

تأثیر نانوسیال در انتقال حرارت جابجایی مخلوط در محفظه تهویه شده با گرمایش موضعی

جریان و انتقال حرارت جابجایی مخلوط دو نوع نانوسیال متفاوت (آب-آلومینا و آب-اکسید مس) در یک محفظه تهویه شده با گرمایش موضعی به روش عددی حجم محدود برای سه موقعیت مختلف بررسی و نتایج به صورت خطوط جریان، دما ثابت و اعداد ناسلت متوسط ارائه خواهد شد. سیال ورودی دردمای سرد، دیواره‌ها به همراه درگاه خروجی در شرایط بی‌دررو هستند. اندازه ذرات ۳۳ نانومتر و بررسی‌ها در دمای محیط انجام می‌گیرد. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از: شدت سیال ورودی ($100 \leq Re \leq 500$)، اثرات عدد رایلی ($10^3 \leq Ra \leq 10^5$)، غلظت نانوسیال ($0.5 \leq \Phi \leq 5$). نتایج عددی نشان می‌دهد که به عنوان مثال در موقعیت اول، در رینولدز ۱۰۰ و رایلی 10^3 در حالت آب خالص، ناسلت متوسط برابر $7/31$ و در غلظت 0.3 به عدد $1/61$ رسیده است که $17/78\%$ افزایش ناسلت خواهیم داشت. به طور کلی افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش ناسلت جریان و انتقال حرارت می‌شود. نوع نانوسیال نیز در میزان انتقال حرارت مؤثر می‌باشد.

علیرضا شیبانی^۱

کارشناسی ارشد

سیدامیرعباس علومی^۲

استادیار

واژه های راهنما: حل عددی، جابجایی مخلوط، نانوسیال، محفظه، عدد ناسلت متوسط، گرمایش موضعی

۱- مقدمه

به مخلوطی از ذرات نانو فلزی یا غیر فلزی که در یک سیال پایه معلق شده باشند، نانو سیال اطلاق می‌شود. با توجه به نوع سیال پایه مورد استفاده (آلی یا غیرآلی) و همچنین نوع نانوذرات مورد نظر، انواع مختلفی از نانوسیال‌ها به وجود می‌آیند که می‌توان به نانوسیال‌های استخراجی، زیست محیطی، زیستی و دارویی اشاره کرد. نانوسیال‌ها جنبه‌های ویژه‌ای دارند که آنها را کاملاً از مخلوط سیالات دو فاز که در آنها ذرات در ابعاد میکرو یا میلی‌متر هستند، متمایز می‌کنند. [۱] ذرات معلق فوق ریز، خواص انتقالی و عملکرد انتقال حرارت نانوسیال‌ها را تغییر می‌دهد، به طوری که پتانسیل بالایی در بهبود انتقال حرارت نشان می‌دهند. [۲] مهم‌ترین اثر مشاهده شده در نانوسیال‌ها افزایش قابل توجه هدایت گرمایی بوده است. به طوریکه این افزایش قابل توجه حتی در غلظت‌های پایین نانوسیال نیز مشاهده می‌شود. غلظت پایین نانوسیال باعث می‌شود که سیال رفتار نیوتنی خود را حفظ کند.

^۱ کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

Alireza.sheibani65@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران Amiroloomi@iauyazd.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۰۸، تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۲/۱۵

به علاوه نانوسیال ها پایداری بالاتری از خود نشان می دهند. مهم ترین کاربرد نانوسیال ها به عنوان خنک کننده است. سه فاکتوری که باعث می شود تا نانوسیال ها خنک کننده های مناسبی باشند عبارتند از: بالا بودن هدایت حرارتی، بالا بودن انتقال حرارت در یک فاز و بالا بودن شار حرارتی بحرانی [۱].

در طی سال ها، از سیالات متداولی نظیر آب یا روغن به عنوان سیال عامل انتقال حرارت، در سیستم های صنعتی استفاده می شد. مشکل عمده ای این نوع سیالات، رسانش حرارتی کم آنها می باشد که منجر به پایین ماندن نرخ انتقال حرارت آنها می گردد. یکی از روش های جدید که امروزه برای افزایش رسانش حرارتی این قبیل سیالات و در نتیجه، افزایش نرخ انتقال حرارت، مورد استفاده قرار می گیرد، افزودن ذرات درسایز نانو به سیال است، به طوری که انتقال حرارت نانوسیال در درون محفظه ها و تاثیر خصوصیات ترموفیزیکی آنها از قبیل رسانش حرارتی، لزجت دینامیکی و ضریب انبساط حرارتی آنها مورد بحث و بررسی زیادی قرار گرفته است. در سالیان اخیر با توجه به ضرورت استفاده از نانوسیالات بالاخص در زمینه بهبود انتقال حرارت، استفاده از نانوسیالات درون محفظه ها نیز رایج گردیده و تاثیرات درصد های حجمی نانوسیال در میزان انتقال حرارت و تغییر در خطوط جریان و دما، به عنوان یکی از پارامترهای مهم مورد مطالعه قرار گرفته که می توان به موارد ذیل اشاره نمود:

خانافر و همکاران [۳] به مطالعه عددی بر روی جابجایی طبیعی در یک محفظه دوبعدی پر شده از نانوسیال آب/مس پرداختند، سمت چپ و راست محفظه به ترتیب دارای دمای کم و زیاد بود و سطح فوقانی و زیرین آن عایق فرض شد، نتایج نشان می دهد که در یک گراشف معین، نرخ انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می یابد. جو و تزنگ [۴] با مطالعه عددی جابجایی آزاد نانوسیال در محفظه های مستطیل شکل نشان دادند که افزایش نیروی شناوری و کسر حجمی نانوذرات، هردو بر افزایش نرخ انتقال گرما درون محفظه کمک می کنند. شیخ زاده و محمودی [۵] جابه جایی طبیعی به وجود آمده از دو و سه جفت جزء سرد و گرم قرار گرفته بر روی دیواره های محفظه مربعی پر شده از نانو سیال آب-نقره را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که انتقال گرما با تعداد گردابه ها درون محفظه افزایش می یابد. جابجایی ترکیبی در یک محفظه ی مربعی شیب دار که با نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم پر شده بود، توسط ابوندا و چامخا [۶] مورد مطالعه ی عددی قرار گرفت، آن ها مشاهده کردند که در حضور نانوذرات انتقال حرارت درون محفظه به صورت چشمگیری بهبود می یابد.

در یک مطالعه پژوهشی دیگر، شاهی و همکاران [۷] به بررسی جابجایی ترکیبی نانوسیال در محفظه ی مورد تهویه که یک چشمه ی حرارتی بر روی دیوار افقی پایین نصب شده است، پرداخته اند. آن ها بهبود انتقال حرارت در اثر استفاده از نانوسیال در محفظه را برای اعداد گراشف متفاوت گزارش کردند. سعدالدین و همکاران [۸] در یک شبیه سازی عددی و استفاده از فرمولاسیون خواص متغیر برای نانو سیالات، جریان و انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون رادیاتور اتومبیل پر شده از نانو سیال را مورد بررسی قرار داده اند. نتایج این بررسی نشان می دهد با افزایش کسر حجمی نانوذرات و کاهش عدد ریچاردسون، انتقال حرارت درون محفظه افزایش می یابد.

هوانگ و همکاران [۹] به مطالعه انتقال حرارت در یک محفظه مستطیلی پر شده از نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم به صورت عددی پرداختند. آن‌ها از مدل‌های مختلفی برای ارزیابی ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال استفاده کردند.

سانترا و همکاران [۱۰] مسئله جابه‌جایی آزاد در یک حفره حاوی نانوسیال را با فرض رفتار غیر نیوتنی نانوسیال به روش عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌داد که در برخی اعداد رایلی خاص، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، نرخ انتقال گرما کاهش می‌یابد و در محدوده دیگری از اعداد رایلی با افزایش کسر حجمی نانوذرات، نرخ انتقال گرما افزایش می‌یابد. اوگوت [۱۱] به بررسی این مسئله در یک حفره با دیواره عمودی سرد دما ثابت و یک جزء سرد شار ثابت روی دیواره عمودی مقابل پرداخت. وی نشان داد که اندازه جزء سرد و زاویه محفظه، پارامترهای کنترل کننده نرخ انتقال گرما هستند.

علیزاده [۱۲] به بررسی جریان و انتقال حرارت نانوسیال درون محفظه‌ی مورد تهویه که در آن یک جسم داخلی تولید حرارت می‌کند، به صورت عددی و روش حجم محدود پرداخته است. تحلیل مربوط به نانوسیال از طریق روش تک فاز انجام شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد مقدار افزایش و یا کاهش ناسلت به موقعیت منبع حرارتی در محفظه وابسته است. همچنین در صورت قرار دادن منبع حرارتی در ورود-خروج محفظه به ازای همه مقادیر عدد رینولدز و گراشف، افزایش غلظت نانوسیال، موجب افزایش انتقال حرارت و عدد ناسلت چشمه حرارتی می‌گردد.

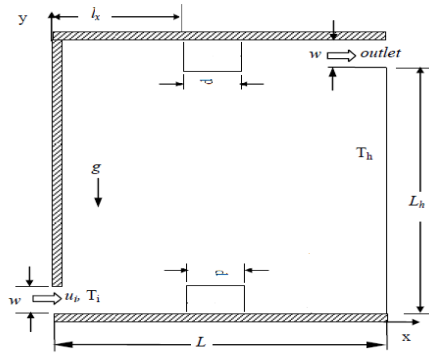
۲- هندسه مسئله و شکل بندی

در شکل (۱) شماتیک هندسه مورد مطالعه در این تحقیق، نمایش داده شده است. در این محفظه دو نوع نانوسیال متفاوت (آب-آلومینا و آب-اکسید مس) در جریان آرام و به صورت جداگانه شبیه سازی شده اند. اندازه‌ی ذرات ۳۳ نانومتر و بررسی دردمای محیط انجام می‌گیرد. هدف، بررسی سه موقعیت می‌باشد. موقعیت اول، موانع جریان در موقعیت مکانی $(Ix, 0, 25)$ ، موقعیت دوم، موانع جریان در موقعیت مکانی (Ix) و $(0, 45)$ و موقعیت سوم، موانع جریان در موقعیت مکانی $(Ix, 0, 65)$ می‌باشد. طول و عرض مانع‌ها $0, 1$ طول و عرض محفظه بوده اندازه‌ی ورودی و خروجی محفظه برابر $0, 1$ ارتفاع محفظه فرض شده است.

طول دیواره گرم سمت راست $0, 9$ طول محفظه و سیال ورودی در دمای سرد فرض شده است و بقیه‌ی دیواره‌ها به همراه درگاه خروجی در شرایط بی‌دررو هستند. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از: شدت سیال ورودی $(100 \leq Re \leq 500)$ ، شار حرارتی (عدد رایلی $(10^3 \leq Ra \leq 10^5)$ ، غلظت نانوسیال $(0 \leq \Phi \leq 0, 05)$).

در زمینه انتقال حرارت به صورت جابجایی برای نانوسیال در داخل حفره ای که دارای گرمایش موضعی باشد، با متغیرهای مورد بررسی و در نظر گرفتن مانع جریان، تحقیق مشابهی صورت نگرفته است.

در این تحقیق، سعی شده که با آنالیز هرکدام از پارامترهای موثر نانوسیالات بر روی انتقال حرارت، گام موثری برای انتخاب مناسب‌ترین نانوسیال با توجه به شرایط مورد نظر و بیشترین بازده باشد.



شکل ۱- هندسه مسئله

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات

نوع ماده	$C_p (J/Kg.K)$	$\rho (gK/m^3)$	$K (W/m.K)$	$\beta \times 10^5 (1/K)$
آب	۴۱۷۹	۹۹۷٫۱	۰٫۶۱۳	۲۱
آلومینا (Al_2O_3)	۷۶۵	۳۹۷۰	۴۰	۰٫۸۵
اکسید مس (CuO)	۵۳۱٫۸	۶۳۲۰	۷۶٫۵	۱٫۸

۳- معادلات حاکم بر جریان نانوسیال

وقتی سیالی جریان می‌یابد، معمولاً دو اصل بقا ارضاء شده‌اند: بقای جرم و بقای ممنتوم که از ارکان اصلی مکانیک نیوتنی هستند. برای انتقال حرارت جابه‌جایی در یک جریان سیال، علاوه بر معادلات جریان، معادله انتقال انرژی نیز باید ارضاء شود. بنابراین معادلات به‌دست آمده برای حالت کلی جریان سه بعدی همراه با انتقال حرارت جابه‌جایی در مختصات دکارتی، از معادلاتی که در ادامه می‌آیند، از طریق موازنه جرم، ممنتوم و انرژی روی المان حجم سیال به‌دست آورد. معادله بقای جرم برای جریان تراکم ناپذیر عبارت است از:

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

معادلات بقای ممنتوم (ناویر-استوکس) به شکل زیر می‌باشند:

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + F_z \quad (4)$$

$$\tau_{ii} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

معادله انرژی عبارت است از:

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \mu \Phi \quad (6)$$

که در آن Φ جمله استهلاک لزجتی است

$$\Phi = \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (7)$$

برای جریان مغشوش، کمیت‌های لحظه‌ای را می‌توان به صورت حاصل جمع کمیت‌های متوسط و نوسانی نوشت.

$$u = \bar{u} + u' \quad , \quad v = \bar{v} + v'$$

$$P = \bar{P} + P' \quad , \quad T = \bar{T} + T'$$

با جایگذاری این کمیت‌ها در معادلات (۲) تا (۴)، معادلات جریان مغشوش به دست می‌آید که بسیار شبیه معادلات جریان آرام هستند و فقط دارای جملات اضافی تنش اغتشاشی و شار حرارتی اغتشاشی هستند که به شکل زیر بیان می‌شوند:

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{v'u'} \quad (8)$$

$$q''_{turb} = -\rho C_p \overline{v'T'} \quad (9)$$

معمولاً معادلاتی شبیه معادلات جریان آرام برای این جملات، به شکل زیر فرض می‌شود:

$$\tau_{turb} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (10)$$

$$q''_{turb} = -k_t \frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \quad (11)$$

که μ_t و k_t به ترتیب لزجت اغتشاشی و ضریب هدایت حرارتی اغتشاشی هستند. برخلاف لزجت و ضریب هدایت حرارتی جریان آرام، کمیت‌های اغتشاشی خواص سیال نیستند و تابعی از شرایط جریان هستند. چه جریان آرام و چه مغشوش باشد، پارامتر بدون بُعد عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (12)$$

همچنین با بدون بُعدسازی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی h عدد ناسلت به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (۱۳)$$

$$h_x = \frac{q_x}{T_w - T_\infty} \quad (۱۴)$$

که T_w و T_∞ به ترتیب دمای موضعی دیوار و توده سیال هستند. مقدار ناسلت متوسط نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$Nu_m = \frac{h_m L}{k} \text{ که } h_m = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (۱۵)$$

سوسپانسیون‌ها یک مخلوط دو فازی هستند. برای مطالعه هیدرودینامیک سوسپانسیون‌ها، اول از همه باید دستگاه مرجعی برای تحلیل انتخاب کرد. این دستگاه می‌تواند اویلری (دستگاه ثابت) یا لاگرانژی (دستگاه متحرک با ذره) باشد. در تحقیق حاضر، از روش دوفازی اویلری-اویلری (مخلوط) برای بررسی استفاده شده است. در روش دوفازی اویلری-اویلری معادلات فاز گسسته همانند فاز سیال شبیه‌سازی می‌شوند.

در این مدل معادلات حاکم بر جریان دوفاز در یک سیستم مختصات اویلری بیان می‌شوند و سپس معادلات حاکم بر فاز گسسته نظیر معادلات حاکم بر فاز سیال به طور مجزا حل می‌شود. فاز گسسته به حجم کنترل‌هایی مجزا تقسیم شده که در هر کدام مقداری از ذرات وجود دارند. سپس با استخراج معادلات انتگرالی جرم و مومنتم خطی و با احتساب تمامی اثرات دینامیکی سیال پیوسته روی ذرات، فاز گسسته نیز مانند فاز پیوسته حل می‌گردد.

به طور کلی در روش دوفاز ذرات معلق در یک سیال، از نواحی با برش زیاد به نواحی با برش کمتر حرکت می‌کنند. این امر باعث می‌شود توزیع یکنواختی از ذرات در سیال وجود نداشته باشد. در روش تحلیل تک فازی، توزیع ذرات یکنواخت فرض می‌شود ولی در تحلیل دوفازی توزیع ذرات تعیین می‌شود. یکی از روش‌هایی که در نانوسیالات وجود دارد و می‌تواند نقش موثری در افزایش انتقال حرارت داشته باشد، مهاجرت ذرات در اثر نیروهای برشی، لزجی است. این پدیده‌ای است که مدل‌های تک فاز از نشان دادن آن ناتوان هستند، ولی مدل‌های دوفازی قادر به مدل سازی آن می‌باشند.

خواص مورد استفاده در این معادلات بین خواص سیال (فاز اولیه) و جامد (فاز ثانویه) تشکیل دهنده سوسپانسیون است. معادله پیوستگی مخلوط عبارت است از:

$$\frac{\partial(\rho_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m V_m) = 0 \quad (۱۶)$$

$$V_m = \frac{\phi \rho_p V_p + (1-\phi) \rho_f V_f}{\rho_m} \quad (۱۷)$$

که ϕ ، ρ_p و V_p به ترتیب کسر حجمی، چگالی و سرعت ذره و به طور مشابه ρ_f و V_f مربوط به سیال هستند. چگالی مخلوط به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\rho_m = \phi \rho_p + (1 - \phi) \rho_f \quad (۱۸)$$

معادله ممنتوم برای سوسپانسیون (جامد و مایع) عبارت است از :

$$\frac{\partial(\rho_m V_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m V_m V_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla V_m + \nabla V_m^T)] + \quad (19)$$

$$\rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{K=1}^n \phi_k \rho_k V_{dr,k} V_{dr,k} \right)$$

که n تعداد فازها، \vec{F} نیروی حجمی و μ_m لزجت مخلوط است. $V_{dr,k}$ سرعت رانشی برای فاز k ام است که به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$V_{dr,k} = V_{pq} - V_m \quad (20)$$

V_{pq} سرعت نسبی است که:

$$V_{pq} = V_p - V_q \quad (21)$$

معادله انرژی برای مخلوط سوسپانسیونی به شکل زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\phi_k \vec{V}_k (\rho_k E_k + P)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (22)$$

که در آن k_{eff} ضریب هدایت حرارتی موثر $(\sum \phi_k (k_k + k_t))$ ، که k_t ضریب هدایت حرارتی اغتشاشی است. جمله اول سمت راست معادله نشان دهنده انتقال انرژی به علت هدایت حرارتی است. S_E در برگیرنده سایر چشمه‌های حرارتی حجمی است. برای یک فاز تراکم‌ناپذیر $E_k = h_k$ ، که h_k آنتالپی محسوس برای فاز k ام است. از معادله پیوستگی برای فاز ثانویه p ، می‌توان معادله کسر حجمی برای فاز ثانویه p را بدست آورد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_p \rho_p) + \nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_m) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p V_{dr,p}) \quad (23)$$

رابطه بین سرعت رانشی $(V_{dr,k})$ و سرعت نسبی (V_{pq}) به شکل زیر است:

$$V_{dr,k} = V_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\phi_k \rho_k}{\rho_m} V_{qk} \quad (24)$$

در [۱۳] رابطه زیر برای سرعت نسبی ارائه شده است:

$$V_{pq} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{a} \quad (25)$$

در این رابطه d_p قطر ذرات فاز ثانویه p و \vec{a} شتاب ذرات فاز ثانویه است. تابع درگ f_{drag} ، از رابطه چیلر و نامن [۱۳] ارائه شده است:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (26)$$

$$\vec{a} = \vec{g} - (V_m \cdot \nabla)V_m - \frac{\partial V_m}{\partial t} \quad (27)$$

۴- جزئیات روش عددی

در تحقیق حاضر، محاسبات با استفاده از یک کد رایانه ای فرترن صورت گرفته است. معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی، به وسیله روش حجم محدود (Finite Volumes) با سیستم شبکه جابجا شده، به صورت عددی حل شده اند. برنامه رایانه ای براساس الگوریتم سیمپلکس به حل همزمان معادلات انفصال می پردازد. برای گسسته سازی معادلات انرژی و مقدار حرکت از روش قانون توان و برای کسر حجمی از روش کوئیک استفاده شده است. معیار همگرایی در این بررسی به کمتر از 10^{-6} محدود شده است. در روش حجم محدود ابتدا دامنه مورد نظر به تعدادی حجم کنترل غیر همپوشان تقسیم می شود به طوری که هر حجم حول یک نقطه از میدان قرار می گیرد. آن گاه از معادله دیفرانسیل روی حجم کنترل، انتگرال گیری شده و معادلات به فرم عددی منفصل می گردد. ایده اصلی در روش حجم محدود انفصال تقریب معادلات دیفرانسیل جزئی در نقاط مجزا نمی باشد، بلکه شرایط برقراری اصلی بقای جرم به صورت ماکروسکوپی دارای اهمیت است.

۵- حل مستقل از شبکه

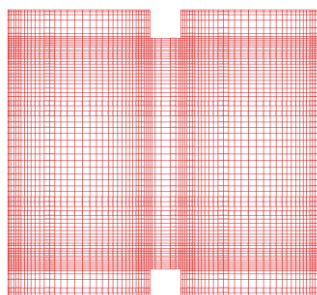
با توجه به بررسی های انجام شده بر روی نانوسیال آب آلومینا در رایلی 10^5 و رینولدز 100 و درصد غلظت حجمی 0.05 و نتایج موجود در جدول زیر بهترین گزینه برای رسیدن به حل مستقل از شبکه و در عین حال کمترین زمان محاسبات، شبکه 77×76 انتخاب شد. در شبکه بندی لزومی به استفاده از شبکه یکنواخت نیست. در اطراف مانع های جریان به علت وجود گرادیان های شدید دما و جریان می توان از شبکه بندی ریزتری استفاده کرد. هر چه شبه بندی ریزتر باشد، حل دقیق تر خواهد بود.

روش متداول این است که تعداد گره های شبکه را افزایش داده و تاثیر آن بر متغیرهای وابسته ای همچون سرعت، دما و ناسلت جریان در نظر گرفته می شود.

میزان تغییرات در این متغیرها در اثر افزایش تعداد گره ها از مرحله ای به بعد ناچیز می شود به طوری که می توان عنوان داشت که نتایج حل به شبکه بندی وابسته نیست.

جدول ۲- ارزیابی استقلال از شبکه

شبه بندی مورد استفاده	Nu_m
42×48	10.89
65×66	10.72
76×77	10.7
95×95	10.69



شکل ۲- نمایی از شبکه حل

۶- اعتبارسنجی

در این قسمت دو مورد اعتبارسنجی متفاوت جهت تایید روند اجرای کار انجام شده که به شرح زیر می باشد.

۶-۱- مقایسه با تحقیق دی وال دیویس [۱۴]

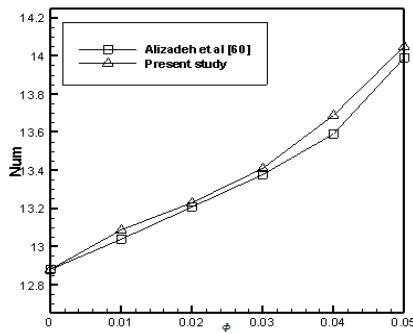
دیویس با بررسی انتقال حرارت جابه جایی طبیعی در یک محفظه ی مربعی شکل ساده که دیواره ی سمت راست در دمای سرد و دیواره ی سمت چپ آن در دمای گرم و دیواره های بالا و پایین عایق فرض شده است. جدول (۳) مقایسه داده های تحقیق حاضر با داده های دیویس نشان می دهد. نتایج ارائه شده تطابق بسیار خوبی با نتایج دیویس دارد.

۶-۲- مقایسه با تحقیق علیزاده [۱۲]

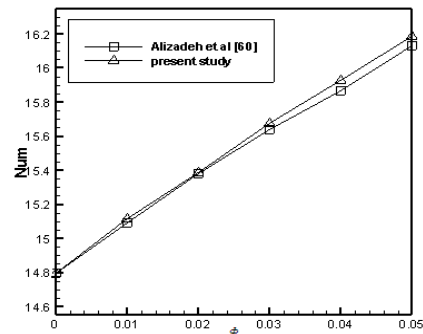
در تحقیق علیزاده جریان و انتقال حرارت نانوسیال درون محفظه ی مورد تهیه که در آن یک جسم داخلی تولید حرارت می کند، به صورت عددی بررسی شده است. در شکل های (۳) و (۴) نتایج کار تحقیق حاضر در دو عدد رینولدز و گرافش متفاوت با کار علیزاده و همکاران مقایسه شده است. همانگونه که مشاهده می شود، در هر دو مورد تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاضر و نتایج مرجع وجود دارد.

جدول ۳- مقایسه ناسلت متوسط تحقیق حاضر با نتایج دیویس

$Ra = 10^6$	$Ra = 10^5$	$Ra = 10^4$	$Ra = 10^3$	
۹,۰۸۸	۴,۶۰۴	۲,۲۴۸	۱,۱۱۸	کار حاضر
۸,۷۹۹	۴,۵۱۹	۲,۲۴۳	۱,۱۱۸	دیویس
۳,۲۸٪	۱,۸۸٪	۰,۲۲٪	۰,۰٪	خطا



شکل ۴- ناسلت متوسط چشمه حرارتی تحقیق حاضر با نتایج علیزاده برای نانوسیالآب-آلومینا ($Re = 500, Gr = 10^5$)



شکل ۳- ناسلت متوسط چشمه حرارتی تحقیق حاضر با نتایج علیزاده برای نانوسیالآب-آلومینا ($Re = 100, Gr = 10^4$)

۷- نتایج و بحث

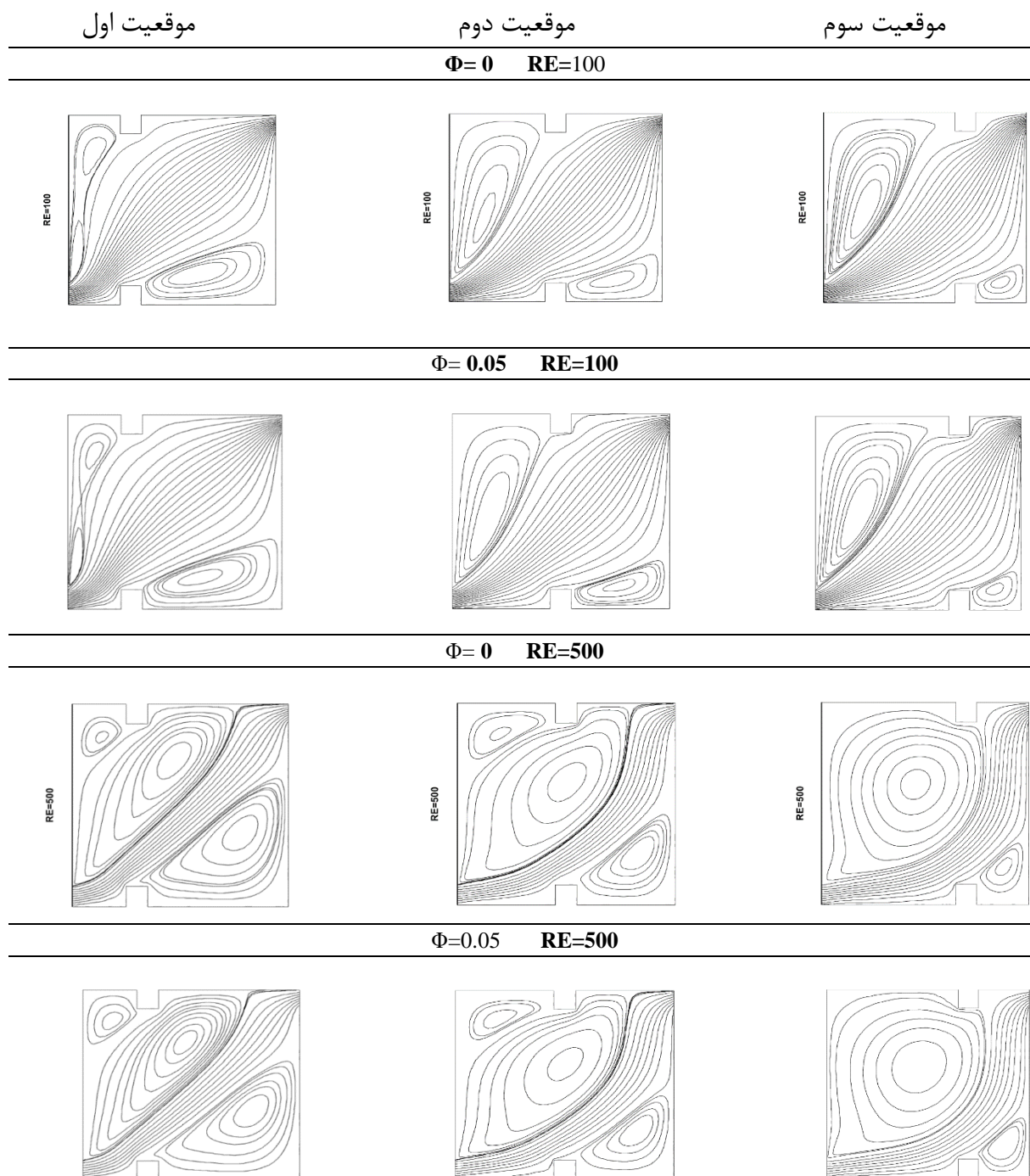
۷-۱- بررسی میدان جریان و انتقال حرارت

با کمک نرم افزار فلوننت میدان جریان و انتقال حرارت در جابجایی ترکیبی درون محفظه، در حالت های مختلف قرارگیری مانع جریان با حضور سیال آب خالص و نانوسیال آلومینا با غلظت و عدد رینولدز مختلف در رایلی ثابت مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به صورت زیر می باشد. در شکل (۵) تغییرات میدان جریان با تغییرات عدد رینولدز برای سیال خالص و نانوسیال آلومینا ($\Phi=0.05$) در عدد رایلی ثابت 10^5 برای سه موقعیت مختلف قرارگیری مانع های جریان رسم شده است.

خطوط جریان اثر متقابل بین جریان جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری را توصیف می کند. میزان تأثیرپذیری جریان جابجایی طبیعی به اجباری، عدد ریچاردسون نامیده می شود. عدد ریچاردسون نشان دهنده انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی و یک عدد بی بعد در مکانیک سیالات می باشد.

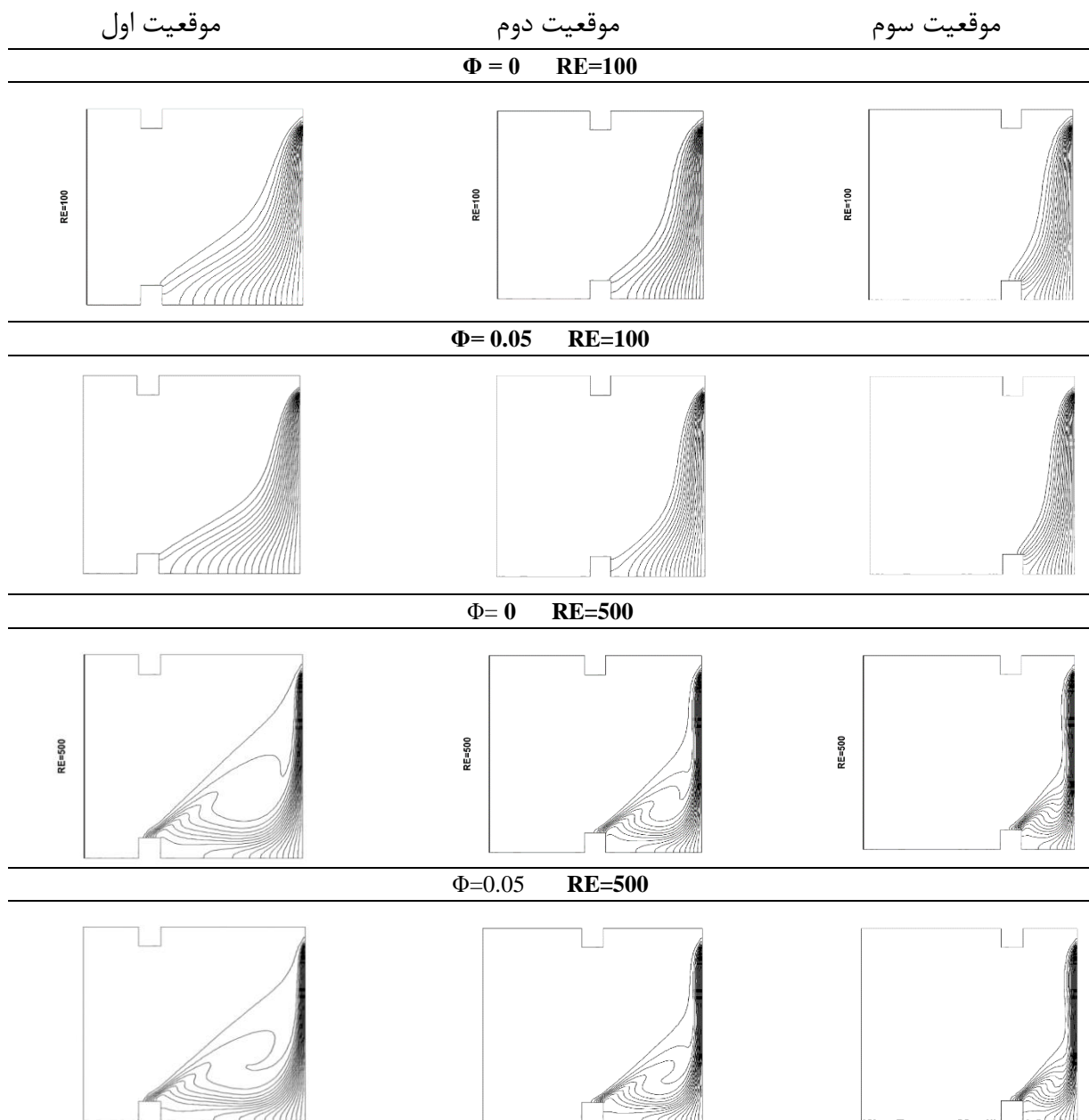
اگر عدد ریچاردسون منفی باشد بیانگر حالت ناپایدار در شاره است (افزایش اغتشاش)، اگر عدد ریچاردسون مثبت باشد بیانگر حالت پایداری در شاره است. از شکل (۵) خطوط جریان در رینولدز 100 برای آب خالص و نانوسیال آلومینا با غلظت 0.05 ، تقریباً مشابه می باشند. در اطراف دیواره گرم گردابه ای بوجود آمده که علت آن نیروی شناوری بوجود آمده در اثر اختلاف دما بین دیواره گرم و دیواره های سرد محفظه می باشد. علت تشکیل گردابه ها در ورودی، انبساط ناگهانی جریان و جابجایی طبیعی می باشد. با افزایش عدد ریچاردسون، از قدرت گردابه های ایجاد شده کاسته شده است. بطور کلی نانو سیالات تمایل بهتری به حرکت خزشی داشته و بهتر به عمق محفظه نفوذ می کنند و باعث بهبود قدرت گردابه ها شده و خطوط جریان متراکم تر می شوند. بنابراین استفاده از نانوسیال آلومینا به جای آب خالص باعث بهبود انتقال حرارت در محفظه ها می شود. با افزایش عدد رینولدز از 100 به 500 ، بطور کلی، شکل خطوط جریان تغییر یافته است. افزایش عدد رینولدز باعث افزایش سرعت و قوی تر بودن انبساط ناگهانی در ورودی جریان گردیده، در نتیجه، گردابه های بیشتر و بزرگتری تشکیل شده و مقدار دبی عبوری افزایش پیدا می کند.

همچنین در رینولدز ۵۰۰ و استفاده از نانوسیال، خطوط جریان متراکم تر و گردابه های قویتری تشکیل گردیده است. هر چه تراکم خطوط جریان بیشتر باشد، نشان دهنده ی جریان جابجایی قویتر و بهبود انتقال حرارت در محفظه می باشد. در شکل (۶) خطوط هم دما برای حالات مختلف قرارگیری مانع جریان برای سیال آب خالص و نانوسیال آلومینا برای رینولدز ۱۰۰ و ۵۰۰ نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه ی خطوط جریان سیال خالص و نانوسیال آب - آلومینا ($10^5 Ra$)

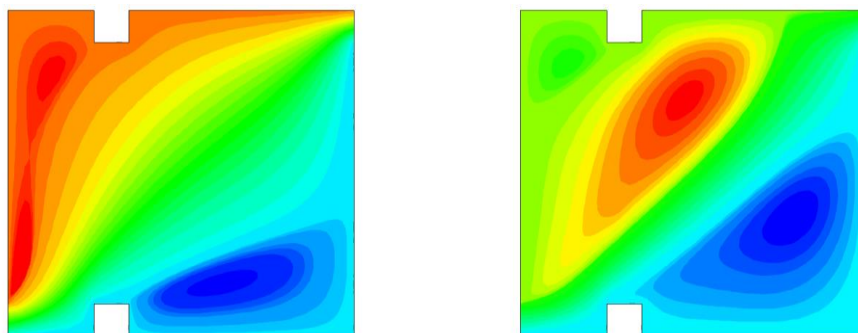
همانطور که از شکل (۶) مشخص است در عدد رینولدز ۱۰۰ و کسر حجمی ثابت به علت کاهش سرعت جریان ورودی، عدد ریچاردسون افزایش یافته و باعث تراکم خطوط هم دما در نزدیکی دیواره گرم شده است. زیرا با افزایش عدد ریچاردسون و در نتیجه افزایش گراش، میزان جابجایی طبیعی بیشتر شده، لذا اختلاف دما بیشتر و باعث بهبود انتقال حرارت می شود. با افزایش عدد رینولدز، تراکم خطوط هم دما در نزدیکی دیواره گرم بیشتر می شود زیرا با افزایش عدد رینولدز، جریان بیشتری با سرعت بالاتر به سمت دیواره ی گرم حرکت کرده، به طوری که خطوط هم دما خیلی فشرده تر شده، که نشان دهنده ی بیشتر شدن قدرت جابجایی می باشد، که در نتیجه آن، انتقال حرارت و گرادیان دما بیشتر می شود.



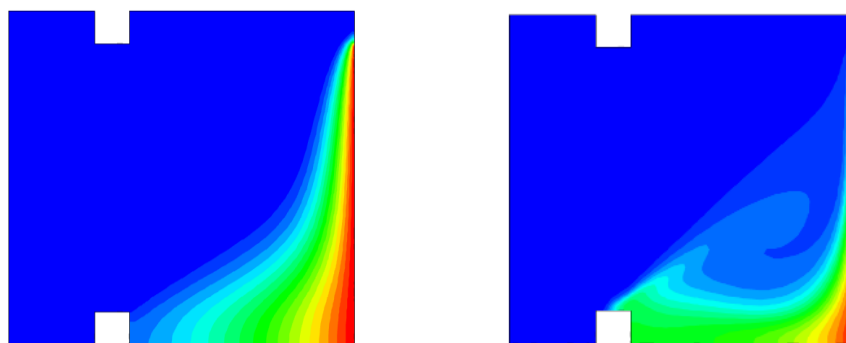
شکل ۶- مقایسه ی خطوط دما ثابت سیال خالص و نانوسیال آب - آلومینا ($Ra = 10^5$)

همچنین اندازه ناحیه سرد محفظه هم بزرگتر می شود، زیرا با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان بیشتر شده و جریان سیال با سرعت بالاتری به سمت خروجی محفظه حرکت می کند. سرعت بالای جریان سیال، مانع انتقال حرارت از سمت خروجی (ناحیه گرم) به سمت ورودی (ناحیه سرد) شده، بنابراین در سمت چپ محفظه، ناحیه سرد بزرگتری تشکیل می شود.

در ضمن استفاده از نانوسیال آلومینا باعث می شود که خطوط هم دما فشرده تر شوند و گرادیان دما کاهش یابد ولی از طرفی نانوسیالات به علت دارا بودن ضریب هدایت حرارتی بالاتر نسبت به سیال آب خالص، این کاهش را جبران و در کل باعث بهبود انتقال حرارت می شوند.



شکل ۷- کانتور تابع جریان در رینولدز ۱۰۰ (شکل سمت چپ) و در رینولدز ۵۰۰ (شکل سمت راست)



شکل ۸- کانتور دما در رینولدز ۱۰۰ (شکل سمت چپ) و در رینولدز ۵۰۰ (شکل سمت راست)

۲-۷- بررسی کانتور جریان و دما

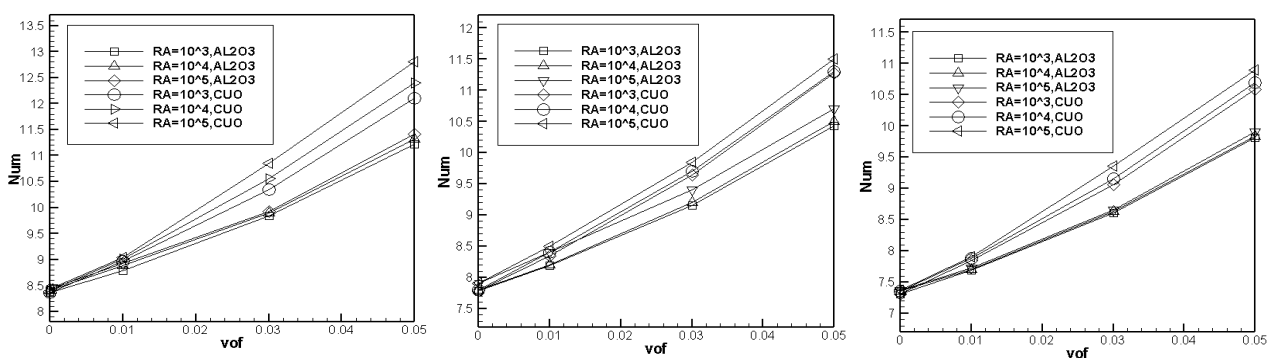
همانگونه که در شکل (۷) در رینولدز ۱۰۰ قابل مشاهده است قسمت عمده ی سرعت جریان قبل از مانع بوده و با ورود جریان به سمت راست محفظه از سرعت جریان کم شده است.

همانگونه که از شکل (۸) قابل مشاهده است دیواره‌ی سمت راست گرم بوده و با توجه به برقراری جریان سیال داخل محفظه، از شدت این گرما، هرچه به سمت قسمت ورودی و سمت چپ محفظه رفته کم شده است.

۷-۳- تأثیر نوع سیال بر ناسلت متوسط

در این قسمت اثر نسبت کسر حجمی و نوع نانوذرات در اعداد رایلی مختلف در ۳ موقعیت متفاوت محل قرارگیری مانع جریان بر ناسلت متوسط بررسی شده است. افزودن نانوذرات اعم از فلزی، اکسید فلزی یا نانولوله های کربنی به یک سیال نظیر آب، علاوه بر اینکه هدایت حرارتی آن را تحت تأثیر قرار می دهد، سایر خواص فیزیکی، نظیر ظرفیت حرارتی سیال و لزجت آن نیز تحت تأثیر قرار می گیرد. مجموعه تغییرات ایجاد شده در خواص ترموفیزیکی سیال علاوه بر افزایش هدایت حرارتی، باعث افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز می شود. در حالت کلی افزایش کسرحجمی نانوذرات باعث افزایش انتقال حرارت می شود.

در شکل (۹) ناسلت متوسط نانوسیال آب - اکسید مس دارای مقادیر بیشتری نسبت به آب-آلومینا می باشد. به عنوان مثال، ناسلت متوسط آب خالص در رایلی 10^5 برابر $7,37$ و در حالت اکسید مس در غلظت $0,05$ برابر $10,89$ که معادل $47,76\%$ افزایش ناسلت قابل مشاهده است. در حالی که برای نانوسیال آب - آلومینا در غلظت $0,05$ برابر $9,9$ که معادل $34,33\%$ افزایش ناسلت قابل مشاهده است. ضریب هدایت حرارتی اکسید مس تقریباً معادل $9,1$ برابر آلومینا است. در شکل (۱۰) به عنوان مثال ناسلت متوسط آب خالص در رایلی 10^4 برابر $7,8$ و در حالت اکسید مس در غلظت $0,05$ برابر $11,3$ که معادل $47,87\%$ افزایش ناسلت قابل مشاهده است.



شکل ۹-مقایسه‌ی ناسلت متوسط

دیواره گرم برای نانوسیالات آب-آلومینا و آب-اکسید مس در موقعیت اول

شکل ۱۰-مقایسه‌ی ناسلت متوسط

دیواره گرم برای نانوسیالات آب-آلومینا و آب-اکسید مس در موقعیت دوم

شکل ۱۱-مقایسه‌ی ناسلت متوسط

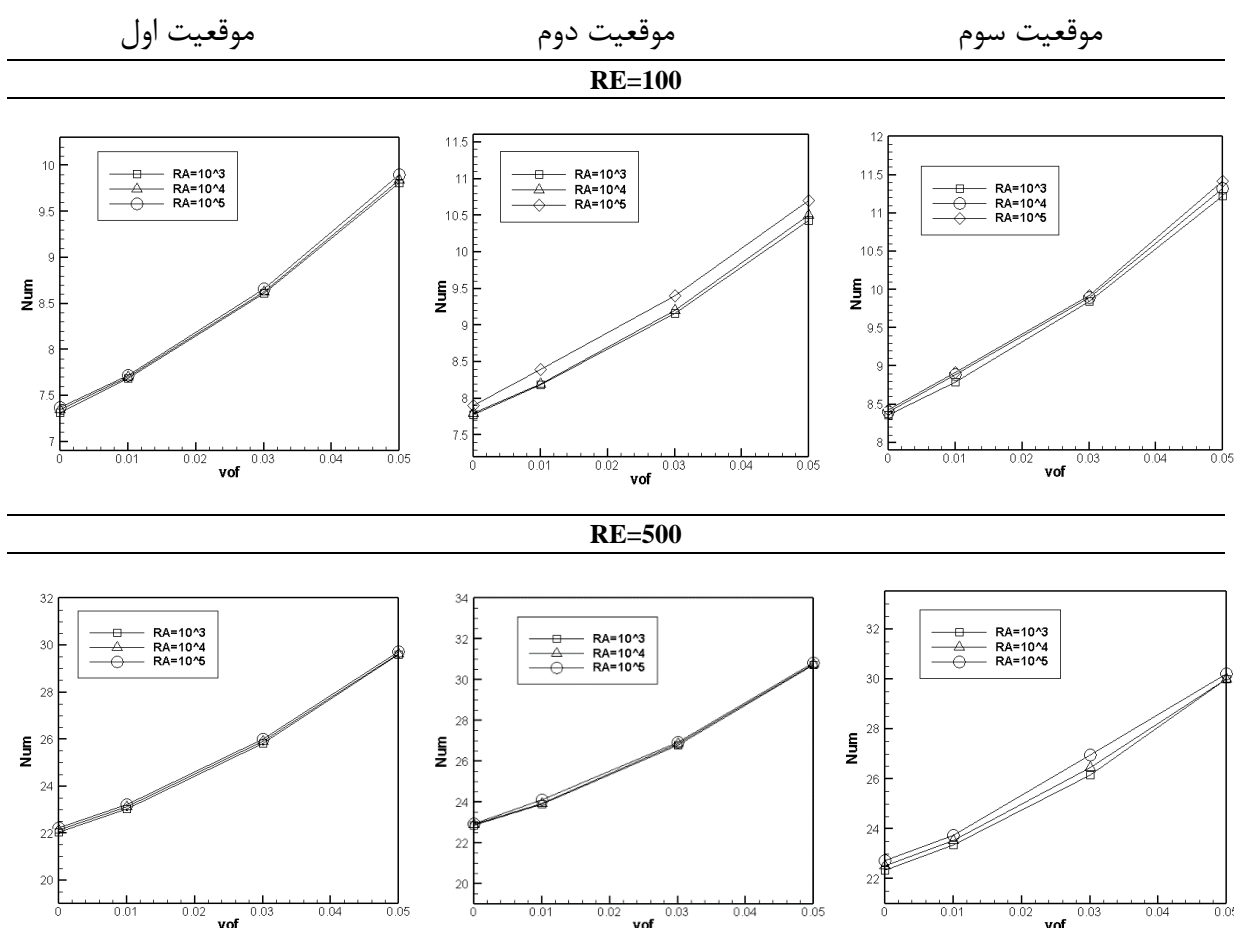
دیواره گرم برای نانوسیالات آب-آلومینا و آب-اکسید مس در موقعیت سوم

درحالی که برای نانوسیال آب - آلومینا در غلظت $0,05$ برابر $10,5$ که معادل $62,34\%$ افزایش ناسلت قابل مشاهده است. بنابراین استفاده از نانوسیال آب اکسید مس بهینه تر می باشد.

۷-۴- تأثیر عدد رایلی بر ناسلت متوسط دیواره ی گرم

در شکل (۱۲) تغییرات ناسلت متوسط سیال با غلظت و عدد رایلی مختلف در رینولدز ۱۰۰ و ۵۰۰ رسم شده است. همانگونه که در شکل مشاهده می شود افزایش غلظت و عدد رینولدز باعث افزایش ناسلت متوسط دیواره گرم شده است. با افزایش عدد رایلی، نیروی شناوری افزایش پیدا کرده، در نتیجه جریان جابجایی طبیعی بیشتر از جابجایی اجباری شده و عدد ریچاردسون افزایش می یابد. با افزایش عدد ریچاردسون به علت کاهش سرعت ورودی جریان و تنش برشی در محفظه، گردابه های ضعیف تری تشکیل شده که باعث کاهش ناسلت متوسط شده و دمای بیشینه سطح افزایش می یابد.

حال استفاده از نانوسیال به علت دارا بودن ضریب هدایت حرارتی بالا و پخش حرارتی بهتر، این کاهش را جبران و دمای بیشینه سطح را کاهش داده و انتقال حرارت را افزایش می دهد. به طور کلی در رینولدزهای بالا (مقدار عدد ریچاردسون بالا باشد) افزایش عدد رایلی سبب افزایش جابجایی طبیعی در محفظه شده که این افزایش سبب تضعیف جابجایی مخلوط شده و مقدار آن را روی چشمه ی حرارتی کاهش می دهد.



شکل ۱۲-مقایسه تأثیر عدد رایلی بر تغییرات ناسلت متوسط دیواره ی گرم

۸- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، تأثیر نانوسیال آب اکسید مس و آب آلومینا در انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در یک محفظه تهویه شده با گرمایش موضعی به صورت عددی بررسی شد. کاربرد هندسه تحقیق حاضر در مبدل های حرارتی و پنل های آبگرم در صنایع فولاد می باشد. موارد زیر به عنوان نتایج این تحقیق بیان می گردد: افزایش غلظت نانوذرات، موجب کاهش دمای بیشینه محفظه می شود. این افزایش در عدد ریچاردسون های پایین، به علت حرکت سریع جریان سیال و افزایش گرادیان دما بیشتر می باشد. ولی در ریچاردسون های بالا چون حرکت جریان سیال پایین است فرصت کافی جهت انتقال حرارت وجود دارد، بنابراین تأثیر کسرحجمی در حالت ریچاردسون های بالا کمتر است. در عدد رینولدز پایین با افزایش عدد گراشف، دمای بیشینه محفظه کاهش می یابد که این عامل مناسبی در بهبود انتقال حرارت می باشد.

افزایش عدد رینولدز جریان باعث افزایش انتقال حرارت جابجایی اجباری می شود، که خود عامل مناسبی در کاهش دمای محفظه نسبت به عدد رینولدز پایین تر است. ولی برخلاف عدد رینولدز پایین، افزایش عدد گراشف، سبب افزایش دمای محفظه شده است. در اعداد رینولدز بالا افزایش عدد گراشف سبب افزایش جابجایی طبیعی در محفظه شده که این افزایش سبب تضعیف جابجایی نانوسیال شده و مقدار آن را روی منبع حرارتی کاهش می دهد. بر همین اساس به ازای افزایش عدد گراشف در اعداد رینولدز بالا، عدد ناسلت متوسط جریان کاهش می یابد.

الگوی جریان ایجاد شده در محفظه، تأثیر قابل توجهی در خنک کاری منبع حرارتی دارد. بنابراین دو عامل عدد رینولدز و موقعیت منبع حرارتی دارای اهمیت هستند. همان گونه که اشاره شد، موقعیتی که در آن بیشینه دمای محفظه کمترین مقدار را دارا باشد، مناسب می باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده از تجزیه و تحلیل، موقعیت سوم نسبت به موقعیت اول و دوم با نانوسیال آب اکسید مس بهینه تر است.

مراجع

- [1] Singh, A. K., "Thermal Conductivity of Nanofluids", Defence Science Journal, Vol. 58, pp. 600-607, (2008).
- [2] Xuan, Y., and Roetzel, W., "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, 2000, pp. 201-213, (2009).
- [3] Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M., "Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 3639-3653, (2003).
- [4] Jou, R. Y., and Tzeng, S. C., "Numerical Research of Nature Convective Heat Transfer Enhancement Filled with Nanofluids in Rectangular Enclosures", Int. Commun. Heat Mass Transfer, Vol. 33, pp. 727-736, (2010).

- [۵] شیخزاده، ق.ع. و محمودی، م.، "مطالعه عددی جابه جایی آزاد نانوسیال در یک محفظه مربعی با وجود اجزای سرد و گرم روی دیواره‌های عمودی آن"، نشریه استقلال، سال ۳۰، شماره ۱، ص ۷۹-۹۶، تابستان (۱۳۹۰).
- [6] Abu-Nada, E., and Chamkha, A.J., "Mixed Convection Flow in a Lid Driven Square Enclosure Filled with a Nanofluid", *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 29, pp. 472-482, (2010).
- [7] Shahi, M., Mahmoudi A. H., and Talebi, F., "Numerical Study of Mixed Convective Cooling in a Square Cavity Ventilated and Partially Heated from the Below Utilizing Nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*", Vol. 37, pp. 201-213, (2009).
- [8] Fereidoon, A., Saedodin, S., HemmatEsfe, M., and Noroozi, M.J., "Evaluation of Mixed Convection in Inclined Square Lid Driven Cavity Filled with Al₂O₃/water Nanofluid", *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 7, pp. 55-65, (2013).
- [9] Hwang, K.S., Lee, J.H., and Jang, S.P., "Buoyancy-driven Heat Transfer of Water-based Al₂O₃ Nanofluids in a Rectangular Cavity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4003-4010, (2007).
- [10] Santra, A. K., Sen, S., and Chakraborty, N., "Study of Heat Transfer Augmentation in a Differentially Heated Square Cavity using Copper-water Nanofluid", *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 47, pp. 1113-1122, (2008).
- [11] Ogut, E. B., "Natural Convection of Water-based Nanofluids in an Inclined Cavity with a Heat Source," *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 2063-2073, (2009).
- [۱۲] علیزاده، محمدرضا، "بررسی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در یک محفظه تهویه شده با چشمه داخلی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، (۱۳۹۰).
- [13] G. De Vahl Davis, "Natural Convection of Air in a Square Cavity, a Benchmark Numerical Solution", *International Journal of Numerical Methodology Fluids*, pp. 249-264, (1983).

فهرست نمادهای انگلیسی

A	مساحت (m ²)
A	شتاب (m/s ²)
C _p	گرمای ویژه (J/Kg.K)
D	قطر (m)
f _{drag}	ضریب درگ
Gr	عدد گراشف
G	شتاب گرانش (m/s ²)
H	ارتفاع دیواره عمودی (m)
H	ضریب جابه‌جایی حرارتی (W/m ² .K)

K	ضریب هدایت حرارتی ($W/m.k$)
K_B	ثابت بولتزمن ($1.38066 \times 10^{-23} JK^{-1}$)
M	جرم مولکولی سیال پایه
N	عدد آووگادرو ($6.022 \times 10^{23} mol^{-1}$)
Nu	عدد ناسلت
p	فشار (N/m^2)
Pe	عدد پکلت
Pr	عدد پرانتل
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
T	دما (k)
V	سرعت (m/s)
X,Y	مولفه‌های مختصات بی بعد ($x/L, y/L$)

نمادهای یونانی

ρ	چگالی (Kg/m^3)
μ	لزجت ($Kg/m.s$)
ϕ	کسر حجمی ذره
β	ضریب انبساط
	حرارتی ($1/k$)
τ	تنش برشی (Pa)

زیر نویس‌ها

Dr	رانشی
eff	موثر یا معادل
Eq	معادل
F	سیال
M	مخلوط، متوسط
M	ماکسول
Max	ماکزیمم
Nf	نانوسیال

Abstract

The flow and heat transfer of a mixture of two different types of Nanofluids (water-alumina and water - copper oxide) in a localized ventilated compartment will be investigated by a finite volume method for three different situations. The results will be presented in the form of flow lines, constant temperature, and Nusselt numbers. Inlet fluid is at cold temperatures and walls with outlet ports in extreme conditions. The particle size is 33 nm and the tests are carried out at ambient temperature. The studied parameters include input fluid intensity ($500 \geq Re \geq 100$), Riley number effects ($10^5 \geq Ra \geq 10^3$), Nanofluid concentration ($0.05 \geq \Phi \geq 0$). The numerical results show that, for example, in the first position, in Reynolds 100 and Riley 10^3 in pure water state, the mean Nusselt was as much as 7.7 and reached 8.61 in the concentration of 0.33. Which will increase by 17.78% to Nusselt. In general, increasing the volume fraction of nanoparticles will increase the flow of Nusselt and heat transfer. The type of nanofluid is also effective in the amount of heat transfer.