

## تحلیل عددی انتقال حرارت همرفت طبیعی آرام

### نانوسیال در یک جریان با موانع مربعی و دایره‌ای شکل

در این مقاله تحلیل عددی انتقال حرارت همرفت طبیعی آرام نانوسیال در یک جریان با موانع مربعی و دایره‌ای شکل بررسی شده است. تمامی مقایسه‌ها برای حالت‌های مختلف، با عدد رایلی اصلاح شده  $Ram$  صورت گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده گردید که اگر دوهندسه دارای ضریب تخلخل مشابه باشند آن‌گاه مقدار ضریب نفوذ پذیری معادل  $Keq$  برای موانع دایره‌ای بزرگ‌تر از موانع مربعی است، ولی مقادیر عدد ناسلت متوسط برای موانع دایره‌ای کمتر از موانع مربعی خواهد بود. همچنین زمانی که تعداد موانع کم است نحوه توزیع دما و خطوط جریان وابسته به شکل موانع می‌باشد. نتایج نشان دادند که برای محفظه دارای المان حرارتی با آرایش مربعی انتقال حرارت هدایت غالب است و برای آرایش افقی المان‌ها انتقال حرارت جابه‌جایی غالب است. با افزایش عدد رایلی و در نتیجه زیاد شدن جریان چرخشی در برخی نواحی محفظه، نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی در مقایسه با هدایت افزایش پیدا می‌کند. نتایج حل عددی در تحقیق حاضر یک افزایش در عدد ناسلت میانگین و همچنین ضریب انتقال حرارت را، برای هنگامی که غلظت حجمی نانوسیال رقیق افزایش یابد، نشان می‌دهد.

### اسماعیل قاندى<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

### طاہر ارمغانی<sup>۲</sup>

استادیار

### رضا سپاهی سامیان<sup>۳</sup>

دکتر

واژه های راهنما: انتقال حرارت همرفت، نانوسیال، موانع مربعی و دایره‌ای، محیط متخلخل

## ۱- مقدمه

ماسودا و همکاران [۱] اولین محققانی بودند که نانوسیالات در معنای امروزی را مورد استفاده قرار دادند. نانوسیالات در معنای امروزی را می‌توان سیالاتی دانست که ذرات بسیار ریز در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر، در داخل سیال پایه مانند آب و یا اتیلن گلیکول پایدار شده‌اند. نانوسیالات در سال‌های گذشته در بسیاری از عرصه‌های مهندسی مانند سیستم‌های خورشیدی، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، کاربردهای پزشکی، پیل‌های سوختی، راکتورهای هسته‌ای و افزایش راندمان سیستم‌های حرارتی مورد توجه قرار گرفته‌اند. تحقیقات گسترده‌ای در زمینه خواص این سیالات در شرایط مختلف به صورت آزمایشگاهی و عددی انجام گرفته که بسیاری از آن‌ها نمایانگر افزایش قابل ملاحظه انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه است [۲-۳].

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوشهر، بوشهر، ایران sghaedi@gmail.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مهدیشهر، مهدیشهر، ایران armaghani.taher@yahoo.com

<sup>۳</sup> دکترای مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی، تهران، ایران reza.samian@gmail.com

امین‌الساداتی و قاسمی [۴] جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید مس را در اعداد گراشوف و کسرهای حجمی مختلف در محفظه‌ای مربعی با گرمایش موضعی به صورت عددی بررسی کردند. استفاده از محیط‌های متخلخل سلول باز از شیوه‌های جدیدی است که برای افزایش انتقال حرارت مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحقیقات انجام شده مخصوصاً در زمینه بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در محیط متخلخل به صورت آزمایشگاهی بسیار محدود هستند و می‌توان گفت این تحقیق از اولین پژوهش‌هایی است که در این زمینه انجام شده است. مغربی و همکاران [۵] در سال (۲۰۱۲) نیز به بررسی عددی تأثیر نانوسیال بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون لوله متخلخل پرداخته‌اند. همچنین حاجی‌پور و مولائی دهکردی [۶] انتقال حرارت نانوسیال آب-آلومینا در لوله‌ی متخلخل عمودی، تحت شار ثابت را به دو صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار داده‌اند. راوو و سریواستاوا [۷]، به روش آزمایشگاهی برای فهمیدن ویژگی‌های انتقال حرارت نانوسیالات رقیق به روش اندازه‌گیری غیرتداخلی بر پایه لیزر برای یک صفحه تخت عمودی غوطه‌ور در نانوسیال و رژیم جریان طبیعی تحقیق شد و نتیجه زیر به دست آمد: در یک عبارت کمی، برای غلظت ۰/۰۲ درصد نانوسیال افزایشی در حدود ۲۱٪ در ضریب انتقال حرارت در مقایسه با سیال پایه مشاهده شد در حالی که دیده شد عدد ناسلت با افزایش غلظت نانوسیالات بدتر شد. در سال (۲۰۱۴)، رابطی [۸] انتقال حرارت جابه‌جایی از روی یک صفحه افقی جاسازی شده در یک محیط متخلخل اشباع با یک نانوسیال را به‌طور عددی تحلیل کرد. ماکونگو و همکارانش [۹] در یک مطالعه به روش عددی جزئیات جابه‌جایی آزاد عبوری از روی یک گوه نفوذناپذیر جاسازی شده در یک نانوسیال اشباع شده محیط متخلخل را بررسی کرد. مرجی و همکاران [۱۰] به صورت عددی انتقال حرارت جابه‌جایی در یک محفظه مربعی پر شده با نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید و تحت اثر یک میدان مغناطیسی بررسی کردند. تحقیقاتی نیز در این حوزه توسط حاتمی و گنجی [۱۱] نگوین و همکاران [۱۲] کالیداسان و همکاران [۱۳] راونیک و اسکرگت [۱۴] راوو و سریواستاوا [۱۵] بوحلب و عباسی [۱۶] کسای پور و همکاران [۱۷] شرمه و همکاران [۱۸] شرمه و همکاران [۱۹] مکولاتی و همکاران [۲۰] خانافر و همکاران [۲۱] گروسان و همکاران [۲۲] شرمه و همکاران [۲۳] باوراز و همکاران [۲۴] انجام شده است.

ارمغانی و همکارانش [۲۵] به تحلیل عددی انتقال حرارت همرفت اجباری در یک کانال متخلخل با استفاده از یک مدل شار حرارتی جدید با هدف بررسی اثرات عدد نیلد بر حرکت ذرات و انتقال حرارت نانوسیال پرداختند. نتایج ایشان نشان‌دهنده‌ی افزایش شار حرارتی جذب شده در دیوار به وسیله‌ی فاز سیال هنگام افزایش عدد نیلد می‌باشد. ارمغانی و همکارانش [۲۶] اثرات جنب‌وجوش ذرات نانوسیال در انتقال حرارت همرفت اجباری در یک کانال متخلخل به صورت غیرتعادلی را به صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش در عدد لوئیس باعث کاهش جذب شار حرارتی به وسیله سیال می‌شود. در سال (۲۰۱۵) اسماعیل و همکارانش [۲۷] به بررسی اثرات افزودن نانوسیال بر تولید آنتروپی پرداختند و گزارش کردند که افزایش در نانوسیال سبب افزایش تولید آنتروپی می‌شود. در مطالعه حاضر تحلیل عددی انتقال حرارت همرفت طبیعی آرام نانوسیال در یک جریان با موانع مربعی و دایره‌ای شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد. جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه با سیال اشباع شده که توزیع المان‌های جامد پیوسته‌ای در آن وجود دارد در مسائل مختلف مهندسی، من جمله مبدلهای حرارتی، انتقال در بافتهای زنده از کاربردهای تحقیق است.

در تحقیق حاضر علاوه بر مطالعه اثرات افزودن نانوذره بر سیال پایه بر روی انتقال حرارت چیدمان های جدیدی از موانع مربعی مد نظر قرار گرفته و با هم مقایسه شده است. تحلیل انتقال حرارت بر اساس ارتقای سیال پایه و در نتیجه تغییر نانوسیال نیز به طور کامل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- بیان مساله

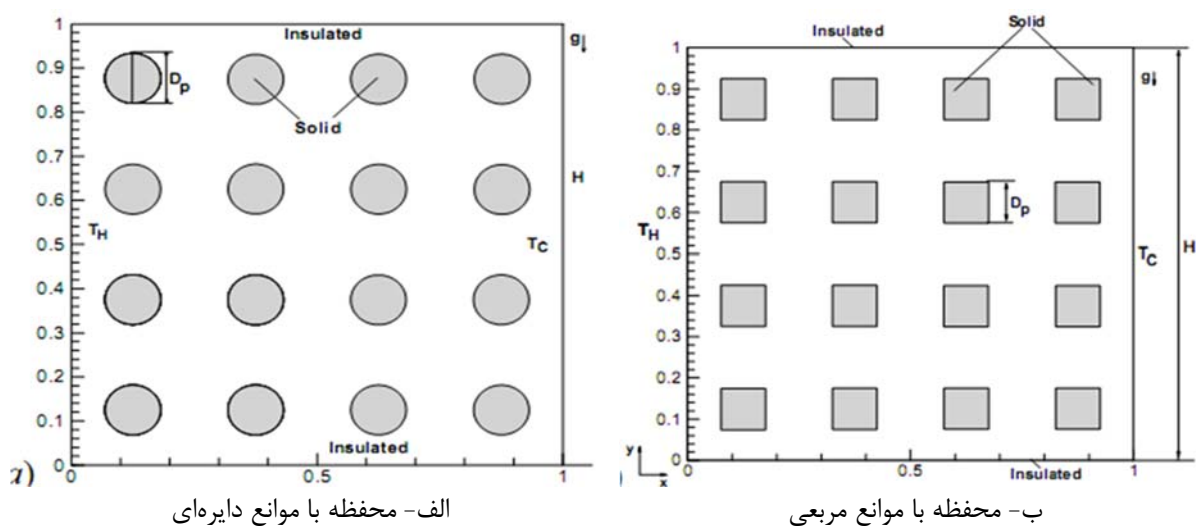
طرح واره‌ای از فیزیک مسئله در شکل (۱) نشان داده شده است. در این شکل موارد زیر نشان داده شده است:

- ۱- یک محفظه‌ی مربعی شکل با طول اضلاع  $H=1m$  که بخشی از آن با موانع مربعی و دایره‌ای شکل هادی حرارت پر شده است.
- ۲- قطر موانع دایره‌ای با  $D_p$  نشان داده شده است.
- ۳- موانع مربعی دارای طول ضلع  $D_p$  می‌باشند. اضافه می‌گردد که میله‌ها به صورت مساوی در محفظه تقسیم شده‌اند.

محفظه به صورت هم‌دما وجود دارد که از طرف دیواره‌ی سمت چپ با دمای  $T_H$  گرم می‌شود. دیواره‌ی سرد روبروی آن (سمت راست) در دمای ثابت  $T_C$  قرار دارد. دیواره‌های افقی به صورت عایق هستند. برای تحلیل چنین آرایشی از روش ماکروسکوپی استفاده می‌شود که معادلات برای فضایی که سیال وجود دارد حل می‌شود. نتایج حل در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد.

## ۳- روش تحقیق و شبیه‌سازی‌ها

کلید شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار فلونت صورت پذیرفته است. در این راستا پس از ترسیم هندسه مورد نظر با ابعاد اشاره شده در مقاله‌ی براگا و دیلیموس [۲۸] در نرم‌افزار گمبیت به شبکه‌بندی و اعمال شرایط مرزی پرداخته شده است. ایجاد شبکه بندی مناسب برای حل معادلات حاکم بر مدل یکی از مهم ترین بخش های مدل‌سازی است. شبکه تولید شده از حیث ساختار به دو دسته کلی شبکه بندی منظم و شبکه بندی نامنظم تقسیم می‌شود.



شکل ۱ - طرح‌واره‌ای از فیزیک مسئله مورد بررسی

برای حل یک مسئله مشخص، میزان حافظه مورد نیاز برای شبکه نامنظم در مقایسه با شبکه منظم بیشتر است چرا که اطلاعات مربوط به نقاط اطراف هر نقطه از شبکه باید ذخیره شوند. همچنین سرعت حل نیز کمتر خواهد بود چون در هنگام تصحیح اطلاعات هر نقطه از شبکه باید با روشی نقاط اطراف آن را بیابیم [۲۹]. به همین علت با توجه به تنوع هندسه ها هم از شبکه نامنظم و هم منظم استفاده شده است که در ادامه توضیح داده خواهد شد. پس از شبکه بندی و استخراج آن با پسوند msh، شبکه مورد نظر در نرم افزار فلونت وارد و خوانده می گردد. دیواره سمت چپ گرم و دیواره سمت راست در دمای پایین تری قرار دارد بقیه دیواره ها ایزوله هستند. محاسبات بر پایه فشار (pressure based) بوده و برای دیوار شرط سرعت صفر در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱- معادلات حاکم

با استفاده از متغیرهای بی بعد، معادلات بی بعد شامل بقای جرم، بقای مومنتم در راستای X و Y و بقای انرژی برای جریان دو بعدی، دائم و آرام عبارت اند از:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, S = \frac{s}{L}, U = \frac{uL}{\alpha_e}, V = \frac{vL}{\alpha_e}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (1)$$

$$P = \frac{\rho L^2}{\rho_{nf} \alpha_e^2}, Da = \frac{K}{L^2}, Ra = \frac{g \beta \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (2)$$

که در آن Da عدد بی بعد داری و K ضریب تخلخل محیط بوده و در بررسی محیط متخلخل از مدل داری استفاده شده است.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (3)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\rho_{nf} \alpha_f} \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Y} \right) - \frac{Pr}{Da} U \quad (4)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\rho_{nf} \alpha_f} \left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( \mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \right] - \frac{Pr}{Da} V + \frac{(\rho \beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra Pr \theta \quad (5)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial Y} \left( \phi \frac{\partial \theta_f}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial X} \left( \phi \frac{\partial \theta_f}{\partial X} \right) + A (\theta_s - \theta_f) \quad (6)$$

$$0 = k \frac{\partial}{\partial Y} \left( (1-\phi) \frac{\partial \theta_s}{\partial Y} \right) + k \frac{\partial}{\partial X} \left( (1-\phi) \frac{\partial \theta_s}{\partial X} \right) + A (\theta_s - \theta_f)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{(\rho c_p)_{nf} \alpha_f} \left[ \frac{\partial}{\partial X} \left( k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left( k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \quad (7)$$

تابع جریان بی بعد نیز به صورت رابطه زیر به دست می آید :

$$\Psi(X, Y) = \int U dY \quad (8)$$

با توجه به هندسه مسئله، شرایط مرزی بی بعد عبارت اند از :

$$U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{روی دیواره افقی} \quad (۹)$$

$$U = V = 0, \theta = 1 \quad \text{روی دیواره سمت راست} \quad (۱۰)$$

$$U = V = 0, \theta = 0 \quad \text{روی دیواره سمت چپ} \quad (۱۱)$$

خواص نانوسیال شامل چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حجمی، ضریب پخش، لزجت استاتیک و ضریب هدایت حرارتی استاتیک، به ترتیب از روابط (۱۲) تا (۲۰) به دست می‌آیند [۲۷-۲۵]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (۱۲)$$

$$\alpha_e = \frac{k_e}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (۱۳)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (۱۴)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (۱۵)$$

$$\phi = \frac{V_p}{V_p + V_f} \quad (۱۶)$$

$$\mu_{eff} = \mu_{Static} + \mu_{Brownian} \quad (۱۷)$$

$$K_{eff} = k_{Static} + k_{Brownian} \quad (۱۸)$$

$$\mu_{Static} = \mu_f (1-\phi)^{-0.25} \quad (۱۹)$$

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{((k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p))}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (۲۰)$$

که در این روابط  $\mu_{Brownian}$  و  $k_{Brownian}$  از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\mu_{Brownian} = 5 \times 10^4 \lambda \phi \rho_f \sqrt{\frac{\kappa T}{2 \rho_s R_s}} \xi(T, \phi) \quad (۲۱)$$

$$k_{Brownian} = 5 \times 10^4 \lambda \phi \rho_f c_{p,f} \sqrt{\frac{\kappa T}{2 \rho_s R_s}} \xi(T, \phi) \quad (۲۲)$$

که در آن  $\rho_s$  و  $R_s$  به ترتیب چگالی و شعاع نانوذرات بوده و ثابت بولتزمن می‌باشد. برای نانوسیال آب-اکسید مس توابع  $\lambda$  و  $\gamma$  که به‌طور تجربی تخمین زده می‌شوند در محدوده  $300 < T(k) < 325$  عبارت‌اند از:

$$\lambda = 0.0137(100\varphi)^{-0.8229} \quad \varphi \leq 1\% \quad (23)$$

$$\lambda = 0.0011(100\varphi)^{-0.7272} \quad \varphi > 1\% \quad (24)$$

$$\xi(T, \varphi) = (-6.04\varphi + 0.4705)T + (1722.3\varphi - 134.63) \quad 1\% \leq \varphi \leq 4\% \quad (25)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی، عبارت است از:

$$h_{nf} = \frac{q}{T_h - T_c} \quad (26)$$

عدد ناسلت که طول مشخصه آن بر اساس ارتفاع محفظه سنجیده می‌شود عبارت است از

$$Nu = \frac{h_{nf} L}{k_f} \quad (27)$$

شار حرارتی دیواره‌ها بر واحد سطح عبارت است از:

$$q = -k_{nf} \left. \frac{T_h - T_c}{L} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right|_{Y=0} \quad (28)$$

با قرار دادن رابطه‌های (۱۹) و (۲۱) در رابطه‌ی (۲۰) عدد ناسلت به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$Nu = - \left( \frac{k_{nf}}{k_f} \right) \left. \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right|_{Y=0} \quad (29)$$

عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم عبارت است از:

$$Nu_{ave} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu dX \quad (30)$$

عدد رایلی تصحیح شده‌ای را به‌صورت زیر مشخص می‌کنیم:

$$Ra_m = Ra_f Da_{eq} \quad (31)$$

درحالی‌که عدد رایلی سیال چنین تعریف می‌شود:

$$Ra_f = \frac{g \beta H^3 (T_H - T_c)}{\nu \alpha} \quad (32)$$

$$Da_{eq} = \frac{K_{eq}}{H^2} \quad (33)$$

که در این روابط  $Da_{eq}$  و  $K_{eq}$  به ترتیب عدد دارسی و نفوذپذیری معادل می‌باشد. شایان ذکر است که اگر عدد رایلی سیال و عدد دارسی طوری انتخاب شوند که عدد رایلی اصلاح شده ثابت باشد، آنگاه موردهای زیادی برای تحلیل پیدا می‌شود. با این حال هر سیستم ممکن است از سیال مختلف و جامدهایی با جنس متفاوت تشکیل شود که آنچه مهم است، ثابت بودن عدد رایلی اصلاح شده برای هر سیستم متفاوت می‌باشد. تمامی موردهایی که در کار حاضر ارائه می‌گردد با در نظر گرفتن مرجع [۳۰] با عدد رایلی  $10^4$  انجام شده است.

$$K_{eq} = \frac{D_p^2 \phi^3}{c(1-\phi)^2} \begin{cases} c=144 \text{ for circular rods} \\ c=120 \text{ for square rods} \end{cases} \quad (34)$$

که در این رابطه  $D_p$  طول مشخصه‌ی تعریف شده می‌باشد و  $\phi = \frac{\Delta V_f}{\Delta V}$  می‌باشد، ضریب تخلخل  $\phi$  بر اساس رابطه‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\phi = 1 - N \frac{\pi \left( \frac{D_p}{H} \right)^2}{4} \text{ for circular rods} \quad (35)$$

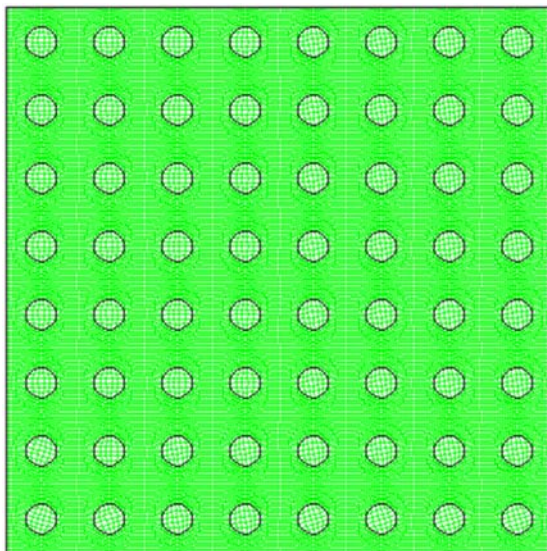
و نیز

$$\phi = 1 - N \left( \frac{D_p}{H} \right)^2 \text{ for square rods} \quad (36)$$

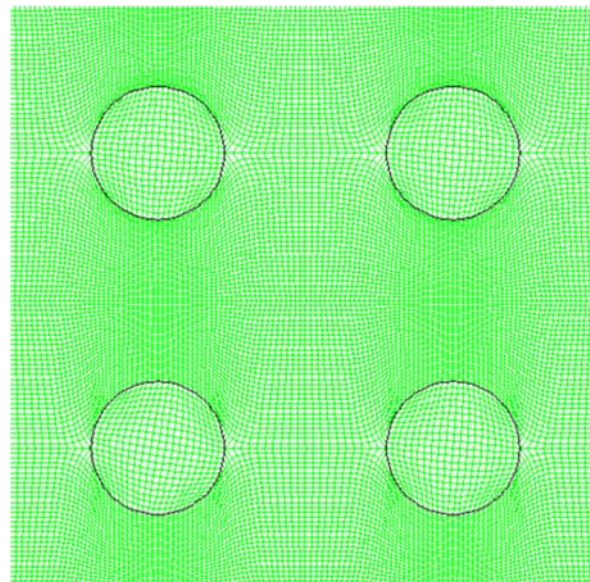
مقدار  $\phi$  به ازای تعداد  $N$  (تعداد موانع) مشخص ثابت می‌ماند.

### ۳-۲- شبکه بندی

در شکل (۲) شبکه‌بندی مورد بررسی برای دو حالت محفظه با موانع دایره‌ای به ترتیب با تعداد موانع برابر ۶۴ و ۴ را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در کل میدان محاسباتی از شبکه‌بندی با المان‌های چهاروجهی استفاده شده است. اضافه می‌شود که برای تمامی محفظه‌ها با موانع مختلف مطالعه شبکه‌بندی و نیز بررسی استقلال نتایج از نوع شبکه‌بندی بررسی شده است.



الف- شبکه‌بندی میدان محاسبات با تعداد موانع برابر ۶۴



ب- شبکه‌بندی میدان محاسبات با تعداد موانع برابر ۴

شکل ۲ - شبکه‌های به کار رفته در حل

جدول ۱-الف - اعتبارسنجی روش حل در مقایسه عدد ناسلت متوسط

عدد رایلی	قطر هیدرولیکی (m)	نتیجه مقاله	نتیجه حاضر
۱۰ <sup>۵</sup>	۰/۵	۴/۶۶۷	۴/۶۷۵

جدول ۱-ب - اعتبارسنجی روش حل در مقایسه عدد ناسلت متوسط

عدد رایلی	$\frac{k_f}{k_s}$	نتیجه مقاله	نتیجه حاضر
۱۰ <sup>۴</sup>	۱	۶/۳۵۶۸	۶/۴۳۱۵

جدول ۲ - بررسی استقلال از شبکه

تعداد شبکه	۲۲۰×۲۲۰	۲۰۰×۲۰۰	۱۸۰×۱۸۰	۱۴۰×۱۴۰	۱۰۰×۱۰۰
ناسلت کل	۸۴/۸	۸۴/۶	۸۳/۹	۸۱/۸	۷۷/۲

### ۳-۳ - اعتبارسنجی

برای اعتبار سنجی این شبیه‌سازی، یک محفظه با یک مانع مربعی شکل هادی حرارت که در مرکز محفظه قرار گرفته است مدل‌سازی شده است. نتایج این مدل‌سازی در جدول (۱-۱) ارائه شده است. عدد رایلی استفاده شده برای اعتبارسنجی روش عددی به کارگیری شده، برابر با ۱۰<sup>۵</sup> و نیز قطر هیدرولیکی ۰/۵ می‌باشد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از کار حاضر با دقت بالایی (خطای ۰/۱۷۱ درصد) بر داده‌های موجود در تحقیق براگا و دیلیموس [۲۸] منطبق می‌باشد؛ بنابراین می‌توان بیان نمود که روش حل مورد استفاده روش مناسبی برای شبیه‌سازی موارد مشابه می‌باشد. برای اعتبار سنجی منبع دایره ای نیز ناسلت خروجی از کار حاضر با مرجع [۲۸] مقایسه شده و در جدول (۱-۲) ارائه شده است.

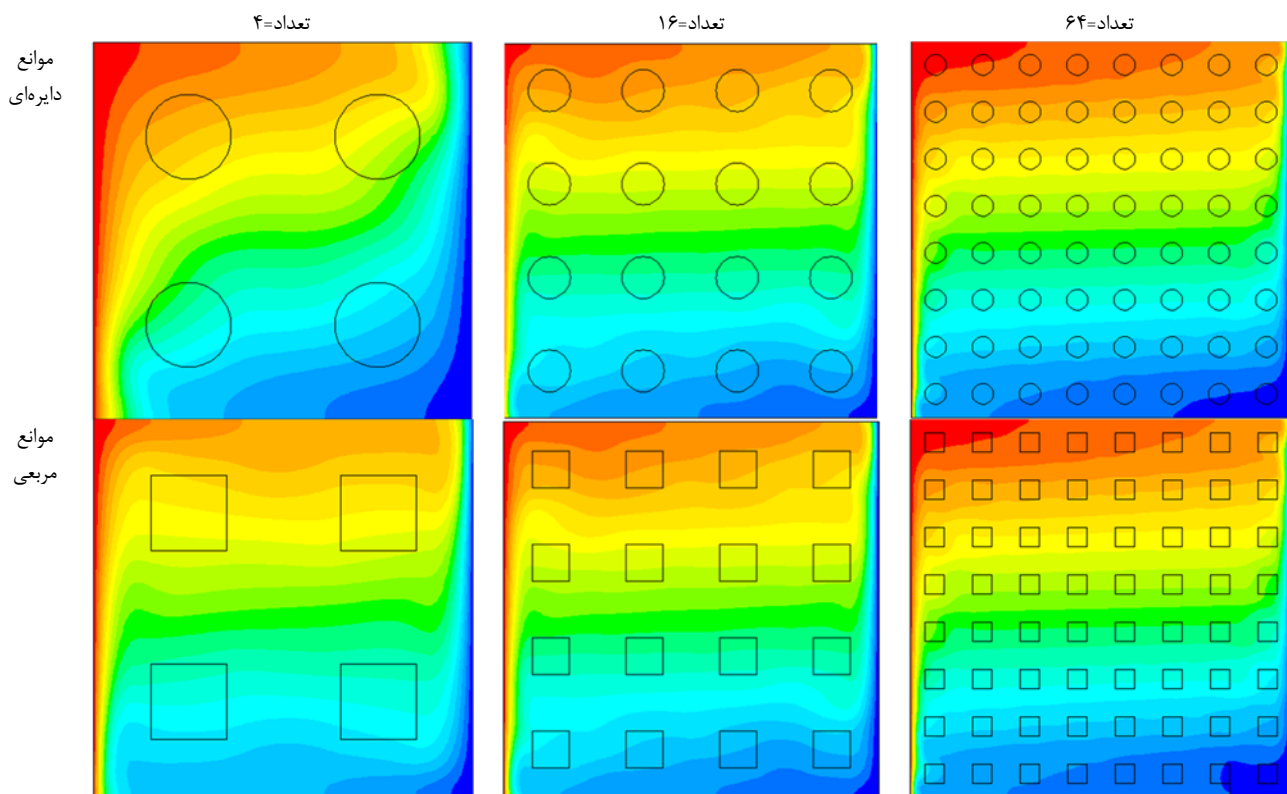
علاوه بر اعتبارسنجی و مقایسه نتایج کار حاضر با مرجع [۲۸] برای اطمینان از عدم حساسیت نتایج به تعداد شبکه، استقلال از شبکه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ناسلت برای عدد رایلی اصلاح شده ۱۰<sup>۴</sup> برای حفره با ۶۴ مانع مربعی در جدول (۲) ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) استقلال از شبکه عدم وابستگی نتایج را به تعداد مش مشاهده می‌شود و برای ۶۴ مانع مربعی تعداد ۴۰۰۰۰ شبکه در نظر گرفته شد.

### ۴-نتایج

برای میله‌های دایره‌ای شکل شبکه‌بندی با اندازه‌های ۱۶۰×۱۲۰، ۱۶۰×۱۲۰، ۲۰۰×۲۰۰ انجام گرفته است. عدد رایلی اصلاح شده ۱۰<sup>۴</sup> در نظر گرفته شده است. عدد دارسی طبق رابطه‌ی بیان شده که متناسب با ضریب نفوذپذیری معادل ( $K_{eq}$ ) است، محاسبه می‌شود. اگر دو هندسه دارای ضریب تخلخل مشابه باشند، آنگاه مقدار محاسبه شده‌ی  $K_{eq}$  برای میله‌ی دایره‌ای شکل بزرگ‌تر از میله‌ی مربعی شکل است. همچنین برای یک آرایش شامل میله‌های مربعی یا دایره‌ای، به ازای مقادیر مختلف  $D_p$ ، مقدار  $K_{eq}$  تغییر خواهد کرد؛ بنابراین با توجه به تعریف  $Da_{eq}$  و  $Ra_f$ ، برای عدد دارسی متفاوت باید عدد رایلی سیال  $Ra_f$  را طوری انتخاب کرد که عدد



رایلی اصلاح شده  $Ra_m$  ثابت باشد؛ بنابراین ضریب  $\beta$  به عنوان پارامترهای در نظر گرفته شده است که وقتی نفوذ پذیری تغییر می کند عدد رایلی اصلاح شده ثابت نگه داشته شود، در حالی که سایر کمیت ها ثابت هستند. در کار حاضر کلیه ی تحلیل ها بر اساس  $\phi = 0.84$  انجام شده است. همچنین عدد پرانتل و نسبت ضریب هدایت حرارتی  $\frac{k_s}{k_f}$  هر دو برابر ۱ در نظر گرفته شده است. خطوط هم دما برای موانع مربعی و دایره ای به تعداد ۴، ۱۶ و ۶۴ در شکل (۳) نشان داده شده است. همان گونه که نمایان می باشد، نحوه ی توزیع دما برای محفظه با تعداد موانع برابر ۴ برای موانع دایره ای با مربعی دارای تفاوت هایی می باشند اما به تدریج با افزایش تعداد موانع توزیع دما تقریباً مستقل از هندسه مانع می باشد. این مهم به دلیل مقاومتی است که جریان در برخورد سطوح جامد با آن روبه رو می شود. جدول (۳) نمایانگر عدد ناسلت کل در تمام محفظه های مذکور می باشد. مشاهده می شود که با افزایش تعداد موانع ناسلت کل افزایش می یابد. همچنین در مقایسه بین موانع دایره ای و مربعی مشاهده می شود که عدد ناسلت کل برای این دو حالت تفاوت محسوسی ندارد.

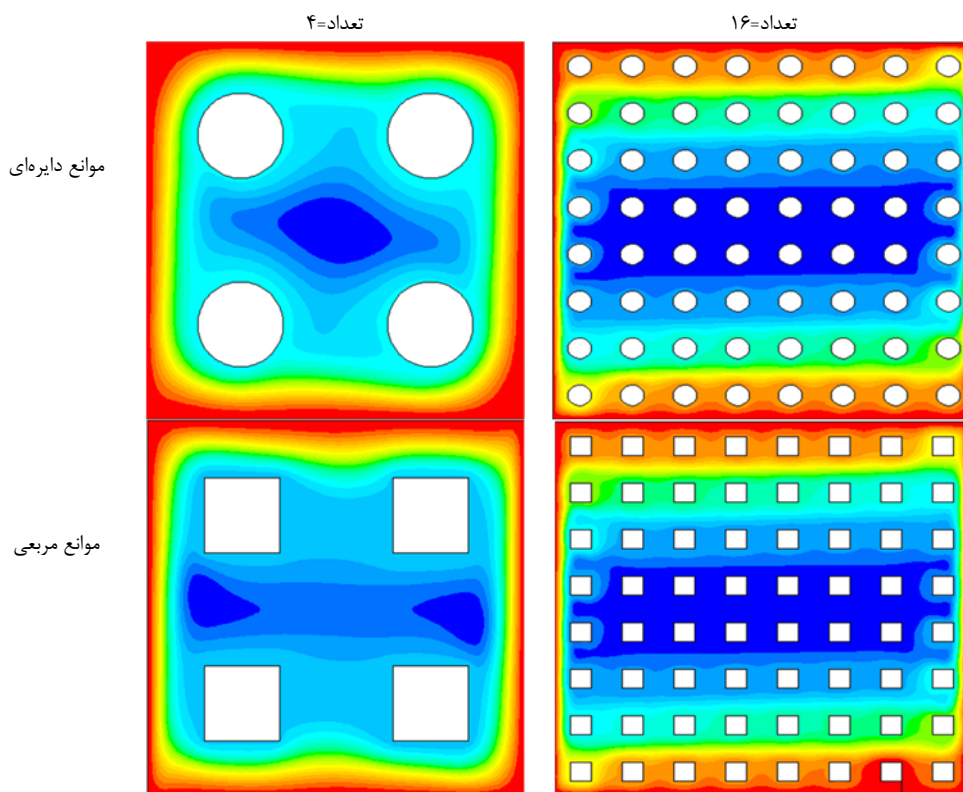


شکل ۳ - توزیع دما برای محفظه با تعداد موانع و شکل های مختلف

جدول ۳ - نمایانگر عدد ناسلت کل در تمام محفظه ها

تعداد موانع	۴ مانع		۱۶ مانع		۶۴ مانع	
	دایره ای	مربعی	دایره ای	مربعی	دایره ای	مربعی
ناسلت کل	۴۰/۶۲	۴۱/۰۱	۶۱/۷	۶۲/۱۱	۸۴	۸۴/۶

شکل (۴) خطوط جریان برای محفظه با موانع دایره‌ای و مربعی با تعداد به ترتیب ۴ و ۶۴ را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در محفظه با تعداد موانع کمتر نحوه‌ی توزیع خطوط جریان وابسته به شکل موانع می‌باشد اما با افزایش تعداد موانع این وابستگی کاهش خواهد یافت. دلیل این مهم به دلیل تغییر در سرعت جریان با توجه به وجود موانع مربعی و دایره‌ای می‌باشد و از آنجاکه در هنگام وجود ۴ مانع یعنی تعداد کم موانع سبب تغییر محسوس‌تر در سرعت جریان با توجه به تغییر شکل موانع می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که در تعداد موانع پایین‌تر سرعت جریان و پیرو آن خطوط دمایی وابسته به شکل موانع می‌باشند. اما از دیدگاه تغییر در اعداد رایلی سیال می‌توان بیان نمود که برای میله‌های دایره‌ای عدد رایلی  $5/117 \times 10^{-4}$  تا  $0/8188 \times 10^{-2}$  تغییر می‌کند. درحالی‌که دامنه‌ی تغییرات در موانع مربعی  $4/823 \times 10^{-4}$  تا  $0/7717 \times 10^{-2}$  می‌باشد. همچنین، مقادیر کلی عدد ناسلت متوسط زمانی که مسئله با میله‌های دایره‌ای بحث می‌شود کمی پایین‌تر از موانع مربعی می‌باشد. توضیح ممکن‌ی که برای این رفتار می‌توان داد این است که وجود جدایی جریان در محفظه‌ای که دارای موانع مربعی می‌باشد عامل اصلی تحریک جریان و سبب اختلاط گرمایی و افزایش انتقال حرارت در محفظه می‌شود؛ اما در مدل بررسی‌شده در این پروژه، تفاوت در نوع موانع آن‌چنان زیاد نیست و از دید مهندسی هردو مانع مربعی و دایره‌ای نقش مشابهی را در فرایند انتقال حرارت بازی می‌کنند. از طرفی، طبق نظر براگا و دیلیموس تعداد بالای موانع در یک محفظه‌ی تمیز خیلی شبیه حالتی است که جریان بین دو مدل ماکروسکوپی و میکروسکوپی است. به عبارتی وقتی تعداد موانع بالا می‌رود، این دو شیوه بسیار به هم نزدیک می‌شوند.



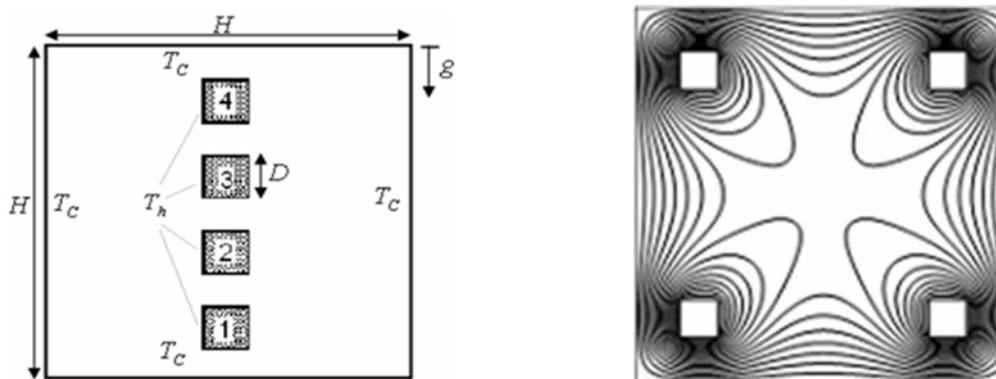
شکل ۴ - توزیع خطوط جریان در محفظه با موانع مختلف

درحالی که مدل ماکروسکوپیک زمانی که تعداد موانع در محفظه بالا می‌رود، به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود که در عوض به موردهایی با نفوذپذیری کمتر مرتبط می‌شود. نکته اینجاست که با نفوذپذیری کمتر، تفاوت زیادی بین عدد ناسلت متوسط دو مدل دیده می‌شود. بعلاوه نتایج نشان می‌دهد که شدت بازگردش جریان، با کاهش نفوذپذیری متوسط، افزایش می‌یابد و الگوی جریان، شامل سلول‌های ابتدایی با سرعت نسبتاً بالا می‌شود که پیرامون تمامی حفره چرخش می‌یابد. هرچند با چرخش مجدد دوم که در مرکز حفره ظاهر می‌شود، برای اعداد داری بالاتر تحلیل شده، با کاهش نفوذپذیری تمایل به ناپدید شدن دارد. به طریق مشابه، گرادیان دما در نزدیکی دیواره‌های عمودی بیشتر است اما در مرکز کاهش می‌یابد. از طرفی مشخص شده است که با افزایش موانع، چینه‌بندی دمایی بیشتر می‌شود.

زمانی که تعداد میله‌های مربعی افزایش پیدا می‌کند و سایز آن کاهش می‌یابد، جریان تمایل دارد که از سمت دیواره‌ها به سمت مرکز حفره انتقال یابد. این پدیده که در کارهای دیگران نیز دیده شده است به‌عنوان یک پاسخ سیستم در برابر نزدیک شدن موانع جامد به سطح و افزایش مقاومت جریان در نزدیکی دیوار جامد می‌باشد. پیشینه‌ی موجود نشان می‌دهد که برای رژیم غیرداری در یک حفره متخلخل، جریان سیال و انتقال گرما به عدد رایلی سیال  $Ra_f$  و به عدد داری  $Da$  بستگی دارد؛ در حالی که دیگر پارامترها نظیر ضریب نفوذ، عدد پراتل و نسبت ضریب هدایت بین سیال و جامد ثابت نگه داشته شود. در کار براگا و دیلیموس نشان داده شد که برای یک  $Ra_m$  ثابت مقدار پایین نفوذپذیری،  $Da_{eq}$  پایین و عدد ناسلت متوسط بالاتر در دیوار با دمای بالا خواهیم داشت. در میله‌های مربعی لایه‌ی مرزی تشکیل شده به خاطر عبور سیال از روی موانع، با داشتن لبه‌ی تیز جریان سریع‌تر جدا می‌شود. که جدایش جریان برای میله‌های دایره‌ای شکل دیرتر اتفاق می‌افتد. پس از جدایش جریان از لبه‌ی تیز موانع مربعی، گردابه‌های بزرگی در پایین دست جریان ظاهر می‌شود. قدرت حرکت چرخش مجدد در حال گذار از موانع مربعی، جریان سیال را نسبت به میله‌های دایره‌ای با شدت بیشتری آشفته می‌کند. در میله‌های دایره‌ای جریان تمایل دارد تا به سطوح جامد بچسبد، که به دلیل چنین خط جریان کمتری عدد ناسلت متوسط برای شکل مربعی نسبت به میله‌ی دایره‌ای زیاد می‌شود و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

#### ۴-۱- موانع به عنوان منبع حرارتی

در این بخش انتقال حرارت در محفظه در حالتی محاسبه می‌شود که موانع موجود به‌عنوان منبع حرارتی باشند و دیواره‌ها سرد باشند. از آنجایی که تعداد زیاد منابع حرارتی تحلیل را دچار مشکل می‌کند از چهار المان حرارتی استفاده شده که با تغییر مکان این المان‌ها نوعی آرایش بهینه حاصل می‌شود که بتوان بیشترین انتقال حرارت را داشت. شکل (۵) یک محفظه با چهار المان حرارتی است که ابعاد مهم در شکل نشان داده شده است. اندازه نسبت  $H/D=10$  می‌باشد و فاصله‌ی بلوک‌ها تا دیواره را و فاصله‌ی بین آن‌ها  $0.12 H$  در نظر گرفته شده است. دیواره‌های محفظه همگی با دمای سرد  $T_c$  هستند و المان‌ها با دمای یکسان  $T_h$  هستند.



شکل ۵ - نحوه‌ی قرارگیری موانع به عنوان منبع حرارتی

در معادلات حاکم شرط تعادل حرارتی وجود نداشته و انتقال حرارت طبیعی نیز در این مسئله حاکم است. معادلات حل شده شامل تکانه و انرژی هستند که با نرم‌افزار فلونت حل شده است. تحلیل این مسئله برای دو آرایش متفاوت مربعی و افقی انجام شد. بررسی‌های انجام شده برای این دو آرایش در سه عدد رایلی متفاوت صورت گرفته است. جدول (۴) و (۵) مقادیر مختلف عدد ناسلت برای دو آرایش متفاوت مربعی و افقی را نشان می‌دهد که جدول اول مربوط به آرایش مربعی و جدول دوم مربوط به آرایش افقی می‌باشد.

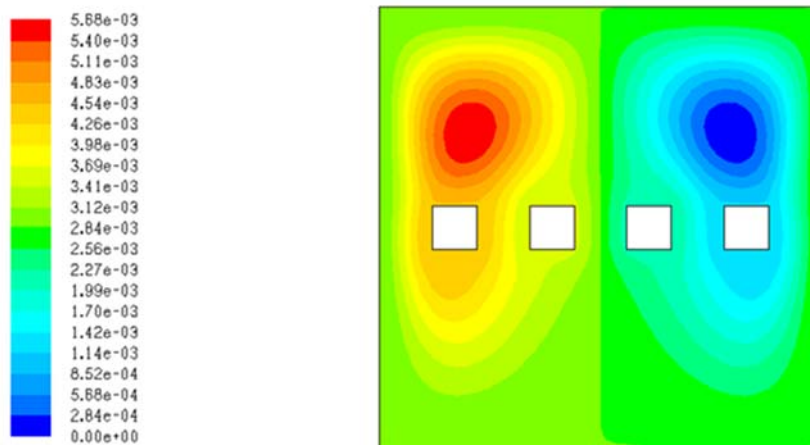
جدول ۴ - عدد ناسلت مربوط به آرایش مربعی

Ra	Sq 1	Sq2	Sq3	Sq 4
Sq array	NU	NU	NU	NU
$10^3$	۱۰/۷۱۶	۱۰/۷۱۶	۱۰/۶۶	۱۰/۶۶
$10^4$	۱۰/۹۰	۱۰/۹۰	۱۰/۵۱	۱۰/۵۱
$10^5$	۱۲/۹۴	۱۲/۲۹۴	۱۰/۲۸	۱۰/۲۸

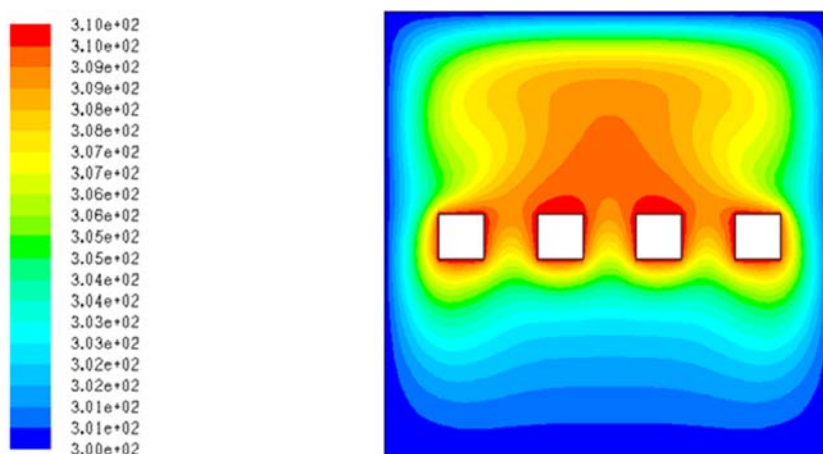
جدول ۵ - عدد ناسلت مربوط به آرایش افقی

Ra	Ver 1	Ver2	Ver3	Ver 4
Verti array	NU	NU	Nu	Nu
$10^3$	۷/۴۱	۲/۸۰	۲/۸۰	۷/۴۱
$10^4$	۷/۶۵	۳/۰۰	۳/۰۰	۷/۶۵
$10^5$	۱۰/۵۴	۷/۰۰	۷/۰۰	۱۰/۵۴

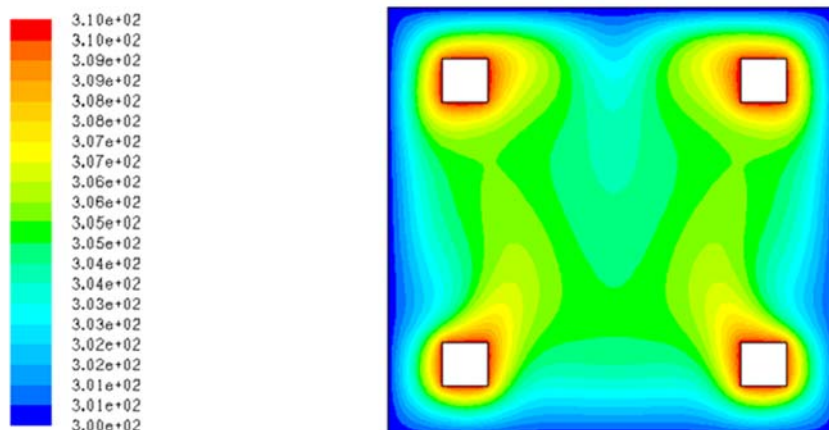
از نتایج فوق مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رایلی میزان انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده برای کانتورهای دما و خطوط جریان (مطابق شکل‌های ۶ تا ۹) مشاهده می‌شود که برای محفظه دارای المان حرارتی با آرایش مربعی انتقال حرارت هدایت غالب است و برای آرایش افقی المان‌ها انتقال حرارت جابه‌جایی غالب است. با افزایش عدد رایلی و در نتیجه زیاد شدن جریان چرخشی در برخی نواحی محفظه، نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی در مقایسه با هدایت، برخلاف کم بودن سهمش بیشتر افزایش پیدا می‌کند. همچنین در آرایش افقی با افزایش عدد رایلی سیال، عدد ناسلت متوسط محفظه نسبت به آرایش مربعی بیشتر افزایش می‌یابد. که می‌تواند به خاطر غالب بودن انتقال حرارت هدایت در آرایش مربعی باشد؛ و دوم اینکه جریان چرخشی با سرعت بیشتری در آرایش افقی جریان دارد که این موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود.



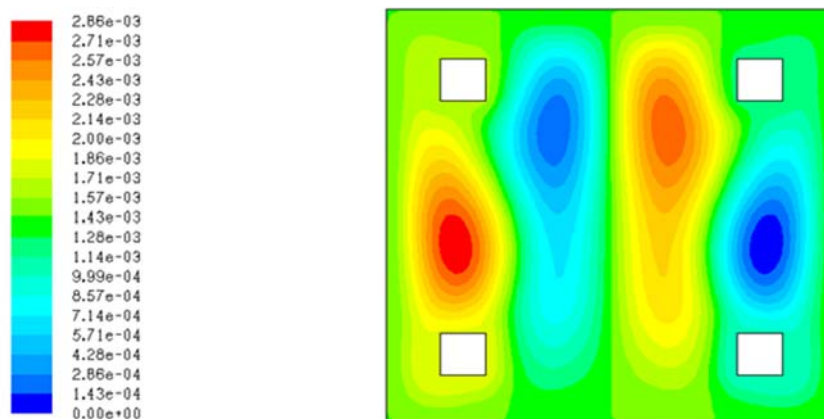
شکل ۶ - خطوط جریان برای آرایش افقی موانع مربعی



شکل ۷ - کانتور دما (بر حسب کلوین) برای آرایش افقی موانع مربعی



شکل ۸ - کانتور دما (بر حسب کلوین) برای حالتی که موانع مربعی در ۴ گوشه حفره قرار دارند



شکل ۹ - خطوط جریان برای حالتی که موانع مربعی در ۴ گوشه حفره قرار دارند

#### ۴-۲-۴ اثرات افزودن نانوسیال

در این بخش به بررسی تاثیر استفاده از نانو سیال بر رفتار جریان پرداخته می‌شود. کلبه محاسبات برای چهار مانع صورت گرفته است. نتایج حل عددی در مقاله حاضر یک افزایش در عدد ناسلت میانگین و همچنین ضریب انتقال حرارت را، برای هنگامی که کسر حجمی نانوسیال رقیق افزایش یابد، نشان می‌دهد. بر اساس آنالیز ابعادی، می‌توان نشان داد که ضریب انتقال حرارت جابجایی،  $h$ ، به شکل  $h = \frac{k_f}{\delta_t}$  داده می‌شود که در آن  $k_f$  ضریب رسانش حرارتی نانوسیال و  $\delta_t$  ضخامت لایه مرزی دمایی است. از این رو، افزایش در نرخ انتقال حرارت را می‌توان به دو عامل اصلی غالب در ناحیه لایه مرزی، یعنی افزایش ضریب حرارتی نانوسیال و ثانیاً تغییر (اختلال) در ضخامت لایه مرزی، نسبت داد. مدت زمان لازم برای رسیدن به همگرایی پاسخ که به معنی رسیدن به حالت پایا است، برای نانوسیال با پایه آب در مقایسه با نانوسیالات آب/اکسید مس اتیلن گلیکول و آب/اکسید مس پروپیلن گلیکول، زمان کمتری بوده و زودتر به حالت پایا می‌رسد.

### جدول ۶ - خواص ترموفیزیکی آب، آب/ اتیلن گلیکول و آب/ پروپیلن گلیکول با پایه آب

(بر مبنای شرایط استاندارد ترمودینامیکی) [۳۱]

سیال	وزن مخصوص (SG)	ظرفیت حرارتی مخصوص (C <sub>p</sub> )	دمای جوش (°C)	دمای انجماد (°C)
آب	۱	۱	۱۰۰	۰
اتیلن گلیکول (۶۰٪ حجمی)	۱/۰۹	۰/۷۶۸	۱۹۷	-۵۲/۸
پروپیلن گلیکول (۶۰٪ حجمی)	۱/۰۴۶	۰/۸۰۵	۱۰۷/۲	-۴۸

این رفتار می‌تواند به دلیل مقادیر بالاتر ضریب نفوذ مؤثر و نسبت ظرفیت حرارتی حجمی نانوسیالات با پایه آب در مقایسه با نانوسیالات آب/ اکسید مس اتیلن گلیکول و آب/ اکسید مس پروپیلن گلیکول باشد. خواص ترموفیزیکی این سیالات در جدول (۶) آمده است. برای پیدا کردن درصد افزایش در انتقال حرارت با استفاده از نانو سیالات در محیط متخلخل، از سه نوع نانو سیال برای محاسبه عدد ناسلت متوسط در حالت پایا استفاده شده و مقادیر به دست آمده با حالت مایع خالص در محیط متخلخل مقایسه شده است. مقادیر پارامترهای استفاده شده در محاسبات در جدول (۷) آورده شده است. توضیح کلی که راجع به روند افزایش و کاهش ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت در اشکال (۱۰-۱۳) وجود دارد از قرار زیر است:

روشهای مرسوم برای مدلسازی انتقال حرارت نانوسیالات شامل روش تکفازی و دوفازی می‌شود. در روش تکفازی که در کار حاضر هم از این روش استفاده شده است خواص ترموفیزیکی نانوسیال جایگزین خواص ترموفیزیکی سیال پایه در معادلات بقا می‌شود و نانوسیال به صورت یک سیال جدید در معادلات بقا در نظر گرفته می‌شود. بنابراین نتایج مربوط به انتقال حرارت جابجایی آزاد به شدت وابسته به ضریب هدایت و ویسکوزیته نانوسیالات است. در حالت کلی با افزایش کسر حجمی نانوسیالات ضریب هدایت افزایش می‌یابد و بنابراین انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش کسر حجمی باعث افزایش ویسکوزیته نانوسیالات می‌شود و افزایش ویسکوزیته باعث کاهش سرعت شده و بنابراین انتقال حرارت در جریانهای آزاد که سرعت بسیار پایین بوده و جریان بخاطر تغییر چگالی اتفاق می‌افتد و بنابراین تاثیر ویسکوزیته بسیار قابل ملاحظه است. بنابراین با افزایش کسر حجمی نانوسیال با توجه به اثر ویسکوزیته و ضریب هدایت ممکن است باعث کاهش و یا افزایش انتقال حرارت شود.

شکل (۱۰) نشانگر مقایسه بین تغییرات در اعداد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت متوسط در هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول در مقایسه با نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکول می‌باشد. مشاهده می‌شود که هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول میزان ضریب انتقال حرارت متوسط و عدد ناسلت متوسط از یک درصد تا ۲ درصد ابتدا افزایش یافته و پس از آن با استفاده از نانوسیال بیشتر از ۲ درصد ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت کاهش پیدا میکند این تغییرات برای نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکول در بالاتر از سه درصد مشاهده میشود. در شکل (۱۰) در نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول تا کسر حجمی ۲ درصد سهم افزایش انتقال حرارت به واسطه افزایش ضریب هدایت جابجایی بیشتر از کاهش انتقال حرارت به خاطر افزایش ویسکوزیته است و بنابراین انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی تا ۲ درصد افزایش

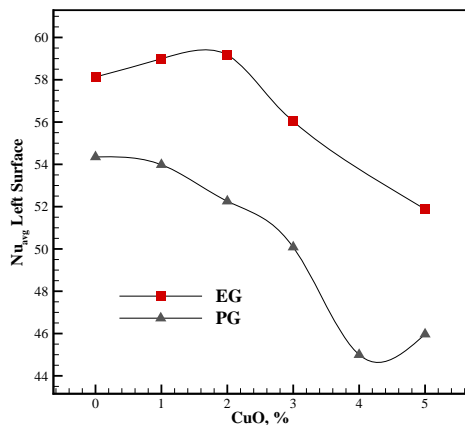
می یابد و در این کسر حجمی بیشینه مقدار خود را تجربه می کند و در کسر حجمی بیشتر از ۲ درصد ویسکوزیته تاثیر غالب بر انتقال حرارت دارد و بنابراین با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت کاهش می یابد. در نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکول سهم تاثیر ویسکوزیته بیش از ضریب هدایت است و افزودن نانوذره منجر به کم شدن انتقال حرارت می شود. در مقایسه بین تاثیرات نانوسیالات اکسید مس اتیلن گلیکول و اکسید مس پروپیلن گلیکول نشان داده شده است که مقدار متوسط ضریب انتقال حرارت و ناسلت متوسط در تمامی درصدهای نانوسیالات برای نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول بیشتر از نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکول میباشد. اضافه میگردد که این شکل ها برای عدد رایلی برابر با  $1/2958 \times 10^6$  ترسیم گردیده است. شکل (۱۱) نشانگر تغییرات ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت متوسط با تغییر در میزان درصد نانوسیال های اکسید مس پروپیلن گلیکول و اکسید مس اتیلن گلیکول برای عدد رایلی برابر با  $5/184 \times 10^6$  می باشد. مشاهده می گردد که در این عدد رایلی هنگام استفاده از نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول در درصدهای پایین تر از ۲٪ ضریب انتقال حرارت و ناسلت متوسط افزایش و پس از آن کاهش مییابد اما برای نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکول کاهش در میزان ضریب انتقال حرارت و ناسلت متوسط در بالاتر از یک درصد نانوسیال اتفاق میافتد.

#### جدول ۷ - خواص ترموفیزیکی نانوسیالات آب، آب/اکسید مس اتیلن گلیکول و آب/اکسید مس پروپیلن گلیکول با

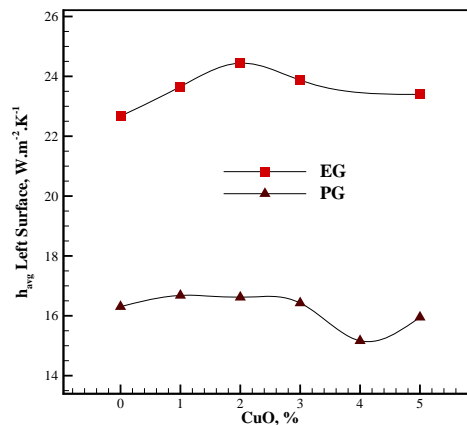
نانوذرات CuO با غلظت های مختلف  $D_{avr}=50nm, T=20^{\circ}C$  [۳۱]

سیال	ویسکوزیته (kg/ms)	هدایت حرارتی (W/mK)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)	چگالی (kg/m3)
Water	۰/۰۰۰۹۶	۰/۶۰۲	۴۱۸۳/۲	۹۹۷/۸
Water + 5% CuO	۰/۰۰۳۱۲	۰/۶۹۴	۳۹۹۳/۳	۱۳۹۴/۸
ethylene glycol				
EG/Water (60:40%)	۰/۰۰۵۲	۰/۳۹	۳۰۹۴	۱۰۶۶/۲
EG/Water+1% CuO	۰/۰۰۶۱۵	۰/۴۰۱	۳۰۶۶/۹	۱۱۴۴/۹
EG/Water+2% CuO	۰/۰۰۶۸۳	۰/۴۱۳	۳۰۳۹/۸	۱۲۲۳/۵
EG/Water+3% CuO	۰/۰۰۹۰۸	۰/۴۲۶	۳۰۱۲/۷	۱۳۰۲/۲
EG/Water+4% CuO	۰/۰۱۱۳۸	۰/۴۳۸	۲۹۸۵/۶	۱۳۸۰/۹
EG/Water+5% CuO	۰/۰۱۴	۰/۴۵۱	۲۹۵۸/۶	۱۴۵۹/۵
EG/Water+6% CuO	۰/۰۱۸۷۵	۰/۴۶۴	۲۹۳۱/۵	۱۵۳۸/۲
propylene glycol				
PG/Water (60:40%)	۰/۰۰۹۳۱	۰/۳	۳۱۶۱/۹	۱۰۲۱/۷
PG/Water+1% CuO	۰/۰۱۰۶۶	۰/۳۰۹	۳۱۳۴/۱	۱۱۰۰/۸
PG/Water+2% CuO	۰/۰۱۳۲۷	۰/۳۱۸	۳۱۰۶/۳	۱۱۷۹/۹
PG/Water+3% CuO	۰/۰۱۶۹۳	۰/۳۲۸	۳۰۷۸/۶	۱۲۵۹
PG/Water+4% CuO	۰/۰۲۱۲۶	۰/۳۳۷	۳۰۵۰/۸	۱۳۳۸/۱
PG/Water+5% CuO	۰/۰۲۷۱۱	۰/۳۴۷	۳۰۲۳	۱۴۱۷/۲





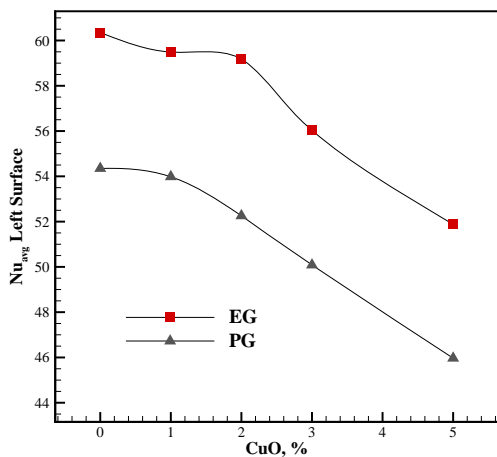
ب- تغییرات ناسلت بر حسب درصد نانوسیال



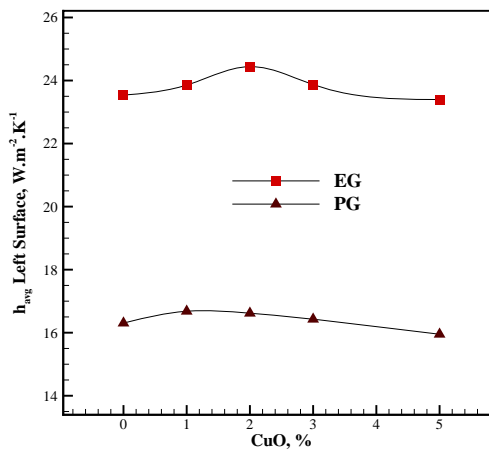
الف- تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب درصد نانوسیال

شکل ۱۰- تغییرات در اعداد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت متوسط نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول و نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکول برای عدد رایلی برابر با  $1/2958 \times 10^6$

بعلاوه، در کلیه درصد نانوسیالها میزان ضریب هدایت حرارتی و بدنبال آن میزان ناسلت متوسط بالاتر می باشد. دلیل این پدیده را می توان این گونه بیان نمود که تغییرات در مقادیر عدد ناسلت متوسط به اعداد رایلی بهبود یافته و پراتل سیال در محیط متخلخل وابسته است. به عبارتی دیگر، با افزایش در غلظت نانوذرات، عدد رایلی بهبود یافته کاهش، و با افزایش دمای سطح عدد رایلی بهبود یافته افزایش می یابد. در شکل (۱۱) برای هر دو نوع نانوسیال افزایش ویسکوزیته و کاهش سرعت سهم بیشتری را نسبت به افزایش ضریب هدایت دارد و بنابراین انتقال حرارت به صورت پیوسته با افزایش کسر حجمی کاهش می یابد.

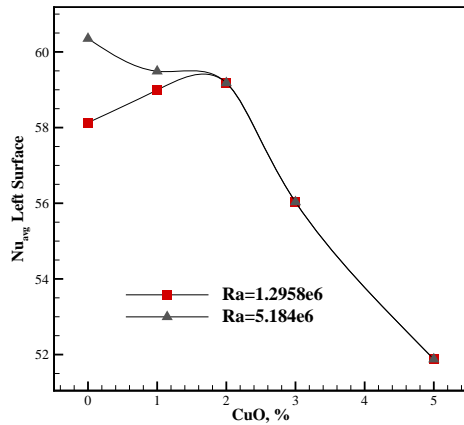


ب- تغییرات ناسلت بر حسب درصد نانوذرات

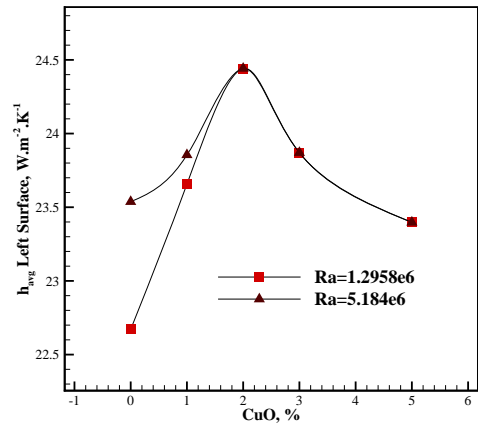


الف- تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط بر حسب درصد نانوذرات

شکل ۱۱- اعداد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت متوسط نانوذرات اکسید مس اتیلن گلیکول در مقایسه با نانوذرات اکسید مس پروپیلن گلیکول در  $Ra=5/184 \times 10^6$

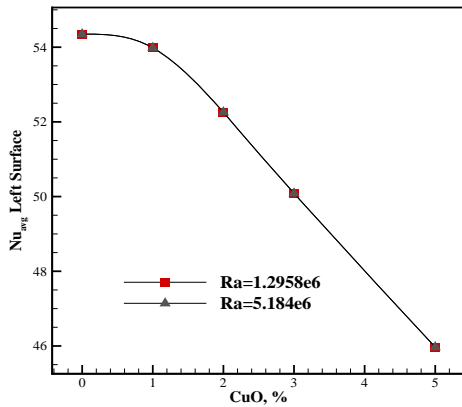


ب- ناسلت متوسط

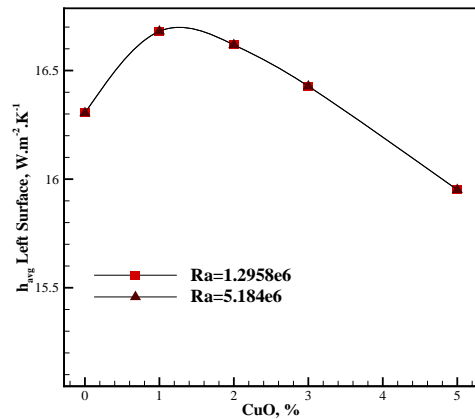


الف- ضریب انتقال حرارت متوسط

شکل ۱۲ - مقایسه عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول در  $Ra=1/2958 \times 10^6$  و  $Ra=5/184 \times 10^6$



ب- ناسلت متوسط



الف- ضریب انتقال حرارت متوسط

شکل ۱۳ - مقایسه عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکول در  $Ra=1/2958 \times 10^6$  و  $Ra=5/184 \times 10^6$

شکل (۱۲) تغییرات عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول را در عدد رایلی  $1/2958 \times 10^6$  و  $5/184 \times 10^6$  مقایسه می‌کند. مشخص است که با افزایش درصد نانوسیال از ۲ درصد به بالا، ضریب انتقال حرارت و نیز ناسلت متوسط مستقل از عدد رایلی می‌گردد. این پدیده با توجه به تغییرات کم در دمای میدان محاسباتی در استفاده از این نانوذرات، اتفاق می‌افتد. مقایسه عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکول در  $Ra=1/2958 \times 10^6$  و  $Ra=5/184 \times 10^6$  مطابق شکل‌های (۱۳) می‌باشد. مشاهده می‌گردد که تغییر در عدد رایلی تأثیری بر اعداد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت متوسط ندارد. دلیل این مهم همچنان که در بالا اشاره شد به دلیل تغییرات کم در دمای میدان محاسباتی در استفاده از این نانوذرات، اتفاق می‌افتد.

به طور کلی می توان گفت در اعداد رایلی بالا تاثیرات کسر حجمی بر روی ضریب انتقال حرارت مشهود نیست به دلیل اینکه در رایلی های بالا جریانهای گردابی افزایش می یابد و خطوط همدمما فرم ثابتی به خود میگیرد و گرادیان دما با افزایش رایلی تغییر محسوسی نمی کند و بنابراین تغییر انتقال حرارت قابل ملاحظه نیست.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله خصوصیات حرارتی در یک محفظه که دارای موانع عمودی (دایره ای و مربعی) جامد هادی حرارت می باشد، با استفاده از روش های عددی و از دیدگاه ماکروسکوپی بررسی شده است. مسئله ی انتقال حرارت در این سامانه شامل جابجایی طبیعی در محفظه می باشد. معادلات حاکم بر مسئله از روش حجم محدود توسط نرم افزار فلونت حل شد. در ادامه مقادیر متوسط عدد ناسلت در دیواره ی گرم برای محفظه با موانع مربعی با عدد دارسی مختلف، با محفظه با موانع دایره ای مقایسه شده است. تمامی مقایسه ها برای حالت های مختلف، با عدد رایلی اصلاح شده صورت گرفته است. نتایج بدست آمده به اختصار در زیر بیان گردیده است:

۱. اگر دو هندسه دارای ضریب تخلخل مشابه باشند آنگاه مقدار  $Keq$  برای موانع دایره ای بزرگ تر از موانع مربعی است، ولی مقادیر عدد ناسلت متوسط برای موانع دایره ای کمتر از موانع مربعی خواهد بود.
۲. زمانی که تعداد موانع موجود در محفظه کم است نحوه توزیع دما و خطوط جریان وابسته به شکل موانع می باشد، اما با افزایش تعداد موانع، این وابستگی کاهش می یابد.
۳. برای محفظه دارای المان حرارتی با آرایش مربعی انتقال حرارت هدایت غالب است و برای آرایش افقی المان ها انتقال حرارت جابه جایی غالب است.
۴. با افزایش عدد رایلی و در نتیجه زیاد شدن جریان چرخشی در برخی نواحی محفظه، نرخ انتقال حرارت جابه جایی در مقایسه با هدایت، برخلاف کم بودن سهمش بیشتر افزایش پیدا می کند.
۵. یک افزایش در عدد ناسلت میانگین و همچنین ضریب انتقال حرارت را، برای هنگامی که کسر حجمی نانوسیال رقیق افزایش یابد، مشاهده می شود.
۶. مدت زمان لازم برای رسیدن به حالت پایا برای نانوسیال با پایه آب در مقایسه با نانوسیالات آب/ اکسید مس اتیلن گلیکل و آب/ اکسید مس پروپیلن گلیکل کمتر می باشد.
۷. تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب عدد ناسلت برای نانوسیال اکسید مس اتیلن گلیکل و نانوسیال اکسید مس پروپیلن گلیکل با افزایش درصد نانوذرات این تغییرات مستقل از عدد رایلی می گردد.

## مراجع

- [1] Masuda, H., Ebata, A., and Teramae, K., "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-fine Particles, Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-fine Particles: Dispersion of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> Ultra-fine Particles", Nestu Bussei Vol. 7, pp. 227-233, (1993).

- [2] Chamkha, A., Ismael, M., Kasaeipoor, A., and Armaghani, T., "Entropy Generation and Natural Convection of CuO-water Nanofluid in C-shaped Cavity under Magnetic Field", *Entropy*, Vol. 18, No. 2, 50, (2016).
- [3] Kasaeipoor, A., Ghasemi, B., and Raisi, A., "Magnetic Field on Nanofluid Water-Cu Natural Convection in an Inclined T Shape Cavity", *Modares Mechanical Engineering Journal*, (2014).
- [4] Aminossadati, S. M., and 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, pp. 672-678, (2011).
- [5] Maghrebi, M. J., Nazari, M., and Armaghani, T., "Forced Convection Heat Transfer of Nanofluids in a Porous Channel", *Transport in Porous Media*, Vol. 93, pp. 401-413, (2012).
- [6] Hajipour, M., and Molaei Dehkordi, A., "Mixed-convection Flow of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O Nanofluid in a Channel Partially Filled with Porous Metal Foam: Experimental and Numerical Study", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 53, pp. 49-56, (2014).
- [7] Rao, S. S., and Srivastava, A., "Interferometry-based Whole Field Investigation of Heat Transfer Characteristics of Dilute Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 79, pp. 166-175, (2014).
- [8] Rabeti, M., "Free Convection Heat Transfer of Nanofluids from a Horizontal Plate Embedded in a Porous Medium", *Advanced Energy: An International Journal*, Vol. 1, pp. 23-32, (2014).
- [9] Makungu, J., Mureithi, E., and Kuznetsov, D., "Free Convection Flow Past an Impermeable Wedge Embedded in Nanofluid Saturated Porous Medium with Variable Viscosity Base Fluid", *Engineering Mathematics Letters*, Vol. 14, pp. 1-18, (2014).
- [10] Mejri, I., Mahmoudi, A., Abbassi, M. A., and Omri, A., "MHD Natural Convection in a Nanofluid-filled Enclosure with Non-uniform Heating on Both Side Walls", *Fluid Dynamics & Materials Processing, FDM P*, Vol. 10, pp. 83-114, (2014).
- [11] Hatami, M., and Ganji, D., "Thermal and Flow Analysis of Microchannel Heat Sink (MCHS) Cooled by Cu-water Nanofluid using Porous Media Approach and Least Square Method", *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 347-358, (2014).
- [12] Nguyen, M. T., Aly, A. M., and Lee, S. W., "Natural Convection in a Non-Darcy Porous Cavity Filled with Cu-water Nanofluid using the Characteristic-based Split Procedure in Finite-element Method", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 67, pp. 224-247, (2015).
- [13] Kalidasan, K., Velkennedy, R., and Kanna, P. R., "Natural Convection Heat Transfer Enhancement using Nanofluid and Time-variant Temperature on the Square Enclosure with Diagonally Constructed Twin Adiabatic Blocks", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 92, pp. 219-235, (2016).

- [14] Ravnik, J., and Škerget, L., "A Numerical Study of Nanofluid Natural Convection in a Cubic Enclosure with a Circular and an Ellipsoidal Cylinder", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 89, pp. 596-605, (2015).
- [15] Rao, S. S., and Srivastava, A., "Interferometric Study of Natural Convection in a Differentially-heated Cavity with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water Based Dilute Nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 92, pp. 1128-1142, (2016).
- [16] Bouhalleb, M., and Abbassi, H., "Numerical Investigation of Heat Transfer by CuO-water Nanofluid in Rectangular Enclosures", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 37, pp. 13-23, (2016).
- [17] Kasaeipoor, A., Ghasemi, B., and Aminossadati, S.M., "Convection of Cu-Water Nanofluid in a Vented T-shaped Cavity in the Presence of Magnetic Field", *International Journal of Thermal Sciences*. Vol. 94, pp. 50-60, (2015).
- [18] Sheremet, M. A., Groşan, T., and Pop, I., "Steady-state Free Convection in Right-angle Porous Trapezoidal Cavity Filled by a Nanofluid: Buongiorno's Mathematical Model", *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, Vol. 53, pp. 241-250, (2015).
- [19] Sheremet, M. A., Pop, I., and Bachok, N., "Effect of Thermal Dispersion on Transient Natural Convection in a Wavy-walled Porous Cavity Filled with a Nanofluid: Tiwari and Das' Nanofluid Model", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 92, pp. 1053-1060, (2016).
- [20] Makulati, N., Kasaeipoor, A., and Rashidi, M.M., "Numerical Study of Natural Convection of a Water-alumina Nanofluid in Inclined C-shaped Enclosures under the Effect of Magnetic Field", *Advanced Powder Technology*, Vol. 27, pp. 661-672, (2016).
- [21] Khanafer, K., AlAmiri, A., and Bull, J., "Laminar Natural Convection Heat Transfer in a Differentially Heated Cavity with a Thin Porous Fin Attached to the Hot Wall", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 87, pp. 59-70, (2015).
- [22] Groşan, T., Revnic, C., Pop, I., and Ingham, D. B., "Free Convection Heat Transfer in a Square Cavity Filled with a Porous Medium Saturated by a Nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 87, pp. 36-41, (2015).
- [23] Sheremet, M. A., Pop, I., and Nazar, R., "Natural Convection in a Square Cavity Filled with a Porous Medium Saturated with a Nanofluid using the Thermal Nonequilibrium Model with a Tiwari and Das Nanofluid Model", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 100, pp. 312-321, (2015).
- [24] Bhardwaj, S., Dalal, A., and Biswas, G., "Natural Convection Flows in a Porous Nanofluid-Filled Triangular Enclosure with Wavy Left Wall", *Proceedings of CHT-15, International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*, Rutgers University, Piscataway, USA, May 25-29, (2015).

- [25] Armaghani, T., Chamkha, A. J., Maghrebi, M., and Nazari, M., "Numerical Analysis of a Nanofluid Forced Convection in a Porous Channel: A New Heat Flux Model in LTNE Condition", *Journal of Porous Media*, Vol. 17, No. 7, pp. 637-646, (2014).
- [26] Armaghani, T., Maghrebi, M., Chamkha, A. J., and Nazari, M., "Effects of Particle Migration on Nanofluid Forced Convection Heat Transfer in a Local Thermal Non-equilibrium Porous Channel", *Journal of Nanofluids*, Vol. 3, pp. 51-59, (2014).
- [27] Ismael, M. A., Armaghani, T., and Chamkha, A. J., "Conjugate Heat Transfer and Entropy Generation in a Cavity Filled with a Nanofluid-saturated Porous Media and Heated by a Triangular Solid", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 59, pp. 138-151, (2016).
- [28] Braga, E.J., and de Lemos, MJS., "Laminar Natural Convection in Cavities Filled with Circular and Square Rods", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 1289-1297, (2005).
- [29] Patankar, S.V., "*Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*", Hemisphere, New York, (1980).
- [30] Kulkarni, D. P., Namburu, P. K., and Das, D. K., "Comparison of Heat Transfer Rates of Different Nanofluids on the Basis of the Mouromtseff Number", *Electronics Cooling*, Vol. 13, No. 3, pp. 28, (2007).
- [31] [http://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d\\_363.html](http://www.engineeringtoolbox.com/propylene-glycol-d_363.html)

## Abstract

In this paper natural convection heat transfer of nanofluid simulated in a box with square and circular blocks. Governing equations is solved using finite volume method by Fluent software and Nusselt number near the hot wall at different Darcy numbers, is obtained for box with square or circular blocks. Results show that when there is a few blocks, temperature contour and streamlines depend on blocks geometry while increasing the number of blocks decrease this dependency. For box containing heater element in square arrangement, conduction heat transfer is dominant while in horizontal arrangement convection is dominant. By growth of Rayleigh number and consequently increasing of rotational flow convection portion in heat transfer increases. Although most portion of heat transfer is by conduction and convection has little effect. In the next part of research effect of nanoparticle concentration in heat transfer is studied. Results show an increase in average Nusselt number and heat transfer coefficient for higher volumetric concentrations of nanoparticles. Time taken to reach steady state for water based nanofluid is less than time for water/ Copper oxide, ethylene glycol, and water/ Copper oxide, propylene glycol. Variation of heat transfer coefficient in term of Nusselt number for Copper oxide, ethylene glycol, and Copper oxide, propylene glycol nanofluids with increase of nanoparticle concentration is independent of Rayleigh number