

## بررسی تاثیرات ضریب موج سطحی و ضریب منظر بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه‌های موجی شکل

فرید فضل‌اللهی*	مه‌دی صاحبی	احمد صداقت
دانشجوی کارشناسی ارشد	دانشجوی کارشناسی ارشد	استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی اصفهان	دانشگاه صنعتی اصفهان	دانشگاه صنعتی اصفهان

**چکیده:** مقاله حاضر به بررسی عددی ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت درون دو حالت متفاوت محفظه بسته موجی شکل متأثر از نیروی شناوری می‌پردازد. در اینجا به بررسی تاثیر موج سطح و ضریب منظر در اعداد رایلی مختلف روی انتقال حرارت پرداخته شده است. مدل سازی انجام شده بر اساس فرض بوزینسک برای چگالی در محدوده اعداد رایلی  $10^6 - 10^8$  می‌باشد. مرز ناپایداری به عواملی همچون هندسه، دما و فشار وابسته است. با افزایش دمای دیوار گرم که موجب افزایش نیروی بویانسی و کاهش اثر ویسکوزیته سیال می‌گردد سیستم به سمت ناپایداری میل می‌کند. محفظه مدل شده شامل دو دیوار موجی شکل در بالا و پایین با دو چینش متفاوت و دو دیوار مستقیم الخط در کناره‌ها می‌باشد. دیوارهای بالایی و پایینی هر دو تک دما و دیوارهای کناری آدیاباتیک در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر مسئله بر اساس روش حجم محدود برای حجم کنترل ها کسسته سازی و حل شده است. این شبیه سازی در محدوده ضریب موج  $0.25 - 0$  و  $\lambda = 0$  و ضریب منظر  $0.5 - 0.25$  برای سیالی با عدد پرانتل  $0.704$  می‌باشد. دمای دیوار پایینی محفظه  $340K$  و دمای دیوار بالایی  $300K$  می‌باشد. نتایج بصورت دیاگرام‌هایی از توزیع عدد نوسلت متوسط، خطوط جریان و خطوط هم‌دما برای مقادیر مختلف ضریب موج سطح و ضریب منظر در اعداد رایلی مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار انتقال حرارت و عدد نوسلت در محفظه حالت اول با افزایش عدد رایلی و افزایش ضریب موج سطح افزایش می‌یابد در حالی که مقدار انتقال حرارت و عدد نوسلت در محفظه حالت دوم با افزایش عدد رایلی افزایش و با افزایش ضریب موج سطح کاهش می‌یابد.

**واژه‌های کلیدی:** ناپایداری ریلی بنارد، انتقال حرارت جابجایی طبیعی، گراشف، رایلی، محفظه موجی شکل

\* مؤلف مکاتبه کننده:

پست الکترونیکی: [f.fazlollahi@me.iut.ac.ir](mailto:f.fazlollahi@me.iut.ac.ir)  
تلفن: ۳۹۱۴۴۳۲ ۳۱۱ (+۹۸) // فاکس: ۳۹۱۲۶۲۸ ۳۱۱ (+۹۸)

## ۱. مقدمه

جریان‌های متحرک درون یک محفظه توسط نیروی شناوری همواره نقش مهمی را در کاربردهای مهندسی نظیر سیستم تهویه اتاق، عایق‌کاری راکتورهای هسته‌ای، جاذب‌های انرژی خورشیدی و غیره داشته‌اند. جابجایی آزاد در گستره وسیعی از مسائل صنعتی نظیر سیستم‌های جاذب سرمایه‌ی زمانی که سادگی، صرفه جویی اقتصادی و اطمینان، پارامترهای مهم طراحی می‌باشند مورد توجه قرار می‌گیرد. مسئله جابجایی آزاد درون اشکال پیچیده هندسی نظیر حفره‌های L شکل، حفره‌های دوزنقه‌ای، محفظه‌های قوسی شکل، محفظه‌های مثلثی شکل، محفظه‌های موجی شکل و غیره در کاربردهای مهندسی و صنعتی بسیار جذاب است، برای مثال می‌توان به دیوارهای با عایق کاری مضائف، شبکه کابل‌های زیرزمینی، کلکتورهای خورشیدی، ماشینهای الکتریکی، سیستم‌های سرمایه‌ی میکروالکترونیکی، چرخش طبیعی در اتمسفر و غیره اشاره نمود. تعداد کثیری از مقالات به بررسی ویژگیهای جریان، انتقال حرارت، گذار از جریان آرام به جریان مغشوش و ناپایداری جریان و انتقال حرارت در مسئله جابجایی آزاد پرداخته است. مسأله ناپایداری لایه ای از سیال که از سمت پایین حرارت می‌بیند به مسأله ناپایداری ریلی-بنارد معروف است. عامل اصلی ناپایداری نیروی شناوری ذرات گرم بالا رونده و نیروی گرانش ذرات سردتر پایین رونده است. این مسأله برای اولین بار در سال ۱۹۰۰ برای حالتی که سیال از پایین توسط سطح صلبی گرم و در بالا در معرض هوا قرار داشت توسط بنارد بررسی شد. ریلی در سال ۱۹۱۶ تئوری خود را برای شرایط ناپایداری جریان بین دو سطح صلب ارائه کرد. او نشان داد ناپایداری هنگامی اتفاق می‌افتد که  $\beta = -\frac{\partial T}{\partial Z}$  به اندازه کافی بزرگ شود و بر مبنای آن عدد بی بعد رایلی «Ra» را تعریف کرد. هنگامی که اختلاف دمای پایین و بالای محفظه از یک مقدار بحرانی بیشتر شود مقدار نیروی شناوری از نیروی پایدار کننده که ناشی از تأثیرات ویسکوزیته است بیشتر شده و سیال شروع به حرکت می‌کند این پدیده در مرجع [۱] چاندراسخار و مرجع [۲] درایزین و رید به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر شرایط مرزی نظیر شکل هندسی کانال و تغییر شرایط مرزی برای جریان آرام در حالت پایا در مرجع [۳] بررسی شده است. تأثیر ضریب منظر و عدد موج سطح درون کانال‌های موجی شکل متخلخل در مرجع [۵ و ۴] مورد بررسی قرار گرفته است. در مورد نوع سیال به کار رفته و تأثیر آن بر افزایش انتقال حرارت در محفظه مستطیلی شکل توسط نرم افزار فلونت در مرجع [۶] تحقیق شده است. ناپایداری رایلی-بنارد در دو حالت گذرا و پایدار برای یک کانال مستطیلی دو بعدی توسط نرم افزار فلونت در مرجع [۷] بررسی شده است.

## ۲. مسئله ناپایداری رایلی-بنارد

به طور کلی در مسأله رایلی-بنارد در یک محفظه بسته که دمای سطح پایین آن بیشتر از دمای صفحه بالایی باشد دو نوع مکانیزم هدایت و جابجایی برای انتقال حرارت وجود دارد. با افزایش دمای دیوار گرم که موجب افزایش نیروی بویانسی نسبت به اثر ویسکوزیته سیال می‌گردد سیستم به سمت ناپایداری میل می‌کند. عدد بی‌بعد رایلی معیاری است که توسعه نیروی شناوری در مسأله رایلی-بنارد را برای ما مشخص می‌کند که به صورت زیر تعریف می‌شود [۷]:

$$Ra \equiv \frac{\rho_i - \rho}{\rho_i} \frac{g \delta^3}{\nu \alpha} \quad (1)$$

که در آن  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی و  $\alpha$  ضریب پخش حرارتی می‌باشد. در این جا اندیس  $i$  اشاره به حالت اولیه دارد. همچنین عدد رایلی را می‌توان به صورت حاصل ضرب دو عدد بی بعد  $Gr$  (عدد گراشف) و  $Pr$  (عدد پرائتل) نوشت

$$Ra = Gr \times Pr \quad (2)$$

که گراشف بصورت  $Gr \equiv \frac{\rho_i - \rho}{\rho_i} \frac{g \delta^3}{\nu^2}$  و پرائتل  $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k}$  بصورت تعریف می‌گردد.

شروع ناپایداری را می‌توان به عدد رایلی بحرانی نسبت داد بدین صورت که هنگامی که عدد رایلی کوچکتر از رایلی بحرانی ( $Ra_c$ ) باشد سیال ساکن بوده و انتقال حرارت توسط مکانیزم هدایت انجام می‌شود. در این مکانیزم نیروی شناوری ضعیف است و توانایی غلبه بر نیروی ویسکوزیته را ندارد. اگر عدد رایلی برابر ( $Ra_c$ ) باشد جریان شروع به ناپایدار شدن کرده و در حالت گذار قرار می‌گیرد. این عدد به رایلی بحرانی مشهور است و دارای گستره وسیعی از اعداد می‌باشد. یک دلیل برای این محدوده وسیع رایلی بحرانی استفاده از فرض بوزینسک است که براساس این فرض کلیه‌ی خواص سیال به جز چگالی سیال در ترم شناوری معادله مومنتوم، ثابت در نظر گرفته می‌شود. تحت این شرایط خواهیم داشت [۷]:

$$\frac{\rho_i - \rho}{\rho_i} = \beta_T (T - T_i) \quad (3)$$

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4)$$

که  $\beta_T$  ضریب انبساط حجمی است و برای یک گاز ایده آل  $\beta_T = \frac{1}{T}$  می‌باشد.

اگر از معادلات ۱ تا ۴ استفاده کنیم در این حالت عدد رایلی و گراشف به صورت زیر قابل بیان خواهد بود:

$$Ra = \frac{\beta_T \Delta T g \delta^3}{\nu \alpha} \quad (5)$$

$$Gr = \frac{\beta_T \Delta T g \delta^3}{\nu^2} \quad (6)$$

در بالا ذکر شد که اگر عدد رایلی کوچکتر از رایلی بحرانی ( $Ra_c$ ) باشد، انتقال حرارت توسط مکانیزم هدایت انجام می‌شود. در این مکانیزم نیروی شناوری ضعیف است و توانایی غلبه بر نیروی ویسکوزیته را ندارد در

نتیجه انتقال حرارت تماماً توسط هدایت مولکولی انجام می‌شود، پروفیل دما یک پروفیل خطی و عدد ناسلت برابر یک می‌باشد. این روند تا زمانی که  $Ra < Ra_c$  باشد ادامه دارد. هنگامی که عدد رایلی تدریجاً افزایش یابد تا  $Ra_c < Ra$  شود نیروی شناوری شدت یافته و در نهایت به نیروی ویسکوزیته غالب شده و سیال شروع به حرکت کرده و دومین مکانیزم انتقال حرارت یعنی انتقال حرارت جابجایی شروع می‌شود. در این مکانیزم حرکت آرام سیال به صورت رولهای دو بعدی که به سلولهای بنارد معروف است دیده می‌شود. هنگامی که مقدار رایلی به مقدار یک یا دو مرتبه نسبت به رایلی بحرانی افزایش می‌یابد، جریان سلول وار به طور فزاینده‌ای پیچیده می‌شود و رولهای دوبعدی به حالت سه بعدی می‌شکند که به این حالت ناپایداری ثانویه گویند و هنگامی که این رولها از بالا مشاهده می‌شوند دارای شکل شش ضلعی می‌باشند و در رایلی‌های بالاتر تعداد سلولها چندین برابر شده و به طور ناگهانی جریان شروع به نوسانی شدن می‌کند و مغشوش می‌شود. همان طور که گفته شد شروع ناپایداری به رایلی بحرانی بستگی دارد که  $Ra_c$  توسط مطالعات و آزمایشات گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. نکته‌ای که باید بدان دقت کرد این است که استفاده از فرض بوزینسک هنگامی که اختلاف دمای  $(T_H - T_C)$  اندک باشد معتبر است به طوری که با افزایش اختلاف دمای سطح گرم و سرد باید در استفاده از فرض بوزینسک دقت بیشتری کرد.

### ۳. روابط مورد استفاده در مسأله ناپایداری رایلی - بنارد

معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با فرض بوزینسک به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{p}{\rho_b} \right) + g \left( 1 - \beta (T - T_b) \right) \bar{k} + \nu \Delta u \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \kappa \Delta T \quad (9)$$

که  $\Delta = \partial^2 / \partial x_j^2$  اپراتور لاپلاسین است.

هدف از این قسمت بدست آوردن رایلی بحرانی برای یک لایه سیال نامتناهی با شرایط مرزی صلب-صلب می‌باشد. بدین منظور روابط بالا را بی‌بعد می‌سازیم:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \text{Pr} \Delta \bar{u} + \text{Gr} \theta \bar{k} \quad (11)$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = \Delta \theta \quad (12)$$

که در معادله (۱۲)،  $\theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}$  دمای بی‌بعد می‌باشد.

برای اعداد رایلی در محدوده  $10^9 < Ra < 3 \times 10^9$  جریان آرام و بعد از این مقدار جریان از حالت پایدار شروع به ناپایدار شدن می‌کند [۸].

#### ۴. شبیه سازی عددی

همان طور که در شکل‌های ۱(الف) و ۱(ب) قابل مشاهده می‌باشد، ناحیه حل یک محفظه موجی شکل دوبعدی است که دمای سطح صلب پایینی  $340\text{K}$  و دمای سطح صلب بالایی  $300\text{K}$  می‌باشد. تمام خواص سیال مورد استفاده در این شبیه سازی در دمای میانگین  $320\text{K}$  اندازه‌گیری شده است.

شبکه بندی به صورت یکنواخت با سلولهای چهار ضلعی که  $160$  گره در عرض و  $320$  گره در طول را شامل می‌شود. بعنوان نمونه برای شکل حالت اول با  $A=0/25$  و  $\lambda=0/05$  سلول‌ها دارای ابعاد  $0/01279$  در طول و  $0/00625$  در عرض بر حسب واحد می‌باشند. علت استفاده از مش یکنواخت وجود ترمهای اغتشاشی در تمام ناحیه حل می‌باشد که این مسأله ریز کردن مش را بطور موضعی منتفی می‌سازد. اما انتخاب یک شبکه مناسب برای حل مستلزم استفاده از چندین شبکه مختلف و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر می‌باشد همچنین باید شبکه بندی بگونه‌ای باشد که نتایج مستقل از نوع شبکه و تعداد مش‌ها باشند که در شکل‌های ۲(الف) و ۲(ب) می‌توان استقلال شبکه‌های حل و نتایج آنها را مشاهده و مقایسه نمود. همان طور که در شکل‌های ۲(الف) و ۲(ب) مشاهده می‌شود در هر مرحله تعداد نقاط را چهار برابر کرده‌ایم که عدم وابستگی مقادیر  $Nu$  را بعد از تعداد  $12800$  سلول به شبکه حل قابل مشاهده است. اما بدلیل اینکه با افزایش تعداد سلول در شبکه حل نتایج دقیق‌تر می‌گردد و همچنین چون شکل مذکور بصورت دو بعدی مدل شده است که این باعث کاهش زمان حل می‌گردد می‌توان از شبکه ریزتری که دارای  $51200$  سلول می‌باشد استفاده نمود که در این مقاله نیز همین شبکه برای حل مسئله انتخاب شده است. با مقایسه نتایج بدست آمده در شکل‌های ۲(الف) و ۲(ب) برای محفظه حالت اول با نتایج ارائه شده در مرجع [۳] می‌توان از صحت جواب‌های بدست آمده از حل عددی در مقاله حاضر اطمینان حاصل نمود. حل انجام شده برای حالت پایدار و گسسته سازی به شیوه حجم محدود انجام شده است. با توجه به غیر قابل تراکم بودن سیال و عدم کوپل شدن معادله انرژی و مومنتوم از روش حل Segregated با فرمول بندی Implicit استفاده شده است. نحوه گسسته سازی معادله فشار به صورت Standard و معادلات انرژی و مومنتوم به صورت Second Order Upwind می‌باشد و معادله اتصال سرعت-فشار به صورت Simple تعریف شده است [۶] و [۷]. با توجه به این که این مسأله از دسته مسائل ناپایدار می‌باشد انتخاب معیار همگرایی از اهمیت قابل توجه‌ای برخوردار است به همین دلیل تکرار تا آنجا که مقدار عدد نوسلت برای هر حالت دیگر تغییر نکرد ادامه داده شده است. همگرا شدن کامل مسأله را موقوف به همگرایی در مونتورهای سرعت، دما و شار حرارتی در مقاطع مورد نظر ناحیه حل گردید. در این حالت دیده شد که در همگرایی کامل مسأله مقادیر باقیمانده برای پیوستگی به  $10^{-4}$  و برای مومنتوم  $10^{-4}$  و برای انرژی  $10^{-7}$  رسیده است.

## ۵. شرایط مرزی و شرایط اولیه

همانطور که در شکل های ۱(الف) و ۱(ب) مشاهده می گردد دو محفظه دارای دو دیوار موجی شکل تک دما در بالا و پایین و دو دیوار مستقیم عمودی آدیاباتیک در طرفین که برای هر دو حالت محفظه مساوی است می باشند. برای هر دو محفظه دمای دیوار موجی شکل پایین ۳۴۰K و دمای دیوار موجی شکل بالا ۳۰۰K می باشد. پروفیل سطح موجی شکل برای خط AB در شکل ۱ توسط معادله (۱۳) نشان داده شده است.

$$\begin{aligned} 0 \leq X^* \leq 1 \\ Y^* = \lambda[1 - \cos(2\pi X^*)] \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن

$$X^* = XA, \quad Y^* = YA \quad (14)$$

برای سطح موجی دیگر در محفظه حالت اول همین رابطه تنها با اضافه شدن یک ثابت  $A$  بعنوان عرض از مبدا در رابطه مربوط به  $Y^*$  برقرار است و در محفظه حالت دوم سطح پایینی قرینه سطح پایینی محفظه حالت اول و سطح بالایی همان معادله سطح بالایی محفظه حالت اول را دارا می باشد. دمای اولیه محفظه و دیوارهای آدیاباتیک  $T_\infty$  می باشد که برابر  $T_C$  دمای دیوار سرد در نظر گرفته شده است. شتاب گرانش  $g$  بسمت پایین می باشد. با توجه به اینکه اختلاف دمای ثابت مورد نظر در این مسئله ۴۰K است و خواص مواد نیز ثابت فرض شده است، همچنین با توجه به فرض بوزینسک برای بدست آوردن نتایج در رایلی های متفاوت مقدار شتاب گرانش را به تناسب عدد رایلی تغییر داده ایم مثلا در عدد رایلی ۱۰۰۰ در محفظه حالت اول با  $A=0.25$  و  $\lambda=0.05$  مقدرا شتاب گرانش برابر  $3/57$  در نظر گرفته شده است [۶].

## ۶. نتایج حل عددی

### الف) تاثیر عدد رایلی بر انتقال حرارت و عدد نوسلت

نتایج برای هوا با  $Pr=0.704$  در رژیم  $10^6 \leq Ra$  در شکل های ۳ و ۴ قابل مشاهده می باشند. همان طور که در شکل دیده می شود برای هر دو محفظه با افزایش عدد رایلی مقدار عدد نوسلت افزایش می یابد. این بدان علت می باشد که با افزایش ناپایداری علاوه بر این که میزان انتقال حرارت افزایش می یابد به علت افزایش نیروی شناوری و غلبه بر نیروی ویسکوزیته سیال، سهم عمده انتقال حرارت مربوط به انتقال حرارت جابجایی می گردد. اما نکته قابل توجه در مقایسه این دو محفظه تاثیر شکل هندسی خود محفظه و عدد موج بر عدد نوسلت می باشد، می توان مشاهده نمود در محفظه حالت اول میزان عدد نوسلت برای حالت های مشابه نسبت به محفظه حالت دوم بیشتر است. همچنین در محفظه اول با افزایش ضریب موج برای یک رایلی ثابت و ضریب منظر ثابت عدد نوسلت افزایش می یابد در حالی که برای محفظه دوم با افزایش ضریب موج برای رایلی ثابت و ضریب منظر

ثابت عدد نوسلت کاهش می‌یابد. این نتایج از مقایسه سایر حالت‌های دیگر نیز قابل مشاهده است، که به عنوان نمونه شکل‌های مربوط به ضریب منظر  $0/5$  در شکل‌های ۶ و ۵ آورده شده است. نکته شایان ذکر دیگری که در شکل‌های مذکور قابل مشاهده است تغییرات بسیار کم عدد نوسلت در محدوده  $10^3 < Ra < 10^4$  برای محفظه حالت اول و افزایش ناگهانی عدد نوسلت برای آن در محدوده  $10^6 < Ra < 10^3$  و تغییرات کم نوسلت در محدوده  $10^4 < Ra < 10^6$  برای محفظه حالت دوم و افزایش ناگهانی آن در محدوده  $10^6 < Ra < 10^4$  می‌باشد. این مسئله بعلت بوجود آمدن ناپایداری در جریان می‌باشد که طی این عمل سلول‌های بنارد شکسته شده و تعداد آنها افزایش می‌یابد.

### ب) تاثیر ضریب منظر

تغییرات ضریب منظر در اعداد رایلی پایین چندان موثر نیست، اما در رایلی‌های بالا تاثیر تغییرات ضریب منظر واضح‌تر می‌گردد. برای محفظه حالت اول با افزایش ضریب منظر ابتدا عدد نوسلت افزایش و سپس کاهش می‌یابد و برای محفظه حالت دوم با افزایش ضریب منظر عدد نوسلت مرتبا کاهش می‌یابد. مطلب مذکور در نمودارهای ۹، ۸، ۷ و ۱۰ قابل مشاهده می‌باشد.

### ج) تاثیر ضریب موج

در محفظه حالت اول با افزایش ضریب موج عدد نوسلت افزایش می‌یابد. این افزایش در ضرایب موج و اعداد رایلی پایین‌تر کمتر و نامحسوس‌تر می‌باشد. اما در ضرایب موج بالاتر و همچنین رایلی‌های بالاتر نمودار روند صعودی‌تری بخود گرفته است. می‌توان روند مذکور را در شکل‌های ۱۲، ۱۱ و ۱۳ مشاهده نمود. اما در محفظه حالت دوم با افزایش ضریب موج عدد نوسلت کاهش می‌یابد که این کاهش برای اعداد رایلی بزرگ‌تر و ضرایب موج بزرگ‌تر بیشتر است. نکته شایان ذکر در این نمودارها حساسیت کم عدد نوسلت در اعداد رایلی پایین به ضریب موج می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد در اعداد رایلی پایین عدد نوسلت تاثیر کمتری از عدد موج می‌پذیرد یعنی روند کاهشی نمودار در اعداد رایلی پایین‌تر کمتر می‌باشد. همچنین عدد نوسلت در بازه  $\lambda = 0/1 - 0/25$  و  $\lambda = 0/1 - 0/05$  روند نزولی‌تری نسبت به بازه  $\lambda = 0/1 - 0/05$  برای محفظه حالت دوم با  $A = 0/25$  دارد. در ضرایب موج دیگر تنها نمودار برحسب دو ضریب موج فقط برای نشان دادن روند نزولی عدد نوسلت بر حسب تغییرات ضریب موج آورده شده است. برای عدد موج صفر هر دو محفظه موجی شکل به محفظه مستطیلی شکل تبدیل می‌شوند و در این حالت عدد نوسلت برای مقادیر مختلف رایلی درون هر دو محفظه برابر می‌باشد. مطالب مذکور در شکل‌های ۱۵، ۱۴ و ۱۶ نشان داده شده است.

### د) بحث ناپایداری

با ناپایدار شدن جریان ابتدا رولهای دوبعدی با مقطع مربعی شکل تشکیل خواهد شد و بعد از گذار از رایلی خاص رولهای دوبعدی به رولهای سه بعدی با مقاطع شش ضلعی تبدیل می‌شوند، که این عدد رایلی برای

هر حالت محفظه و هر ضریب موج و ضریب منظر متفاوت می‌باشد، مثلاً برای محفظه حالت اول با  $A=0/25$  و  $\lambda=0/1$  این عدد از مرتبه  $10^5$  می‌باشد [۳] و افزایش عدد رایلی باعث چند برابر شدن تعداد این شش ضلعی‌ها و بروز حرکات نوسانی و در نهایت مغشوش شدن جریان می‌شود. همان طور که مشخص است با افزایش تعداد حلقه‌ها و ناپایدارتر شدن جریان و توسعه پروفیل‌های قارچی شکل، مقدار سرعت نیز افزایش چشم‌گیری می‌یابد. پروفیل‌های قارچی شکل در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نشان داده شده است.

## و) خطوط جریان و خطوط هم‌دما

کانتورهای خطوط دما ثابت برای حالت یکسان  $A=0/25$  و  $\lambda=0/1$  برای هر دو محفظه در رایلی  $1000$  و  $10000$  بصورت دمای بی‌بعد  $\theta$  که در محدوده صفر تا یک قرار می‌گیرد قابل مشاهده می‌باشند. کانتورهای خطوط جریان نیز برای حالت یکسان  $A=0/25$  و  $\lambda=0/1$  برای هر دو محفظه در رایلی  $1000$  در شکل‌های ۱۹ تا ۲۴ قابل مشاهده می‌باشند.

## ۷. نتیجه‌گیری

انتقال حرارت جابجایی آزاد با جریان آرام و پایدار درون محفظه‌های موجی شکل با دو دیوار مستقیم الخط عمودی آدیاباتیک و دو دیوار موجی شکل تک دما بصورت عددی بررسی شده است. تاثیرات ضریب موج  $\lambda$  و ضریب منظر  $A$  برای رایلی‌های مختلف روی انتقال حرارت بررسی شده است. ضریب منظر در اعداد رایلی پایین تاثیر چندانی بر انتقال حرارت و عدد نوسلت ندارد، اما با افزایش رایلی کم‌کم نقش مهمتری در انتقال حرارت بازی می‌کند. در محفظه حالت اول افزایش ضریب منظر در حالی که ضریب موج ثابت است ابتدا باعث افزایش و سپس باعث کاهش مقدار انتقال حرارت و عدد نوسلت می‌گردد. برای محفظه حالت دوم افزایش ضریب منظر در حالی که ضریب موج ثابت است باعث کاهش مقدار انتقال حرارت و عدد نوسلت می‌گردد. ضریب موج نیز در اعداد رایلی پایین تاثیر چندانی بر عدد نوسلت و انتقال حرارت ندارد اما با افزایش عدد رایلی تاثیر این عدد بیشتر مشاهده می‌گردد. در محفظه حالت اول با افزایش ضریب موج در حالی که ضریب منظر ثابت است مقدار انتقال حرارت و عدد نوسلت افزایش می‌یابد اما برای محفظه حالت دوم با افزایش ضریب موج در حالی که ضریب منظر ثابت است مقدار انتقال حرارت و عدد نوسلت کاهش می‌یابد.

## تشکر و قدردانی

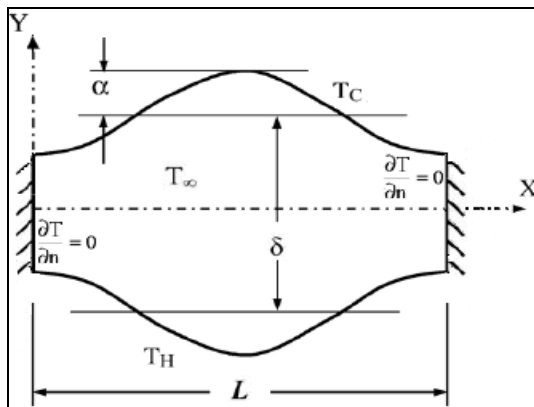
نویسنده مکاتبه کننده از دکتر صداقت به‌واسطه حمایت بی‌دریغ ایشان در این کار تحقیقاتی تشکر می‌نماید.

## مراجع

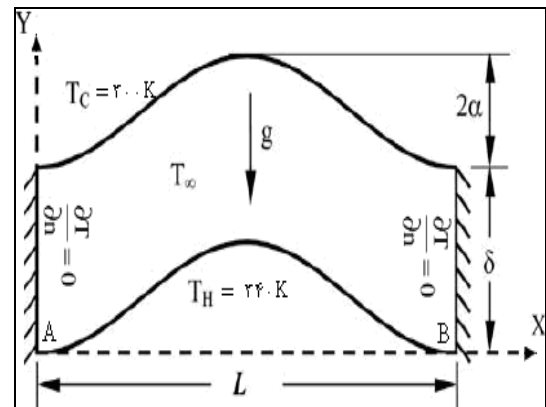
- [1] S. Chandrasekhar, "Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability", Oxford Univ. Press, London, 1961.  
 [2] P. G. Drazin and W. H. Reid, "Hydrodynamic Stability", Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1981.



- [3] Prodip K. D., Shohel M. and Syeda H. T., A. K. M. Sadrul I., "Effect of Surface Waviness and Aspect Ratio on Heat Transfer Inside a Wavy Enclosure", International Journal of Numerical Methods for Heat&Fluid Flow, Vol. 13, pp. 1097-1122, 2003.
- [4] Aydin M., A. Cihat B. and Ioan P., "Natural Convection Inside an Inclined Wavy Enclosure Filled with a Porous Medium", Vol. 64, pp. 229-246, 2006.
- [5] Zakia S., Md. Nasim H., "Non-Darcy Free Convection Inside a Wavy Enclosure", Heat and Mass Transfer, Vol. 34, pp. 136-146, 2007.
- [6] Mohammad M. P., Darren L. H., Antonio C., "Dual Influence of Temperature and Gas Composition of Selected Helium-Based Binary Gas Mixtures on the Thermal Convection Enhancement in Rayleigh-Bénard Enclosures", Heat and Mass Transfer, Vol.48, pp. 5081-5088, 2005.
- [7] Maria A. K., Suleyman A. G., "Buoyancy Suppression in Gases at High Temperatures", Heat and Mass Transfer, Vol. 28, pp. 496-511, 2007.
- [8] Oleg G. M., Pavel P. K., "Free-Convective Heat Transfer", Springer, 2005.
- [9] A.Bejan, "Convection Heat Transfer", Duke university, 1994.

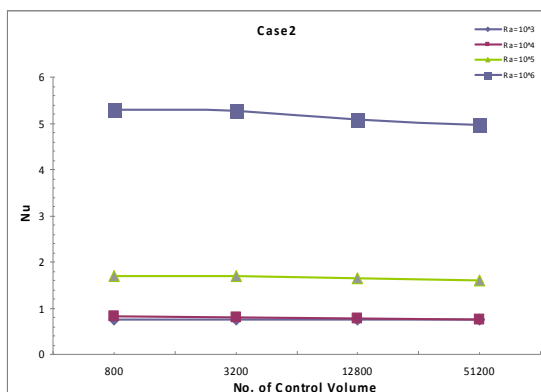


(ب)

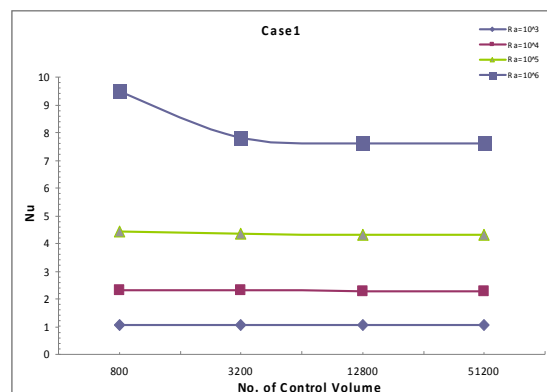


(الف)

شکل ۱. شکل شماتیک محفظه حالت اول و دوم

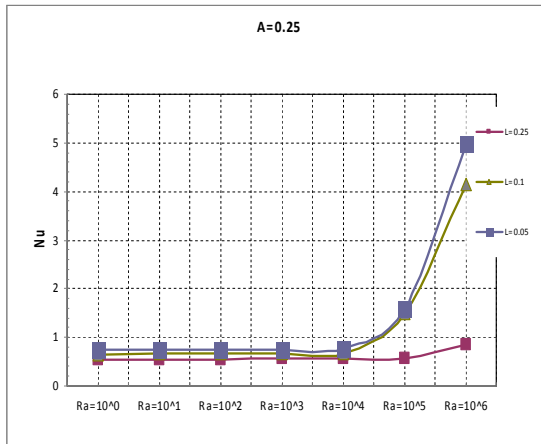


(ب)

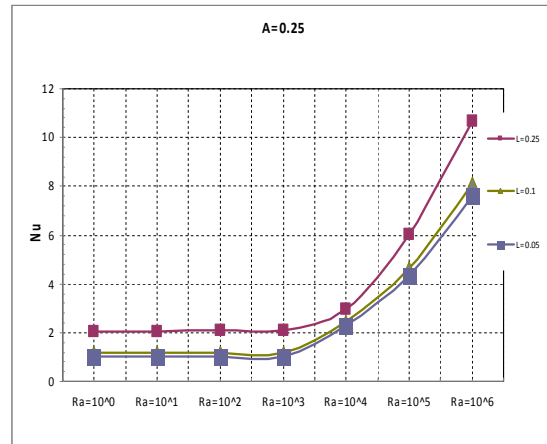


(الف)

شکل ۲. تعداد مش بر حسب عدد نوسلت برای محفظه‌های حالت اول و دوم



شکل ۴. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب



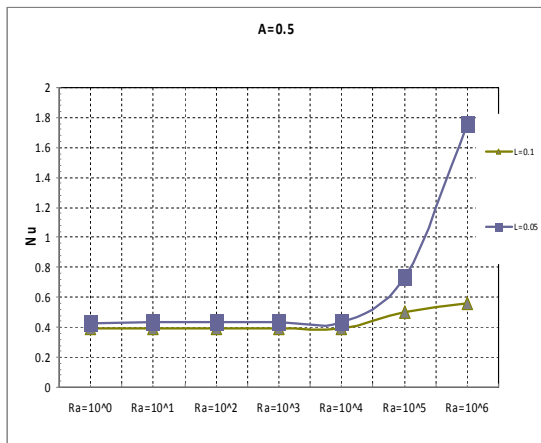
شکل ۳. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب رایلی های مختلف

رایلی های مختلف

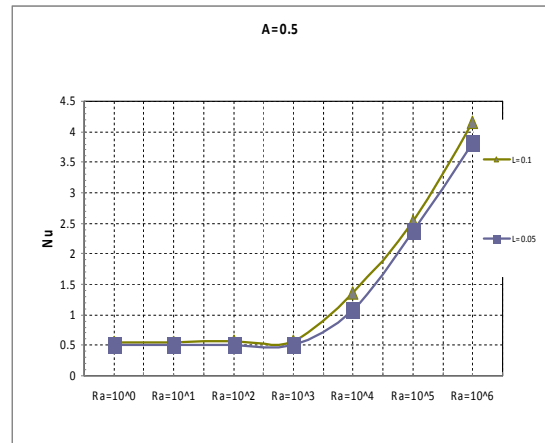
برای محفظه حالت دوم با ضریب منظر

برای محفظه حالت اول با ضریب منظر ۰/۲۵

۰/۲۵



شکل ۶. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب



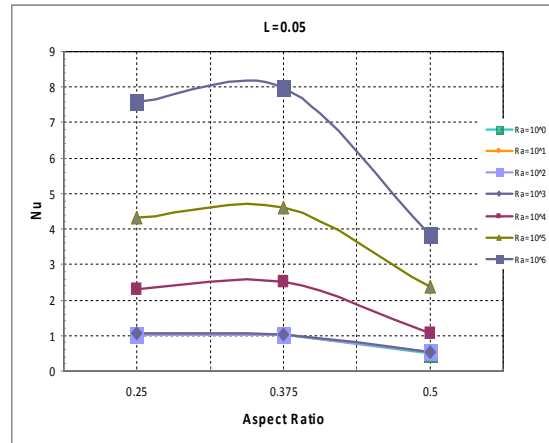
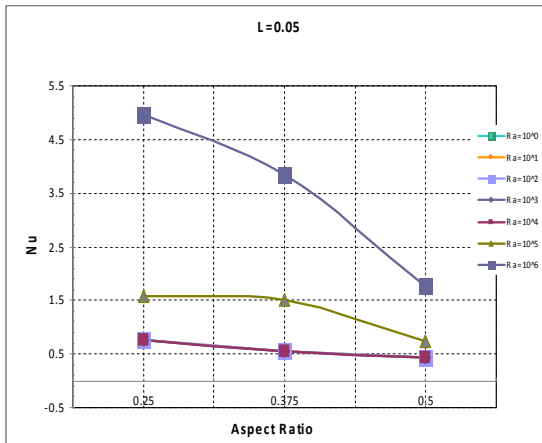
شکل ۵. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب رایلی های مختلف

رایلی های مختلف

برای محفظه حالت دوم با ضریب منظر

برای محفظه حالت اول با ضریب منظر ۰/۵

۰/۵



شکل ۸. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب

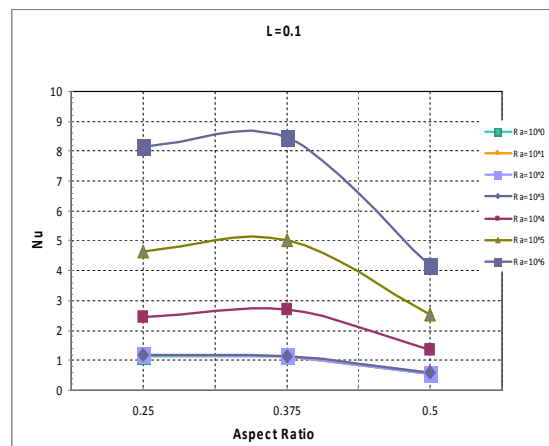
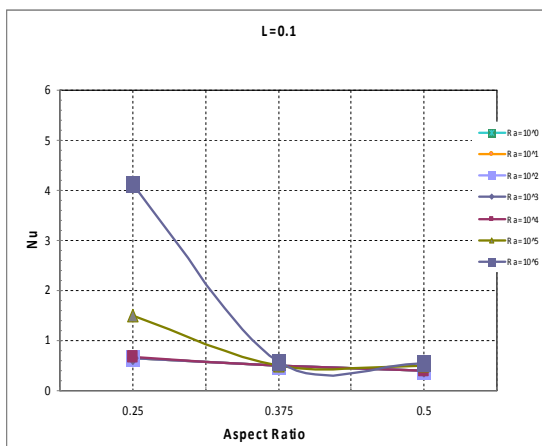
شکل ۷. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب ضریب منظر برای

ضریب منظر برای

رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت دوم با ضریب

رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت اول با ضریب موج  $0.5$

موج  $0.5$



شکل ۱۰. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب

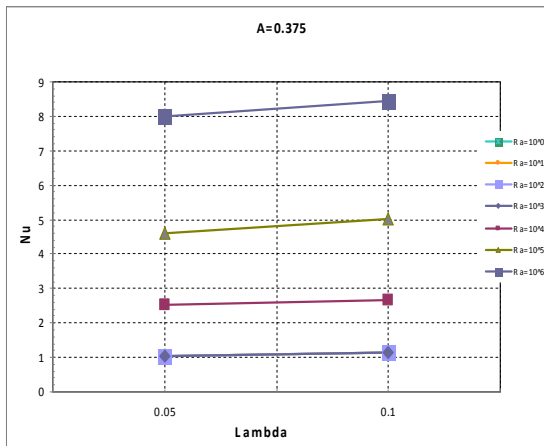
شکل ۹. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب ضریب منظر برای

ضریب منظر برای

رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت دوم با

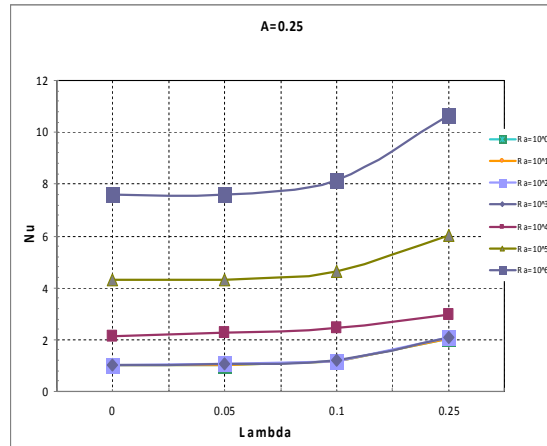
رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت اول با ضریب موج  $0.1$

ضریب موج  $0.1$



شکل ۱۲. تغییرات عدد نوسلت NU بر حسب

رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت اول با

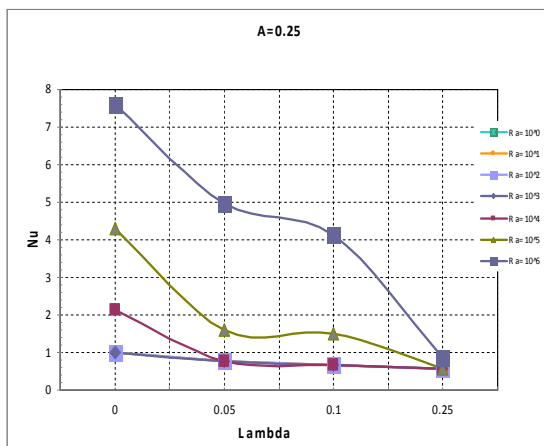


شکل ۱۱. تغییرات عدد نوسلت NU بر حسب ضریب موج برای

ضریب موج برای

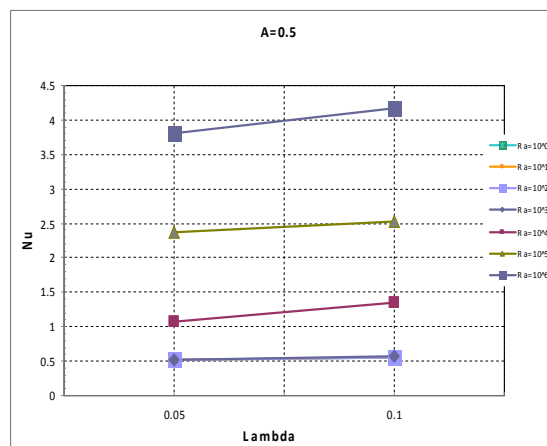
رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت اول با ضریب منظر ۰/۲۵

ضریب منظر ۰/۳۷۵



شکل ۱۴. تغییرات عدد نوسلت NU بر حسب

رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت دوم با

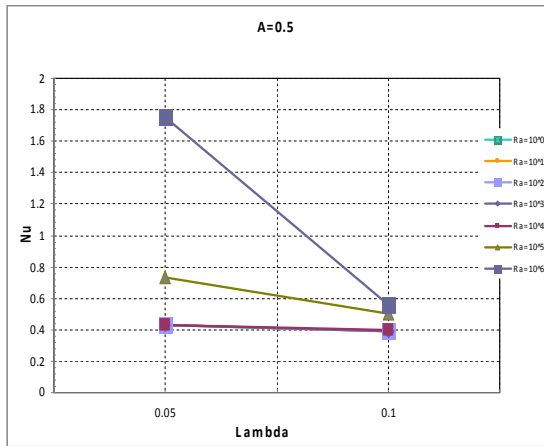


شکل ۱۳. تغییرات عدد نوسلت NU بر حسب ضریب موج برای

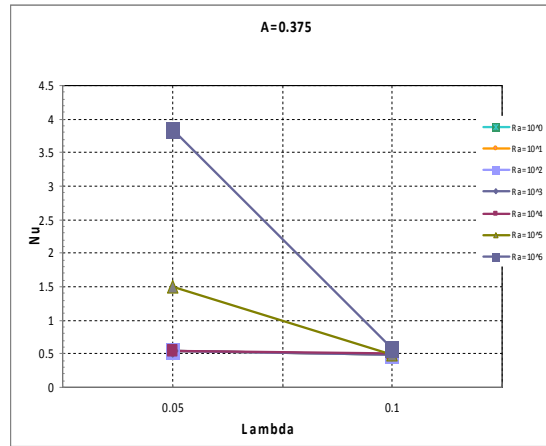
ضریب موج برای

رایلی‌های مختلف برای محفظه حالت اول با ضریب منظر ۰/۵

ضریب منظر ۰/۲۵



شکل ۱۶. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب



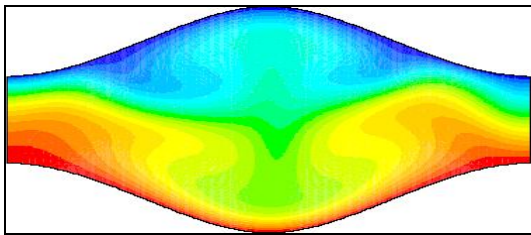
شکل ۱۵. تغییرات عدد نوسلت  $NU$  بر حسب ضریب موج برای

ضریب موج برای

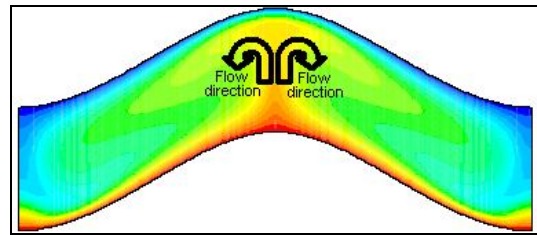
رایلی های مختلف برای محفظه حالت دوم با

رایلی های مختلف برای محفظه حالت دوم با ضریب منظر  $0.375$

ضریب منظر  $0.5$



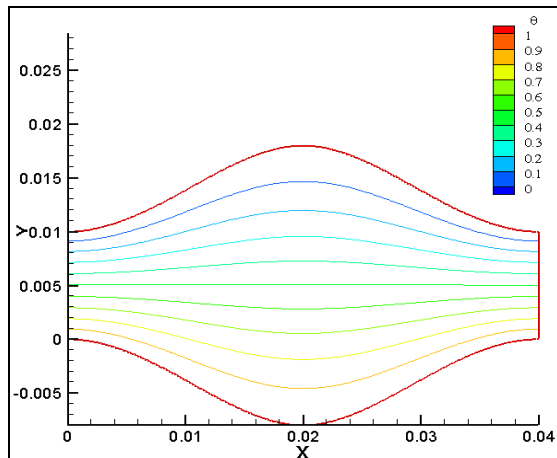
شکل ۱۸. پروفیل قارچی شکل برای محفظه



شکل ۱۷. پروفیل قارچی شکل برای محفظه حالت اول

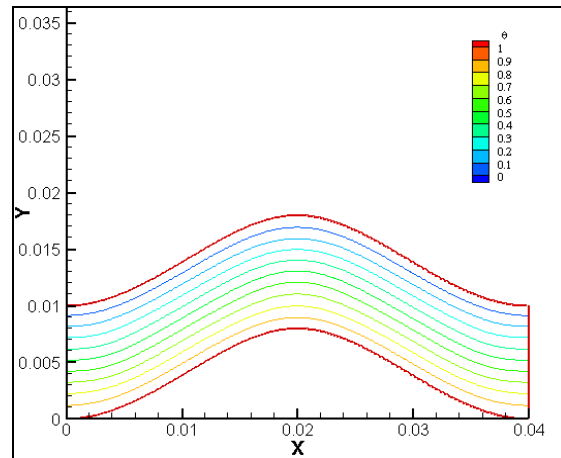
حالت دوم

و مسیر حرکت جریان



شکل ۲۰. کانتور خطوط دما ثابت با  $A=0.25$

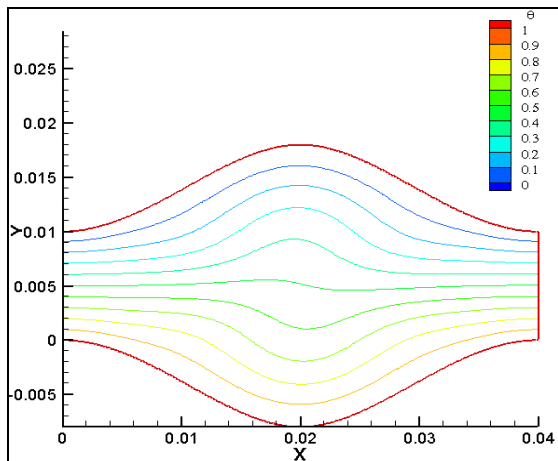
محفظه حالت دوم در عدد رایلی  $1000$



شکل ۱۹. کانتور خطوط دما ثابت با  $A=0.25$  و  $\lambda=0.1$  برای

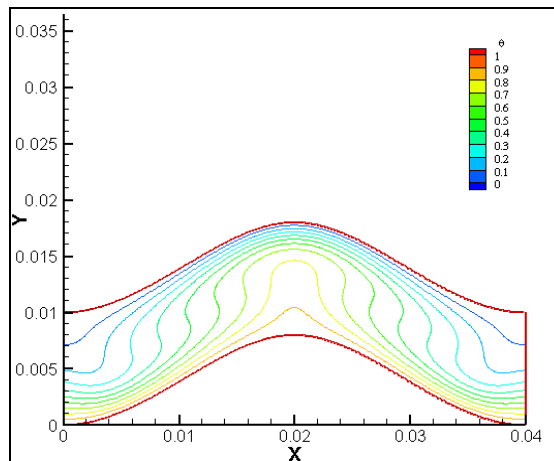
و  $\lambda=0.1$  برای

محفظه حالت اول در عدد رایلی  $1000$



شکل ۲۲. کانتور خطوط دما ثابت با  $A=0.25$

محفظه حالت دوم در عدد رایلی

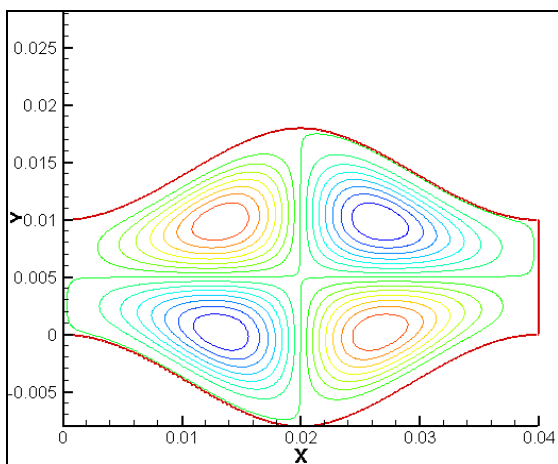


شکل ۲۱. کانتور خطوط دما ثابت با  $A=0.25$  و  $\lambda=0.1$  برای

و  $\lambda=0.1$  برای

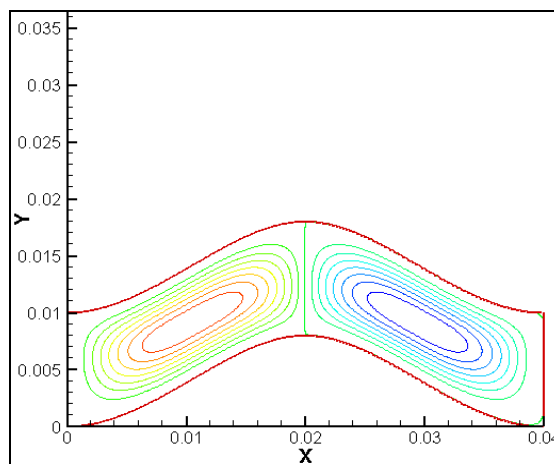
محفظه حالت اول در عدد رایلی

۱۰۰۰۰



شکل ۲۴. کانتور خطوط جریان با  $A=0.25$

محفظه حالت دوم در عدد رایلی



شکل ۲۳. کانتور خطوط جریان با  $A=0.25$  و  $\lambda=0.1$  برای

و  $\lambda=0.1$  برای

محفظه حالت اول در عدد رایلی