

بررسی عددی تاثیر نسبت منظر محفظه مستطیلی و کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نانوسیال آلومینا-آب

وحید مجیدی^۱

کارشناسی ارشد

در این مطالعه تاثیر تغییر ارتفاع نسبت به پهنای محفظه (نسبت منظر) و همچنین کسر حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت جا به جایی طبیعی نانوسیال آلومینا-آب در یک محفظه بررسی شد. نانوسیال، تک فاز و غیرقابل تراکم و بر پایه سیال آب شامل نانوذرات آلومینا (اکسید آلومینیوم) فرض شده است. غلظت نانوذرات صفر تا ۴ درصد است و جریان طبیعی آرام فرض شده است. محدوده اعداد رایلی $10^5 \times 4$ تا 10^8 در محفظه دو بعدی با نسبت منظرهای متفاوت است. محفظه دارای دو دیوار عمودی با دماهای گرم و سرد با اختلاف دمای مشخص است و دو دیوار افقی آن عایق می باشد. معادلات حاکم به صورت عددی به روش حجم محدود و به کمک نرم افزار فلوئنت حل شدند. مشخص شد با توجه به مدل های استفاده شده برای ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، نانوسیال با غلظت های بیش تر، به دلیل هدایت حرارتی و نیز ویسکوزیته بالاتر نسبت به آب خالص، عدد ناسلت نانوسیال آلومینا-آب کاهش می یابد، به عبارتی عدد ناسلت در هر نسبت منظر مشخص، در کم ترین غلظت معادل ۰/۳ درصد کاهش و در بیش ترین غلظت نیز معادل ۱۴ درصد کاهش می یابد. عدد ناسلت در یک غلظت ثابت و مشخص، در مقایسه با ضریب انتقال حرارت جا به جایی و هدایت حرارتی نانوسیال، به نسبت منظر محفظه وابسته تر می باشد و با افزایش نسبت منظر عدد ناسلت نیز روند افزایشی خواهد داشت و تحت تاثیر بیش تری قرار می گیرد.

آرش میرعبداله لواسانی^۲

دانشیار

واژه های راهنما : روش عددی، جا به جایی طبیعی، نانوسیال، محفظه، آلومینا، نسبت منظر

۱-مقدمه

جابه جایی طبیعی سیال یکی از مکانیزمهای انتقال حرارت می باشد که به دلیل تفاوت چگالی ناشی از گرادیان دما حاصل می شود [۱]. جا به جایی طبیعی بطور گسترده در مهندسی از جمله خنک کننده های الکترونیکی، مبدل های حرارتی، بویلرها، سیستمهای راکتور هسته ای و تجهیزات ذخیره انرژی و غیره کاربرد دارند [۲]. اخیراً، استفاده از نانوسیال به جای آب خالص جهت جا به جایی آزاد به عنوان یکی از جالب ترین موضوعات برای محققین می باشد [۳].

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی،

vamajidi@yahoo.com

^۲ نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی arashlavasani@iauctb.ac.ir

برای فهم بهتر انتقال حرارت جا به جایی طبیعی نانوسیال، پژوهش های متعددی در دو دهه اخیر انجام شده است [۵۴]. در مطالعات عددی، اگرچه نگرش دینامیک مولکولی [۷۶] و لتیس-بولتزمن [۹۸]، برای جریان نانوسیال و عملکرد انتقال حرارت آن به کار گرفته شده اند اما به هر حال روش های دینامیک سیالات محاسباتی کلاسیک همچنان نقش غالبی در این حوزه دارد [۱۰].

بر پایه شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی، خانافر و همکاران [۱۱] دریافتند که نرخ انتقال حرارت آب در محفظه دو بعدی بطور قابل توجه ای با افزودن بیش تر نانوذرات مس (برای نسبت حجمی تا ۲۰ درصد) افزایش می یابد. اوزتاپ و ابوندا [۱۲] افزایش انتقال حرارت طبیعی با استفاده از نانوسیال های آلومینا-آب، اکسید تیتانیوم-آب و مس-آب (صفر تا ۲۰ درصد) را در محفظه های دوبعدی با نسبت منظرهای متفاوت نشان دادند. امینوساداتی و قاسمی [۱۳] گزارش دادند که اضافه کردن نانوذرات طلا، مس، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم (صفر تا ۲۰ درصد)، می تواند عملکرد خنک کنندگی آب خالص در محفظه دوبعدی با گرمایش از کف را بهبود دهد به ویژه وقتی عدد رایلی کم است. اوسلتی و همکاران [۱۴] نشان دادند وقتی نسبت حجمی نانوذرات آلومینا، اکسید تیتانیوم و مس کم تر از ۵ درصد باشند انتقال حرارت جا به جایی طبیعی در یک محفظه دوبعدی افزایش می یابد.

نانوسیال در مطالعات ذکر شده، پایدار با خواص هموژن در کل میدان محاسباتی فرض شده است. اما عملاً بدون روش های پایدارکننده مناسب بعد از ساخت و تهیه نانوسیال، ته نشینی نانوذرات انجام می گردد. نتایج درازازگا و همکاران [۱۵] نشان داد که نانوسیال های با درصد ۱ درصد اکسید مس-آب و ۰/۵ درصد آلومینا-آب در صورت عدم به کارگیری از روش های پراکندگی ذرات، به طور قابل توجهی لایه ته نشینی بعد از یک روز شکل می گیرد. در سال (۲۰۱۵)، لیو و همکاران [۱۶]، گزارش دادند که لایه های تجمعات و ته نشینی نانوذرات آلومینا و اکسید مس در آب (۰/۱ تا ۱/۵ درصد)، ۳ روز بعد از تهیه آنها به وضوح مشاهده شدند. باتوجه به تحقیقات حداد و همکاران [۱۷] بر روی نانوسیالات عملاً بعد از اضافه کردن نانوذرات در سیال پایه و تهیه نانوسیال عملیات پایدارسازی انجام می شود.

از آنجا که سرعت ته نشینی نانوذرات در مقایسه با سرعت جریان اجباری نانوسیال بسیار کم است بنا بر این ملاحظه مساله ته نشینی نانوذرات می تواند در مسائل جا به جایی اجباری نادیده گرفته شود. اما در مسائل جا به جایی طبیعی، دما که عامل سرعت و جریان طبیعی می باشد کم بوده [۱۸] و به همین دلیل نمیتوان ته نشینی را بدون روش های پایدارکننده نانوسیال نادیده گرفت. بنابراین ارتباط بین جا به جایی طبیعی نانوسیال و تجمعات نانوذرات به عنوان موضوعی قابل توجه ارائه می شود.

در مطالعه عددی صورت گرفته توسط لی و همکاران [۱۹] که نانوسیال آلومینا-آب را با نگرش های تک فاز و چند فازی درون محفظه ای دوبعدی مدل کردند، نتایج آنها نشان داده که ته نشینی نانوذرات تاثیر قابل ملاحظه ای بر جا به جایی طبیعی نانوسیال خواهد داشت به این صورت که با ته نشینی نانوذرات، لایه ای در کف محفظه شکل گرفته که می تواند انتقال حرارت هدایتی را نسبت به جا به جایی تقویت کرده و عدد ناسلت را کاهش می دهد. از طرف دیگر، جا به جایی طبیعی نانوسیال می تواند بر ته نشینی و تجمعات نانوذرات نفوذ کند البته این اثر برای عدد رایلی کم تر از 10^6 قابل ملاحظه نمی باشد.

همچنین آنها به روش عددی نشان دادند نانوسیال با غلظت ۰/۶۴ درصد دارای عدد ناسلت متوسط کم تری در طول دیوار گرم می باشد که به دلیل افزایش ویسکوزیته ناشی از افزایش غلظت نانوذرات در محفظه بوده که نقش موثری در کاهش جا به جایی حرارتی دارد. در مطالعه حاضر، ابتدا برای آب و بدون افزودن ذرات نانو، معادلات جریان و انتقال حرارت به کمک روش عددی حجم محدود حل شده و نتایج آن با مطالعه تجربی هو و همکاران [۲۰] مقایسه شد. نانوسیال به عنوان سیالی تک فاز و هموژن به صورت پایدار اما با خواص متغیر (از جمله چگالی، هدایت حرارتی و ویسکوزیته) فرض می شود.

۲- خواص نانوسیال

تاکنون مطالعات زیادی در مورد ارزیابی خواص نانوسیالات برحسب سیال پایه و نانوذرات انجام و مدل‌های متعددی ارائه شده است. در مطالعه حاضر از نتایج آزمایشگاهی حاصل از اندازه گیری خواص ترموفیزیکی نانوسیال آلومینا-آب توسط هو و همکاران [۲۰] استفاده شده است. آنها کلیه خواص ترموفیزیکی شامل اندازه نانوذرات، ویسکوزیته دینامیکی، هدایت گرمایی و دانسیته را به صورت تابعی از دما و نیز کسر حجمی نانوذرات، به صورت آزمایشگاهی اندازه گیری کردند. همچنین گرمای ویژه موثر نانوسیال را بر پایه چگالی و گرمای ویژه نانوذرات آلومینا (۰/۷۶۵kJ/kgK) با فرض تعادل گرمایی بین نانوذرات و سیال پایه به صورت زیر تعیین کردند.

$$\rho_{nf}c_{p,nf} = c_v\rho_p c_{p,p} + (1 - c_v)\rho_{bf}c_{p,bf} \quad (1)$$

با استفاده از معادله (۱) ظرفیت گرمای ویژه (موثر) نانوسیال بر پایه آب در جدول (۱) و برای نسبت های حجمی (درصد حجمی) متفاوت نانوسیال مشخص شده است. دانسیته نقش بسیار مهمی در انتقال گرمای جا به جایی طبیعی دارد، زیرا منشا جا به جایی طبیعی، نیروی شناوری و گرادیان چگالی است که به صورت معادله (۲) تعریف می شود.

$$\rho_{nf} = c_v\rho_p + (1 - c_v)\rho_{bf} \quad (2)$$

با توجه به نتایج حاصل از هو و همکاران [۲۰] پراکندگی ذرات آلومینا در آب با افزایش نسبت ذرات، باعث کاهش ضریب انبساط حرارتی موثر می شود. در مطالعه حاضر نیز این ضریب به صورت معادله (۳) ارائه و در عدد رایلی نیز استفاده می گردد.

$$\rho_{nf}\beta_{nf} = (1-c_v)\rho_{bf}\beta_{bf} + c_v\rho_p\beta_p \quad (3)$$

مطابق نتایج تجربی هو و همکاران [۲۰] مشاهده می شود با افزایش دما برای غلظت های بالاتر، هدایت حرارتی تا حدودی خطی افزایش می یابد اما کمتر از مقادیر نشان داده شده در نتایج داس و همکاران [۲۱] می باشد که عامل این اختلاف می تواند ناشی از تغییر در سایز نانوذرات آلومینا و نحوه فرمولاسیون به کار رفته برای نانوسیال باشد. بنابراین مواردی دیگری چون شکل، اندازه، نوع و جنس نانوذرات عوامل موثر در تعیین دقت نتایج عددی داشته که برای نسبت حجمی های بالاتر از ۴ درصد از اهمیت بیشتری برخوردار خواهند بود که در این مطالعه برای نسبت حجمی تا ۴ درصد، مدل تک فاز به کار رفته است.

جدول ۱- ظرفیت گرمای ویژه محاسبه شده برای نانوسیال آلومینا-آب

۴	۲	۱	۰/۱	صفر (آب خالص)	C_p (درصد حجمی)
۲/۷۳۲	۳/۹۴۴	۴/۰۵۹	۴/۱۶۷	۴/۱۷۹	$C_{p,nf}$

در مطالعه حاضر برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیال از مدل میگا و انجین [۲۲] استفاده شده است که تابعی بر حسب نسبت حجمی نانوذرات می باشد، همچنین از مدل مکسول [۲۳] برای تعیین هدایت حرارتی نانوسیال استفاده می شود که تابعی از نسبت حجمی و هدایت حرارتی نانوذرات و سیال پایه می باشد. خواص ترموفیزیکی به کار رفته در مطالعه عددی حاضر برای سیال پایه و نانوذرات اکسید آلومینیوم (آلومینا) در دمای ۳۰۰ کلوین در جدول (۲) ارائه شده است [۲۰].

۳- تشریح مساله و فرضیات مربوطه

هدف از مطالعه حاضر بررسی عددی تاثیر ویژگی های متغیر نانوسیال، تغییر نسبت منظر محفظه و میزان کسر حجمی نانوذرات بر روی جا به جایی آزاد درون محفظه های با گرمایش جانبی است. جریان جا به جایی آزاد و انتقال حرارت ناشی از آن به پارامترهای زیادی از جمله ترموفورسیز، براونی و غیره بستگی دارد. در مطالعه حاضر سیستم دوفازی نانوذرات و سیال پایه به صورت یک فاز هموزن در نظر گرفته می شود. در واقع مبنای این مدل که مدل تک فازی نامیده می شود عدم تراکم پذیری شکل معادلات انتقال حرارت و جریان سیال مبنا در اثر وجود نانوذرات است. تحت این فرض هیچ لغزشی بین فاز پیوسته (سیال) و فاز پراکنده (ذرات معلق) وجود ندارد و تعادل حرارتی بین سیال و ذرات جامد برقرار است.

در این دیدگاه نانوسیال به صورت پیوسته و نیوتنی بوده و از کار تراکم و پراکندگی و تلفات لزجی در معادله انرژی چشم پوشی و هدایت گرمایی با قانون فوریه بیان می شود، و هیچ نیروی خارجی، منبع گرمایی، واکنش شیمیایی و انتقال گرمای تابشی در این مساله وجود ندارد (برای نانوذرات در محدوده صفر تا ۱۰۰ نانومتر، عدد نادسن نسبتاً کوچک است و فرض پیوستگی منطقی است). مدل های چند فازی با توجه به اینکه علاوه بر افزایش هدایت حرارتی نقش حرکات تصادفی (براونی) ذرات بسیار ریز و پراکندگی حرارتی را در فرآیند انتقال حرارت در نظر می گیرند، نسبت به مدل هموزن موفق خواهند بود ولی معادلات مربوط به مدل چندفازی از نظر حل بسیار مشکل بوده و برای کاربردهای عملی نانوسیال نیز مناسب نیستند [۲۴].

در مطالعه حاضر علاوه بر فرضیات در نظر گرفته شده برای مدل تک فاز برای نانوسیال، جریان نیز تراکم ناپذیر و پایدار در محدوده جریان آرام برای اعداد رایلی 10^5 تا 10^8 فرض شده است. شکل (۱) نمایی از یک محفظه با ارتفاع (H) و پهنا (L) می باشد. دیواره چپ محفظه گرم و دیوار راست، سرد بوده و به ترتیب با دمای ثابت ۳۰۵ و ۲۹۵ کلوین بوده و در تمامی مدل ها با نسبت منظرهای متفاوت محفظه اختلاف دما ثابت و برابر $\Delta T = 10^\circ C$ می باشد. دیوارهای دیگر عایق فرض می شوند. همچنین تمامی خواص ترموفیزیکی برای نانوسیال ها در دمای متوسط ۳۰۰ کلوین انتخاب شده اند.

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۲۰]

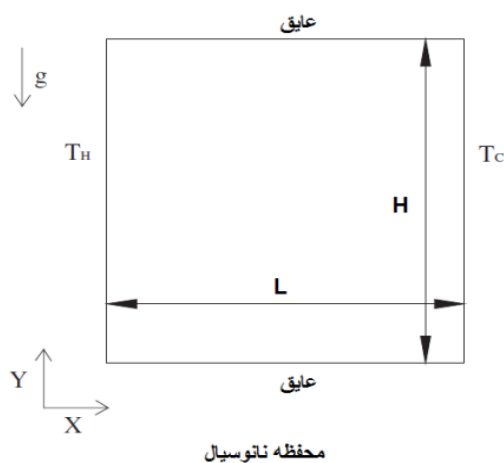
خواص ترموفیزیکی	آب	اکسید آلومینیوم (آلومینا)
c_p (J/kg. K)	۴۱۷۹	۷۶۵
ρ (kg/m ³)	۹۹۷/۸	۳۶۰۰
K (W/m. K)	۰/۵۹	۴۰
$\beta \times 10^{-6}$ (1/k)	۲۵۵	۸/۴۶
μ (Pa. s)	۰/۰۰۰۸۳	-

در این مطالعه نسبت منظر با AR نشان داده شدند و به صورت نسبت ارتفاع به پهنای ثابت (۲۵ میلی متر) تعریف می شود، و مساله برای ارتفاع های متفاوت محفظه ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۴۰ و ۶۰ میلی متر و نسبت منظرها به ترتیب ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۶ و ۳/۲ مدل شدند. نانوسیال مورد مطالعه، آلومینا به همراه آب خالص به عنوان سیال پایه می باشند که با غلظت های حجمی متفاوت ۰/۱، ۱، ۲ و ۴ درصد ارائه شدند.

۴- معادلات حاکم و شرایط مرزی

در این مطالعه نانوسیال با فرض تعادل گرمایی بین نانوذرات و سیال پایه به صورت همگن با شرط عدم لغزش به روش عددی مدل می شود. شتاب گرانش در جهت عمودی در نظر گرفته شده و ویژگی های ترموفیزیکی نانوسیال به جز چگالی ثابت بوده و تغییرات چگالی در ترم شناوری (بویانسی) معادله مومنوم، از تقریب بوزینسک پیروی می کند.

با استفاده از رابطه (۴) تقریب بوزینسک مطرح می شود. معادلات حاکم به روش حجم محدود حل شدند و نتایج برای توزیع دما، سرعت و عدد ناسلت متوسط با استفاده از نرم افزار دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت در محدوده اعداد رایلی 10^5 تا 10^8 حاصل شد. خواص ترموفیزیکی نانوسیال برای دمای متوسط ۳۰۰ کلوین بررسی شدند و محفظه با ابعاد مشخص به صورت دو بعدی بررسی شد.



شکل ۱- شماتیکی از مدل مساله

معادلات حاکم مطالعه یعنی پیوستگی، مومنتوم در جهت افقی، مومنتوم در جهت عمودی و انرژی، به ترتیب در معادلات (۵) تا (۸) برای جا به جایی طبیعی آرام در حالت پایدار با خواص متغیر مشخص شده است.

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \quad (۴)$$

$$\frac{\partial(\rho_{eff} u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_{eff} v)}{\partial y} = 0 \quad (۵)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{eff}} \left(-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{eff} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \right) \quad (۶)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{\rho_{eff}} \left(-\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{eff} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho_{eff} g \beta(T - T_0) \right) \quad (۷)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{eff} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۸)$$

در معادله انرژی (۸)، $\alpha_{eff} = k_{eff}/(\rho c_p)_{eff}$ ضریب پخش گرمایی است. زیرنویس eff مربوط به خواص موثر سیال مورد بررسی که ابتدا برای آب خالص جهت صحت سنجی نتایج با مدل تجربی حل شده و سپس برحسب غلظت (نسبت حجمی) نانوذرات برای نانوسیال مطرح می شوند. شرایط مرزی برای معادلات بقای فوق به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} x = L, \quad u = v = 0, \quad T = T_c \\ x = 0, \quad u = v = 0, \quad T = T_h \end{aligned} \quad (۹)$$

$$y = 0, \quad y = L, \quad u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

استخراج معادلات حاکم کوپل شده به صورت بدون بعد بر اساس کمیت های مرجع برای طول، سرعت، اختلاف دما به ترتیب از H (ارتفاع دیواره گرم)، $\frac{\alpha_f}{H}$ و $\Delta T = T_H - T_C$ حاصل می شوند. بنابراین متغیرهای بدون بعد (\hat{x} ، \hat{y}) به صورت زیر تعریف می شوند:

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{(x, y)}{H} \quad (۱۰)$$

$$(\hat{u}, \hat{v}) = \frac{(u, v)}{\alpha_{eff}/H} \quad (۱۱)$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{\Delta T} \quad (۱۲)$$

$$P^* = \frac{PH^2}{\rho_{eff} \alpha_{eff}^2} \quad (۱۳)$$

در مطالعه حاضر نسبت منظر محفظه به صورت $AR = \frac{H}{L}$ تعریف می شود. عدد رایلی در مکانیسم سیالات یک عدد بی بعد است که با جریان شناوری ارتباط دارد.

هنگامی که رایلی زیر نقطه بحرانی سیال باشد، انتقال حرارت عمدتاً به صورت هدایت و هنگامی که این عدد بالای نقطه بحرانی سیال باشد، انتقال حرارت به فرم جا به جایی است. در نهایت معادلات حاکم بی بعد بر مسئله دو بعدی و پس از آن پارامترهای بی بعد اعداد رایلی و پرانتل نیز به صورت زیر ارائه می شوند:

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} + \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{y}} = 0 \quad (14)$$

$$\hat{u} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{x}} + \hat{v} \frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{y}} = -\frac{\partial P^*}{\partial \hat{x}} + \frac{\mu_{eff}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \hat{y}^2} \right) \quad (15)$$

$$\hat{u} \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{x}} + \hat{v} \frac{\partial \hat{v}}{\partial \hat{y}} = -\frac{\partial P^*}{\partial \hat{y}} + \frac{\mu_{eff}}{\mu_f} \left(\frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 \hat{v}}{\partial \hat{y}^2} \right) + Gr \theta \quad (16)$$

$$\hat{u} \frac{\partial \theta}{\partial \hat{x}} + \hat{v} \frac{\partial \theta}{\partial \hat{y}} = \frac{1}{Pr} \frac{\alpha_{eff}}{\alpha_f} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial \hat{x}^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \hat{y}^2} \right) \quad (17)$$

$$Gr = \frac{Ra}{Pr} \quad (18)$$

$$Ra = \frac{g \beta_{eff} \Delta T H^3}{\nu_{eff} \alpha_{eff}} \quad (19)$$

$$Pr = \frac{\nu_{eff}}{\alpha_{eff}} \quad (20)$$

پس از همگرایی حل، شار گرمایی سطح از دیوار گرم با استفاده از انتگرال سطح محاسبه می شود. با داشتن شار حرارتی از سطح گرم q''_h مطابق معادله (۲۱)، ضریب انتقال حرارت متوسط سطح $h_{ave,nf}$ بر مبنای اختلاف درجه حرارت بین دیوارهای گرم و سرد به صورت معادله (۲۲) تعریف می شود.

$$q''_h = -K_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (21)$$

$$h_{ave,nf} = q''_h / (T_h - T_c) \quad (22)$$

با داشتن $h_{ave,nf}$ می توان عدد بی بعد ناسلت که نسبت انتقال حرارت جا به جایی به هدایت را بیان می کند به صورت زیر تعریف کرد:

$$\overline{Nu}_{nf} \equiv Nu_{ave,nf} = h_{ave,nf} H / K_{nf} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، h_{ave} به کمک رابطه زیر محاسبه می شود.

$$h_{ave} = \frac{1}{H} \int_0^H h dy \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)، h از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$h = (-k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x_{x=0}}) / \Delta T \quad (25)$$

همچنین عدد ناسلت متوسط نانوسیال نسبت به آب خالص با عنوان عدد ناسلت متوسط بی بعد به صورت زیر تعریف می شود:

$$\overline{Nu}^* = \frac{\overline{Nu}_{nf}}{\overline{Nu}_{bf}} \quad (26)$$

علاوه بر این، براساس اختلاف دما در دیوارهای گرم و سرد و طول مشخصه H محفظه مستطیلی، عدد بی بعد رایلی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$Ra_{nf} = \frac{g\rho_{nf}^2 c_{p,nf} \beta_{nf} (T_h - T_c) H^3}{k_{nf} \mu_{nf}} \quad (27)$$

در مطالعه حاضر دمای متوسط میان دیوار سرد و گرم معادل ۳۰۰ کلوین به صورت معادله (۲۸) بدست می آید و خواص ترموفیزیکی نانوسیال نیز در این دما محاسبه می شوند.

$$T_{ave} = (T_h + T_c)/2 \quad (28)$$

در مطالعه عددی حاضر، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال برحسب غلظت و خواص سیال پایه و نانوذرات، از مدل مکسول [۲۳] و همچنین ویسکوزیته برحسب غلظت نانوذرات از مدل میگا و انجین [۲۲] مطابق معادله های (۲۹) و (۳۰) محاسبه شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = 1 + \frac{3(k_p/k_{bf}-1)c_v}{(k_p/k_{bf}+2)-(k_p/k_{bf}-1)c_v} \quad (29)$$

$$\mu_{nf}/\mu_{bf} = 1 + 7.3c_v + 123c_v^2 \quad (30)$$

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی انتقال حرارت جا به جایی طبیعی نانوسیال ناشی از تغییر در غلظت نانوسیال و نیز تغییر در نسبت منظر محفظه می باشد. با توجه به مقادیر عدد رایلی حاصل از هر مدل برحسب مشخصه های نانوسیال و نیز هندسه محفظه با اختلاف دمای ثابت (۱۰°C) برای دیوار گرم و سرد، در محدوده ۱۰^۵ تا ۱۰^۸، عدد ناسلت متوسط بدست می آید.

۵- حل عددی

شبیه سازی های برای تمامی مدل های محفظه به صورت عددی و به کمک نرم افزار فلونت انجام شده است. فلونت با استفاده از روش حجم محدود معادلات حاکم را گسسته می کند. مدل آرام برای شبیه سازی جا به جایی طبیعی در محفظه استفاده شده است. جهت همگرایی مدل ها، الگوریتم سیمپل برای حل همزمان سرعت- فشار و استاندارد برای فشار انتخاب گردیده است و برای گسسته سازی معادلات مومنوم و انرژی از طرح مرتبه دوم بالادست استفاده شده است. همچنین حل دائم و مستقل از زمان برای همه شبیه سازی ها در نظر گرفته می شود. معیار همگرایی برای حل معادلات وقتی که همه باقیمانده ها از مقدار ۱۰^{-۶} کم تر شوند لحاظ شده است.

۵-۱- بررسی استقلال شبکه

بر اساس آزمایشات عددی مشخص شد که حل مساله حساسیت زیادی به تعداد نقاط شبکه دارد و همچنین گردابه های کوچک در نزدیکی دیوارها وجود دارد، لذا انتخاب تعداد نقاط و ضریب انبساط شبکه اهمیت زیادی دارد. چندین ضریب انبساط شبکه مورد آزمایش قرار گرفته و ضریب انبساط $1/12$ در راستای افقی و $1/05$ در راستای عمودی انتخاب گردید. عدد ناسلت متوسط برای شبکه های مختلف با تعداد نقاط 100×100 تا 200×200 در جدول (۳) مقایسه شده است. عدد ناسلت متوسط برای اختلاف دمای ثابت 10°C برای همه شبکه بندی ها ارائه شده است. همان طور که از جدول (۳) مشخص است عدد ناسلت از شبکه 171×171 تا 200×200 تغییر قابل ملاحظه ندارد. با توجه به اینکه دقت نتایج قابل قبول و زمان محاسباتی کم تر مدنظر است، بنابراین شبکه 171×171 برای محاسبات مربوطه انتخاب می شود.

۵-۲- صحت سنجی

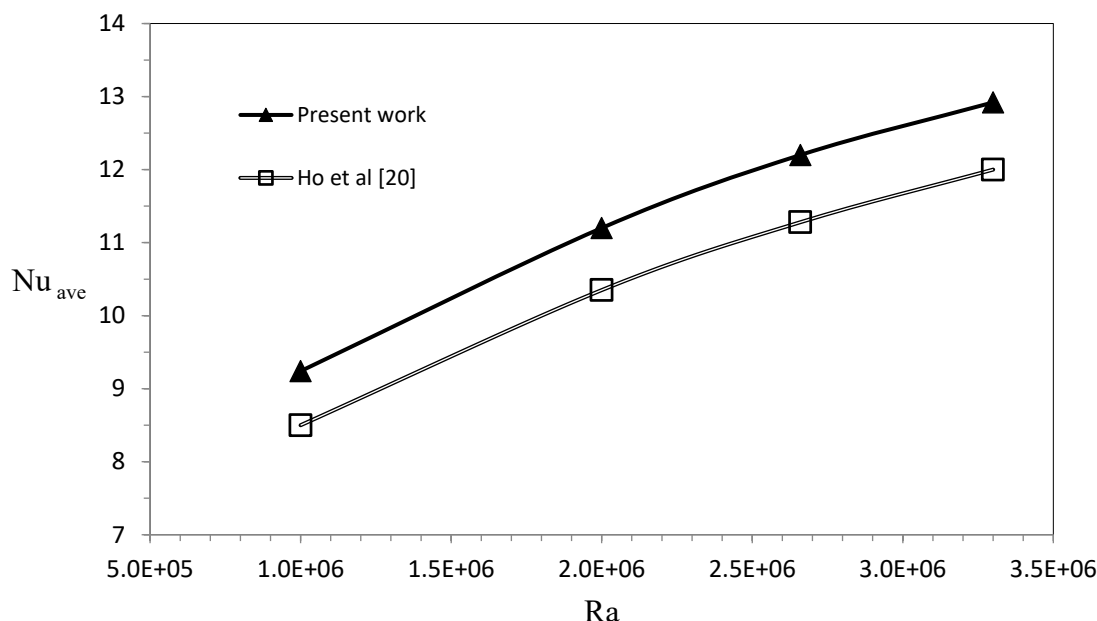
در شکل (۲) عدد ناسلت حاصل از مطالعه حاضر برای اعداد رایلی مختلف با داده های تجربی هو و همکاران [۲۰] برای آب خالص در محفظه با ابعاد 25×25 (میلی متر) و نسبت منظر ۱ مقایسه شده است. همانطور که در شکل (۲) مشخص است اختلاف در حدود $7/6$ تا $8/6$ درصد است. بنابراین نتایج قابل قبول می باشد. از لحاظ آزمایشگاهی به خصوص برای غلظت بالاتر به واسطه تشکیل شبکه ای از نانوذرات، هدایت حرارتی افزایش می یابد [۱۹]، البته مدل مکسول (رابطه ۲۹) نیز این روند افزایش هدایت حرارتی را پیش بینی می کند اما در مقادیر کم تر از نتایج تجربی، چون در مدل عددی حاضر فرض هموزن نانوسیال حاکم بوده و اثر ته نشینی ناچیز فرض شده است، به همین دلیل عدد ناسلت متوسط در مطالعه حاضر نسبت به مقادیر تجربی هو و همکاران [۲۰] بیش تر بدست آمد.

۶- نتایج و بحث

تغییرات عدد ناسلت متوسط نانوسیال آلومینا-آب برای محفظه های با نسبت منظر $0/6$ تا $3/2$ و کسر حجم های صفر تا ۴ درصد بر حسب عدد رایلی در شکل (۳) نشان داده شده است. همان طور که مشخص است عدد ناسلت متوسط با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در محفظه در هر نسبت منظر مشخص، روند کاهشی دارد. از طرفی محفظه هایی با نسبت منظرهای بزرگتر دارای ناسلت بیشتری است.

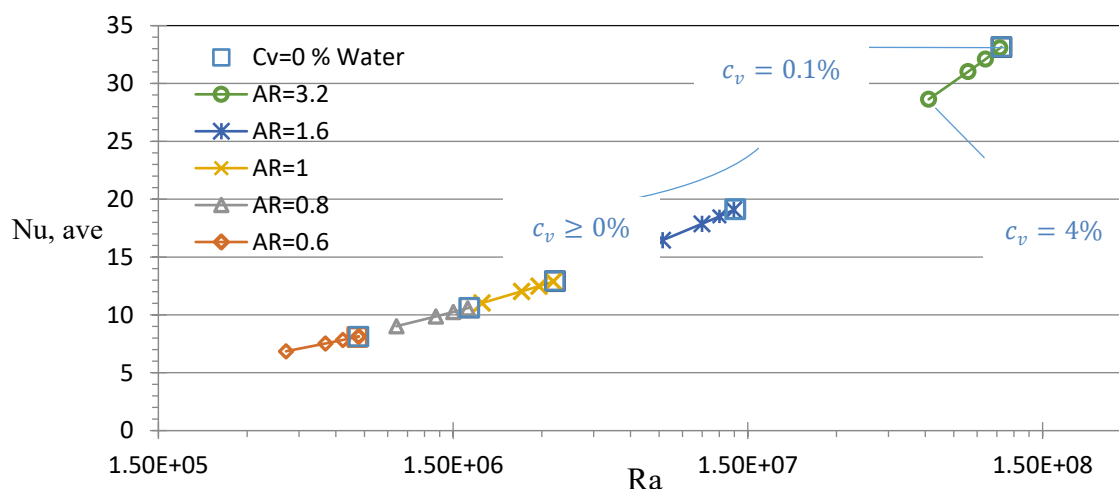
جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت متوسط برای شبکه های مختلف

تعداد شبکه	اندازه هر شبکه (میلی متر)	عدد ناسلت متوسط
100×100	$0/25$	$13/11$
125×125	$0/2$	$13/01$
171×171	$0/147$	$12/92$
200×200	$0/125$	$12/9$

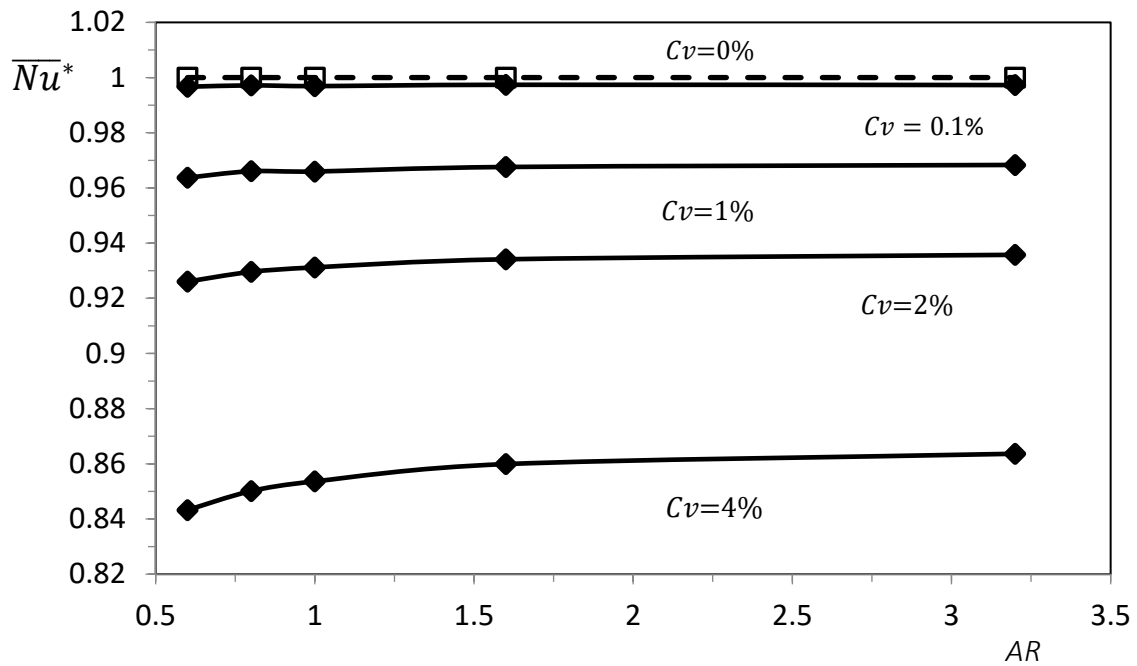


شکل ۲- مقایسه نتایج عددی مطالعه حاضر با نتایج تجربی هو و همکاران [۲۰] برای آب خالص با نسبت منظر یک

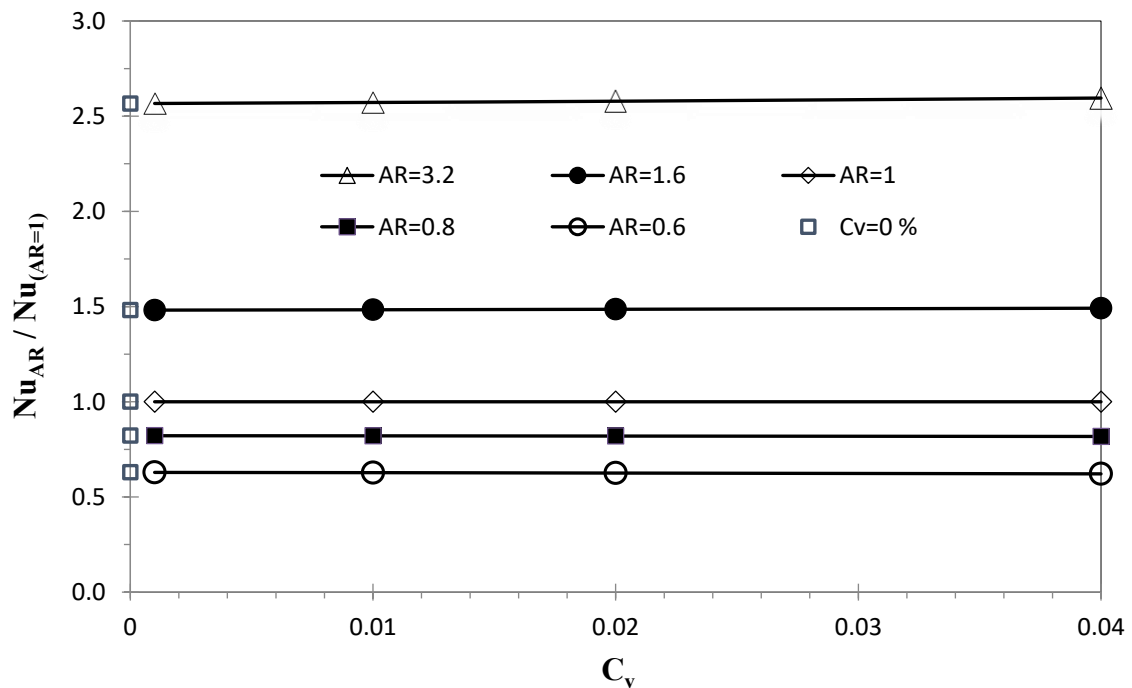
نتایج نشان می دهد با توجه به مدل های استفاده شده برای ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، نانوسیال با غلظت های بیشتر، به دلیل هدایت حرارتی و نیز ویسکوزیته بالاتر نسبت به آب خالص، عدد ناسلت نانوسیال آلومینا-آب کاهش می یابد. به عبارتی در هر نسبت منظر مشخص، در کم ترین غلظت معادل ۰/۳ درصد کاهش و در بیش ترین غلظت نیز به طور متوسط ۱۴ درصد کاهش می یابد که در شکل (۴) نیز با توجه به توضیحات فوق این روند کاهش عدد ناسلت در هر نسبت منظر، ثابت می باشد. عدد ناسلت متوسط هر محفظه نسبت به عدد ناسلت برای نسبت حجمی برابر یک، به ازای نسبت حجمی (غلظت) نانوسیال آلومینا در شکل (۵) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش کسر حجمی برای یک نسبت منظر ثابت این نسبت تقریباً ثابت می باشد و برای تمامی کسرهای حجمی با افزایش نسبت منظر از ۰/۶ تا ۳/۲ مقدار این نسبت نیز معادل ۰/۶۲ تا ۲/۶ تغییر می کند.



شکل ۳- عدد ناسلت متوسط نانوسیال آلومینا-آب برای محفظه های با نسبت منظر و کسر حجمی متفاوت (صفر تا ۴ درصد) در هر محفظه با نسبت منظر ثابت

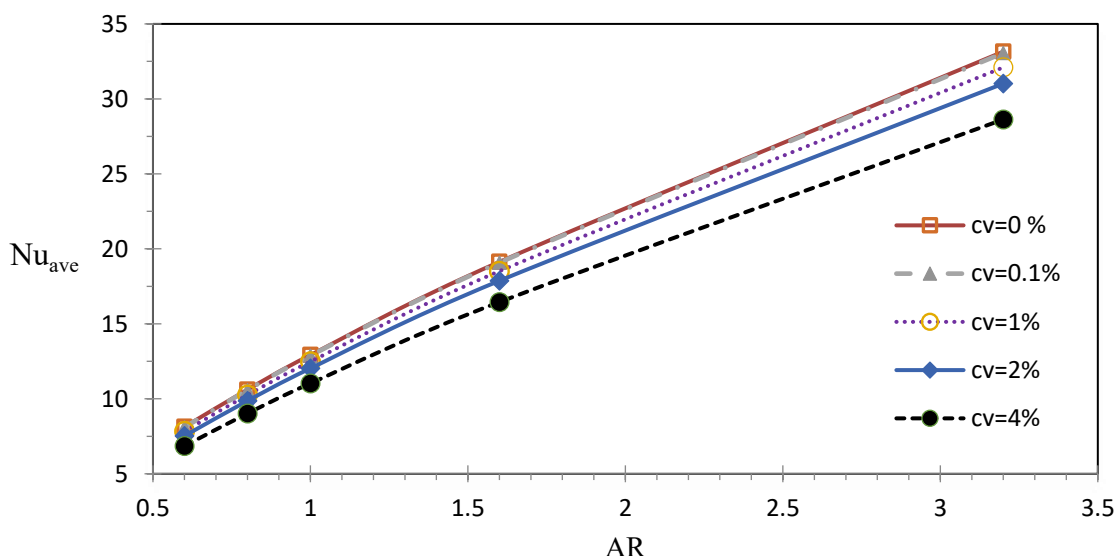


شکل ۴- عدد ناسلت بی بعد آلومینا- آب به ازای نسبت منظر و کسر حجمی متفاوت



شکل ۵- اثر نسبت منظر محفظه بر عدد ناسلت متوسط هر محفظه در مقایسه با نسبت حجمی یک،

به ازای نسبت حجمی نانوسیال آلومینا



شکل ۶- عدد ناسلت نانوسیال آلومینا- آب بر حسب ضریب منظر محفظه به ازای غلظت ثابت آلومینا از صفر تا ۴ درصد.

شکل (۶) نشان می دهد که در تمامی غلظت ها با افزایش نسبت منظر عدد رایلی و نهایتاً ناسلت روند افزایشی دارند اما افزایش غلظت به ازای نسبت منظر ثابت منجر به کاهش عدد ناسلت متوسط می شود. با افزایش غلظت در یک نسبت منظر ثابت، به دلیل افزایش ویسکوزیته نانوسیال و کاهش عدد رایلی، عدد ناسلت به مقادیر کم تری می رسد. اما در یک غلظت ثابت با افزایش نسبت منظر محفظه، عدد ناسلت روند افزایشی متناسب با میزان نسبت منظر خواهد داشت، از طرفی به دلیل افزایش عدد رایلی و کاهش شار حرارتی (با توجه به اختلاف دمای ثابت دیوارها)، در نهایت باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابه جایی طبیعی نسبت به آب خالص (در بیشترین غلظت تا حدود ۲۰ درصد افت) می شود و منجر به کاهش عدد ناسلت به مقادیر پایین تر می شود اما هم چنان با روند افزایشی عدد ناسلت همراه می باشد. بنابراین نسبت منظر موثرترین عامل در افزایش عدد ناسلت می باشد. در نتیجه مشخص شد در یک غلظت ثابت و مشخص، عدد ناسلت، در مقایسه با ضریب انتقال حرارت جا به جایی، به نسبت منظر محفظه وابسته تر می باشد و نهایتاً با افزایش نسبت منظر عدد ناسلت نیز روند افزایشی خواهد داشت و تحت تاثیر بیش تری قرار می گیرد.

۷- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر تاثیر نسبت منظر و غلظت نانوسیال آلومینا- آب بر جا به جایی طبیعی درون محفظه مربع بررسی گردید. محدوده عدد رایلی در 4×10^5 تا 1×10^8 است و نسبت منظر به ترتیب 0.6 ، 1 و $3/2$ در نظر گرفته شد. همچنین کسر حجمی نانو سیال آلومینا در سیال پایه آب خالص، صفر تا ۴ درصد است. نتایج حاصل به شرح زیر می باشد.

- در این مطالعه برای نسبت حجمی بالاتر، عدد رایلی و البته عدد ناسلت متوسط، حساسیت بیش تری به ویسکوزیته نانوسیال در مقایسه با هدایت حرارتی داشتند. به دلیل اینکه ضریب هدایت حرارتی حاصل از

- مدل مکسول دارای مقادیر کم تری نسبت به مقادیر تجربی بوده و اثر کم تری در کاهش جا به جایی و عدد ناسلت داشت، در مقابل ویسکوزیته نانوسیال اثر بیش تری در کاهش سرعت جریان دارد.
- به عبارت دیگر هدایت حرارتی، کم تر باعث کاهش نیروی شناوری شده و انرژی جنبشی نانوسیال را کاهش می دهد ولی ویسکوزیته با افزایش غلظت نانوسیال بیش تر به کاهش جا به جایی طبیعی منجر می شود.
 - با افزایش غلظت در یک نسبت منظر ثابت، به دلیل افزایش ویسکوزیته نانوسیال و کاهش عدد رایلی، عدد ناسلت به مقادیر کم تری می رسد. اما در یک غلظت ثابت با افزایش نسبت منظر محفظه، عدد ناسلت روند افزایشی متناسب با میزان نسبت منظر خواهد داشت.
 - در یک غلظت ثابت و مشخص، عدد ناسلت، در مقایسه با ضریب انتقال حرارت جا به جایی، به نسبت منظر محفظه وابسته تر می باشد و نهایتاً با افزایش نسبت منظر عدد ناسلت نیز روند افزایشی خواهد داشت و تحت تاثیر بیش تری قرار می گیرد.
 - در مطالعه حاضر برای نسبت حجمی تا ۴ درصد می توان جواب قابل قبولی از مدل تک فاز به دست آورد و در صورتی که نسبت حجمی بیشتر شود بایستی پارامترهای دیگری چون جنس، شکل، نوع و اندازه نانوذرات در مدل عددی لحاظ شده تا روابط و خواص ترموفیزیکی نانوسیال اصلاح و به مدل واقعی و تجربی نزدیک تر شود. بنابراین مدل های ریاضی برای بیان خواص موثر نانوسیال به ویژه هدایت حرارتی موثر نانوسیال، نقش مهمی در تعیین میزان دقت نتایج عددی ایفا می کنند.

سپاسگزاری

لازم است از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی و همچنین شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی ایران که با مساعدت آنها این مقاله تهیه گردید، قدردانی و تشکر گردد.

مراجع

- [1] Incropera, F. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons, (2011).
- [2] Ostrach, S., "Natural Convection in Enclosures", Journal of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 1175-1190, (1988).
- [3] Nsofor, C., "Recent Patents on Nano Fluids (Nanoparticles in Liquids) Heat Transfer", Recent Patents on Mechanical Engineering, Vol. 1, pp. 190-197, (2008).
- [4] Wang, X. Q., and Mujumdar, A. S., "A Review on Nano Fluids-Part II: Experiments and Applications", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 25, pp. 631-648, (2008).
- [5] Sparker, J., "A Critical Review on Convective Heat Transfer Correlations of Nano Fluids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 15, pp. 3271-3277, (2011).

- [6] Nie, X. B., Chen, S. Y., and Robbins, M. O., "A Continuum and Molecular Dynamics Hybrid Method for Micro and Nano Fluid Flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 500, pp. 55-64, (2004).
- [7] Cui, W., Shen, Z., Yang, J., and Wu, S., "Effect of Chaotic Movements of Nanoparticles for Nano Fluid Heat Transfer Augmentation by Molecular Dynamics Simulation", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 76, pp. 261-271, (2015).
- [8] Xuan, Y., and Yao, Z., "Lattice Boltzmann Model for Nano Fluids, Heat and Mass Transfer", Vol. 41, pp. 199-205, (2005).
- [9] Lai, F. H., and Yang, Y. T., "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection Heat Transfer of Al₂O₃/Water Nano Fluids in a Square Enclosure", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1930-1941, (2011).
- [10] Kamyar, A., Saidur, R., and Hasanuzzaman, M., "Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nano Fluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 4104-4115, (2012).
- [11] Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M., "Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure Utilizing Nano Fluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 3639-3653, (2003).
- [12] Oztop, H. F., and Abu-Nada, E., "Numerical Study of Natural Convection in Partially Heated Rectangular Enclosures Filled with Nano Fluids", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 29, pp. 1326-1336, (2008).
- [13] Aminossadati, S. M., and Ghasemi, B., "Natural Convection Cooling of a Localised Heat Source at the Bottom of a Nano Fluid-filled Enclosure", *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 28, pp. 630- 640, (2009).
- [14] Oueslati, F. S., and Bennacer, R., "Heterogeneous Nano Fluids: Natural Convection Heat Transfer Enhancement", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 6, pp. 1-11, (2011).
- [15] Drzazga, M., Lemanowicz, M., Dzido, G., and Gierczycki, A., "Preparation of Metal Oxide-water Nano Fluids by Two-step Method, *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*", Vol. 51, pp. 213-215, (2012).
- [16] Liu, L., Wang, M., and Liu, Y., "Experimental Investigation on Preparation and Stability of Al₂O₃/CuO-Water Nano Fluids", *2015 Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference*, Atlantis Press, Zhuhai, China, (2015).
- [17] Haddad, Z., Abid, C., Oztop, H. F., and Mataoui, A., "A Review on How the Researchers Prepare their Nano Fluids", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 76, pp. 168-189, (2014).
- [18] Vahl Davis, G. de, "Natural Convection of Air in a Square Cavity: a Bench Mark Numerical Solution", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 3, pp. 249-264, (1983).

- [19] Meng, Xi., Zhang, Xi., and Li, Qian, "Numerical Investigation of Nano Fluid Natural Convection Coupling with Nanoparticles Sedimentation", Applied Thermal Engineering, Vol. 95, pp. 411-420, (2015).
- [20] Ho, C. J., Liu, W. K., Chang, Y. S., and Lin, C. C., "Natural Convection Heat Transfer of Alumina-water Nano Fluid in Vertical Square Enclosures: An Experimental Study", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, pp. 1345-1353, (2010).
- [21] Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., and Roetzel, W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nano Fluids", ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 125, pp. 567-574, (2003).
- [22] Maïga, S. E. B., and Nguyen, C.T., "Heat Transfer Behaviors of Nano Fluids in a Uniformly Heated Tube", Super Lattices and Micro Structures, Vol. 35, pp. 543-557, (2004).
- [23] Maxwell, J. C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", Oxford University Press, Cambridge, Vol. 2, pp. 435-441, (1904).

[۲۴] گودرزی، وحید، "بررسی عددی تاثیر ویژگی های متغیر نانوسیال روی جا به جایی آزاد در محفظه ها"، ص ۲۰-۳۰، (۱۳۹۰).

فهرست نمادهای انگلیسی

نسبت منظر محفظه	: AR
ظرفیت گرمای ویژه	: $c_p (kj/kg K)$
نسبت حجمی نانوذرات	: c_v
شتاب گرانشی	: $(m/s^2)g$
ضریب انتقال حرارت متوسط سطح	: $h_{ave} (W/m^2K)$
ارتفاع محفظه	: $H(m)$
هدایت حرارتی	: $k (W/m k)$
عرض محفظه	: $L(m)$
عدد ناسلت متوسط	: $Nu_{ave} = \bar{Nu}$
شار حرارتی متوسط از دیوار گرم	: $q''_{h,ave} (W/m^2)$
عدد رایلی نانوسیال	: Ra_{nf}
دما	: $T(^{\circ}C)$

زیرنویس

کمیت سیال پایه	: bf
کمیت دیوار سرد	: c

کمیت دیوار گرم	: h
کمیت نانوسیال	: nf
کمیت سیال	: f
کمیت نانوذرات	: p
کمیت موثر	: eff
شرایط مرجع	: 0

نمادهای یونانی

نفوذ حرارتی	: $\alpha(m^2/s)$
ضریب انبساط حرارتی حجمی	: $\beta(1/K)$
ویسکوزیته سینماتیکی	: $\vartheta(m^2/s)$
ویسکوزیته دینامیکی	: $\mu(pa.s)$
چگالی	: $\rho(kg/m^3)$

Abstract

In this study, the variation of aspect ratio (height to width) and nanoparticles volume fractions of on natural convection heat transfer of Alumina-water nanofluid in enclosures was investigated. It is supposed that the nanofluid are applied as incompressible fluid and single phase base on water (as basefluid) include Alumina (Al_2O_3), with volume fraction (concentration) 0 -4%, under laminar flow. Governing equations were solved numerically by finite volume method (Fluent). Rayleigh number is in the range of $4 \times 10^5 - 10^8$ in 2D enclosures with specific aspect ratios (0.6-3.2) and temperature difference (ΔT).

In the present work with due attention to the used models for the viscosity and the nanofluid coefficient of thermal conduction was showed that the Nusselt number of the nanofluid with more concentration, is increasing due to more viscosity and coefficient of thermal conduction rather than pure water. In other words the Nusselt number in every specific aspect ratio, in minimum of concentration equals 0.3% and in maximum of concentration equals 14% would be decreased. In a specific concentration, The Nusselt number was more related with aspect ratio rather than the coefficient of natural convection heat transfer and thermal conduction.