202	•/١•	۱۰۳
1/422	1/414	٠/١۵	
1/877	1/8	•/٢•	
۲/۰۱۰	١/٩٩۶	•/••	
7/177	۲/•۹۷	•/•۵	
۲/۲۰۳	7/188	•/١•	۱۰۴
۲/۲۸۳	7/797	•/1۵	
۲/۳۶۳	۲/۳۴۰	•/٢•	
٣/٩٨٣	٣/٩٩٣	•/••	
4/211	4/274	۰/۰۵	
4/44.	4/409	•/١•	۱۰۵
4/887	41991	٠/١۵	
۴/۸۷۵	4/161	• /٢ •	

جدول ۳ عدد ناسلت متوسط در محفظه پر شده با نانوسیال آب-

جدول ۴ عدد ناسلت متوسط روی منبع حرارتی برای نانوسیال آب اکسید آلمینیم (۰/۰=۵ م ^۶۰۴ =Ra یا شبکههای مختلف

φ و γ Ra P ϕ	السيد الومينيم ٢٠٢٠ /
Nu _{ave}	تعداد نقاط
۴/۹۰	۳۱×۳۱
۵/۷۴	۵ ۱ × ۵ ۱
۶/• V	۷۱×۷۱
۶/۱۰	9 1×9 1
۶/۱۲)))×)))

معیار همگرایی برای فشار، سرعت و دما از رابطه (۲۵) حاصل می شود که در آن M و N تعداد نقاط شبکه در جهت xو y بوده و ζ معرف متغیری است که حل می شود. k تعداد تکرار و حداکثر میزان خطا ² ۱۰ می باشد.

$$\begin{split} \underset{\substack{ \neq = }}{\overset{ \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left| \zeta_{i,j}^{k+1} - \zeta_{i,j}^{k} \right| }{\sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{N} \left| \zeta_{i,j}^{k+1} \right|} \leq & 10^{-6} \end{split} \tag{7a}$$

۴- نتایج و بحث
۴-۱- بررسی میدان جریان و دما
۹-۱- بررسی میدان جریان و دما
۹۰ با کمک برنامه کامپیوتری تهیه شده، میدان جریان و دما در
۹۰ جابهجایی طبیعی اطراف منبع حرارتی داخل محفظه برای
۱۰ نانوسیالهای آب-مس، آب-اکسید مس، آب-نقره، آب-اکسید

مهندسی مکانیک مدرس دی ۱۳۹۲. دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۰ www.SID.ir

است. همچنین تراکم خطوط همدما در اطراف منبع حرارتی با افزایش عدد رایلی در نسبت منظری ثابت روی میدهد.

طرف بالای محفظه بیشتر میباشد که این مطلب نشاندهنده غلبه انتقال حرارت جابجایی طبیعی، بر انتقال حرارت هدایتی



شکل ۴ خطوط جریان آب (- - -) و نانوسیال آب- نقره (___) در $\phi^{=0.0}$ و در اعداد رایلی و نسبتهای منظری مختلف



شکل ۵ خطوط هم دما آب (- - -) و نانوسیال آب- نقره (_) در $\varphi^{=0.0}$ در اعداد رایلی و نسبتهای منظری مختلف

در رایلی ^۴۰، گردابهها قویتر شده و در بالای منبع دما در کنار دیوارهها به خصوص نزدیک منبع حرارتی از حرارتی نیز گردابههایی متقارن شکل میگیرد. تراکم خطوط

ویژگیهای جریان در Ra=۱۰^۶ میباشد.

در رایلی ثابت با افزایش AR حجم سیال موجود در فضای بین منبع و محفظه کاهش یافته و در نتیجه قدرت جریان به وجود آمده کاهش مییابد.

در AR با افزایش عدد رایلی ضمن قوی تر شدن گردابهها، مرکز آنها نیز به سمت بالای منبع گرم منتقل می شود. در AR-R با افزایش عدد رایلی، گردابههای موجود قوی تر شده و در بالای منبع گرم نیز گردابههای ثانویه شکل می گیرد. اما در AR-R به جز در رایلی 9 که گردابههای ثانویه در بالای منبع گرم شکل می گیرد در دیگر اعداد رایلی به ثانویه در بالای منبع گرم شکل می گیرد در دیگر اعداد رایلی به گردابههای ثانویه در فضای بالای منبع گرم ایجاد نمی شود. موازی بودن خطوط دما ثابت در 9 اه عالب بودن انتقال حرارت هدایتی را تایید می کند، در حالی که انحنای خطوط دما ثابت در 3 اهدای اولیه و ما تایم منبع حرارتی، بیانگر دما ثابت در ³ ما جاری منبع حرارتی، بیانگر شکل گیری گردابههای ثانویه در بالای منبع حرارتی، بیانگر شکل گیری گردابههای ثانویه در بالای منبع حرارتی، بیانگر

۲-۴- بررسی ضریب انتقال حرارت

در شکل ۶ عدد ناسلت بر حسب کسر حجمی برای رایلیهای مختلف (۱۰ تا ۱۰[°]) و مقادیر مختلف نسبت منظری (۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸) رسم شده است. همان طور که مشاهده می شود، عدد ناسلت متوسط برای همه نانوسیالها نسبت به کسر حجمی روندی افزایشی دارد. در بین نانوسیالهای مورد استفاده همواره آب-اكسيد تيتانيوم كمترين عدد ناسلت و آب-نقره بيشترين مقدار عدد ناسلت را دارا میباشد. هر چند که رفتار نانوسیالها با نانوذرات مس و نقره بسیار شبیه به هم میباشند. در Ra=۱۰^۶ تفاوت محسوستری بین عدد ناسلت نانوسیالهای آب-نقره و آب-مس با دیگر نانوسیالها وجود دارد. ضمناً با افزایش عدد رایلی از ۱۰^۵ به ۱۰^۶، افزایش قابل توجهی در عدد ناسلت روی میدهد که بیانگر غالب شدن رژیم انتقال حرارت جابهجایی طبیعی بر انتقال حرارت هدایتی است. با افزایش نسبت منظری، مقدار عدد ناسلت و همچنین تغییرات آن برحسب کسر حجمی نانوذرات افزایش مییابد که این به دلیل کاهش فاصلهی بین منبع حرارتی و دیواره محفظه است.

۴-۳- ارائه روابطی برای پیشبینی عدد ناسلت

با توجه به مقادیر بهدست آمده برای عدد ناسلت در مقادیر مختلف اعداد رایلی، نسبت منظری، کسر حجمی نانوذرات و

نوع نانوذرات، می توان روابطی برای عدد ناسلت در هر سه نسبت منظری برحسب سایر متغیرها ارائه کرد. رابطه بین عدد ناسلت با کسر حجمی و عدد رایلی برای نسبت منظری ۲/۰ بهصورت رابطه (۲۶) فرض می شود. Nu_{avg}= $(a \times \varphi)+(b \times \text{Ra}^{0.6})+c$ (۲۶) (۲۶) (۲۶) و برای نسبتهای منظری ۵/۰ و ۸/۰ بهصورت رابطه (۲۷) می باشد. Nu_{avg}= $(a \times \varphi)+(b \times \text{Ra}^{1.3})+c$ (۲۷) (۲۷) می اف و برای نانو ذرات مختلف و برای فسر ایب a b و ۲ برای نانو ذرات مختلف و برای فسر ایب a b م ا و ۲ برای نانو ذرات مختلف و برای فسر ایب منظری در جدول های ۶ تا ۸ آورده

جدول ۶ ضرایب رابطهٔ ناسلت متوسط برای نانوذرات مختلف در AR=0.2 ($R^2=0.984$)

برای ^۶ - N·^۳≤Ra≤۱۰ و √≤ + میباشند.

С	$b \times 10^{-2}$	а	نوع نانوذره
4/162	۰/۲۰۹۵	14/21	Ag
۴/۸۵۹۶	۰/۲۰۹۸	۱۳/۴۸	Al_2O_3
4/1022	•/7 \ • •	۱۴/۸۸	Cu
۴/۸۵۵۸	•/51••	14/81	CuO
۴/۸۷۲۱	•/Y•XY	۱۱/۰۸	TiO ₂

در	مختلف	نانوذرات	براى	متوسط	ناسلت	رابطة	ضرايب	۷	دول
				A	<i>R</i> =0.5	$(R^2 =$	0.999)	1	

		···· 0.5 (IC	0.777)
С	$b \times 10^{-7}$	a	نوع نانوذره
4/954	1/1724	14/177	Ag
4/988	1/1014	11/19	Al_2O_3
۴/۹۳۸	1/1842	۱۴/۳۰۸	Cu
۴/۹۴۸	١/١۶٨٨	13/211	CuO
۴/۹۷۶	1/1084	٩/٩٣	TiO ₂

جدول \land ضرایب رابطهٔ ناسلت متوسط برای نانوذرات مختلف در AR=0.8 ($R^2=0.999$)

		лл 0.0 (IX	0.999)
с	b×10 ⁻⁹	а	نوع نانوذره
1.1.14	•/9548	۳۰/۹۴	Ag
۱۰/۰ ۱۶	•/8084	۲٩/۳۵	Al_2O_3
۱۰/۰۱۵	•/٧٨۴٩	۳۱/.۶۱	Cu
۱۰/۰۱۸	٠/٩٢٧٨	٣•/١٩	CuO
۱۰/۰۲۳	۰/۸۲۱۵	۲۵/۱۹	TiO_2

مهندسی مکانیک مدرس دی ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۰

در این جداول منظور از R^2 ، ضریب همبستگی بین مقادیر عددی و مقادیر پیشبینی شده با روابط ارائه شده میباشد.

همانطور که از مقادیر R² مشخص است، روابط ارائه شده از دقت بسیار خوبی برخوردار هستند.



مهندسی مکانیک مدرس دی ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۱۰ www.SID.ir



۵- نتیجهگیری

مختلف در فضای بین محفظه و منبع حرارتی، بهصورت عددی (با روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر) مورد مطالعه قرار گرفت و روابطی همبسته برای عدد ناسلت متوسط ارائه شد.

در این مقاله، جابجایی طبیعی نانوسیالات مختلف در چندین عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات در نسبتهای منظری

خطوط همدما و خطوط جریان، برای جابجایی طبیعی آب و نانوسیال آب-نقره (در کسر حجمی ۰/۰۰) در همه نسبتهای منظری و اعداد رایلی به عنوان نمونه ارائه شد. همچنین نمودار تغییرات عدد ناسلت بر حسب کسر حجمی نانوذرات نیز در همه نسبتهای منظری و اعداد رایلی ارائه شد.

بر اساس این مطالعه عددی، در همهی نانوسیالهای مورد بررسی با افزایش کسر حجمی و عدد رایلی عدد ناسلت افزایش می ابد و در این مورد نانوذرات نقره و مس تأثیر بیشتری در افزایش عدد ناسلت دارند. که ناشی از ضریب هدایت حرارتی بالاتر آنها می باشد. در رایلیهای پایین (^۳ ۱۰⁶ ۲۰) به جز نانوسیال آب–اکسیدتیتانیوم که مقدار ناسلت آن کمتر از دیگر نانوسیالها می باشد مابقی رفتاری تقریباً مشابه دارند. ولی در رایلی ^۴ ۱۰ تفاوت محسوستری در عدد ناسلت نانوسیال آب– نقره و آب–مس، با نانوسیال آب–اکسید تیتانیوم وجود دارد. این تفاوت برای نانوسیالهای آب–اکسید آلومینیم و آب–اکسید مس کمتر است. با افزایش نسبت منظری مقدار عدد ناسلت در همه رایلیها و برای همه کسر حجمیها افزایش می یابد.

بر اساس نتایج عددی، روابط همبسته برای پیش بینی عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات، برای نانوذرات مختلف و مقادیر مختلف نسبت منظری محفظه ارائه شد که از دقت بسیار خوبی برخوردار هستند.

۶- فهرست علايم

$$AR$$
 نسبت منظری

 $(Jkg^{-1}K^{-1})$
 خلوفیت گرمایی ویژه سیال (Jkg^{-1}K^{-1})

 (ms^{-2})
 شتاب جاذبه (ms^{-2})

 m
 (ms^{-2})

 (m)
 $mathbf{schercher}$
 m
 $mathbf{schercher}$
 m
 $mathbf{scherres}$
 $mathbf{scherres}$

Pr عدد پرانتل R² ضریب همبستگی

- Ra عدد رایلی ۶ طول طی شده روی منبع گرم در راستاهای x و y
 - *S* طول بیبعد طی شدہ روی منبع گرم
 - (K) دما T
 - (ms^{-1}) مولفههای سرعت u, v
 - ریت مولفههای بیبعدسرعت U,V (m) مولفههای مختصات (x,y
 - X, Y مولفههای مختصات بی بعد

علايم يونانى:

- $(m^{2}s^{-1})$ ضریب پخش حرارتی ($m^{2}s^{-1})$ (K^{-1}) ضریب انبساط حرارتی (β
 - ل لزجت (kgm⁻²s⁻¹) لزجت (m²s⁻¹) لزجت سينماتيكي (v
 - $(m \ s)$ لرجت سینمائیدی (m s) ψ تابع جریان ($(m^2 s^{-1})$
 - m^2s^{-1} تابع جريان (Ψ ψ Ψ تابع جريان بے بعد Ψ
 - φ دمای د دون بی
 - دمای بی بعد heta
 - (kgm⁻³) چگالی (ρ
 - arphi کسر حجمی نانوذرات arphi
 - زيرنويسها:
- avg متوسط c سرد f گرم h کاروسیال p ذره

۷- تقدیر و تشکر نویسندگان از پژوهشکده انرژی و معاونت پژوهشی دانشگاه کاشان به سبب حمایت مالی از این تحقیق (قرارداد شماره ۹۲/۴۹۷) تشکر مینمایند.

۸- مراجع

- [1] Choi S. U. S., Eastman J. A., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, San Francisco, Calif, USA, 1995.
- [2] Das S.K., Putra N., Thiesen P., Roetzd W., "Temperature dependence of thermal conductivity

قنبرعلى شيخزاده وهمكاران

Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 35, No. 5, 2008, pp. 657-665.

- [12] Arefmanesh A., Amini M., Mahmoodi M., Najafi M., "Buoyancy-driven heat transfer analysis in two-square duct annuli filled with a nanofluid", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 33, No. 1, 2012, pp. 95-104.
- [13] Sheikhzadeh G.A., Arefmanesh A., Kheirkhah M.H., Abdollahi R., "Natural convection of Cuwater nanofluid in a cavity with partially active side walls", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 30, No. 2, 2011, pp. 166-176.
- [14] Mansour R.B, Galanis N., Nguyen C.T., "Experimental study of mixed convection with water-Al₂O₃ nanofluid in inclined tube with uniform wall heat flux", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 3, 2011, pp. 403-410.
- [15] Bejan A., Convection Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2004.
- [16] Brinkman H.C., "The viscosity of concentrated suspensions and solution", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, 1952, pp. 571-581.
- [17] Maxwell-Garnett, J.C. () "Colours in metal glasses and in metallic films", Philos. Trans. Roy. Soc. Vol. 20, No. 3, 1904, pp. 385-420.
- [18] Barakos G., Mitsoulis E., "Natural convection flow in a square cavity revisited: laminar and turbulent models with wall fraction", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*. Vol. 18, No. 7, 1994, pp. 695-719.
- [19] Davis G.V., "Natural convection of air in a square cavity, a benchmark numerical solution", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.Vol. 3, No. 3, 1983, pp. 249-264.
- [20] Fusegi T., Hyun J.M., Kawahara K., Farouk B., "A Numerical study of three-dimensional natural convection in a differentially heated cubical enclosure", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 6, 1991, pp. 1543-1557.
- [21] Pericleous K.A., Markatos N.C., "Laminar and turbulent natural convection an enclosed cavity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27, No. 5, 1984, pp. 772-775.

enhancement for nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, No. 4, 2003, pp. 567-574.

- [3] Jahanshahi M., Hosseinizadeh SF., Alipanah M., Dehghani A., Vakilinejad GR., "Numerical, Simulation of free convection based on experimental measured conductivity in a square cavity using water/SiO2 nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 6, 2010, pp. 687-694.
- [4] Saleh H, Roslan R, Hashim I., "Natural convection heat transfer in a nanofluid-filled trapezoidal enclosure", *International Journal of Thermal Science*, Vol. 54, No. 3, 2011, pp.194-201.
- [5] Ogut E.B., "Natural convection of water-based nanofluids in an inclined enclosure with a heat source", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 11,2009, pp. 2063-2073.
- [6] Khanafer K., Vafai K., Lightstone M., "Buoyancydriven heat transfer enhancement in a two dimensional enclosure utilizing nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 19, 2003, pp. 3639-3653.
- [7] Ho CJ, Chen MW, Li ZW., "Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 18, 2008, pp. 4506-4516.
- [8] Oztop H., Abu-Nada E., "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids", *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 29, No. 5, 2008, pp. 1326-1336.
- [9] Mahmoodi M., Hashemi S.S., "Numerical study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 55, No. 1, 2012, pp. 76-89.
- [10] Aminossadati SM, Ghasemi B. "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, 2011;pp. 672-678.
- [11] Abu-Nada E., Masoud Z., Hijazi A., "Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids", *International*