

بررسی عددی جریان همرفت طبیعی درون محفظه‌های بسته موجدار

مهدی اسمعیلی سنگری
سیداسماعیل رضوی*

کارشناس ارشد، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی و مهندسی مکانیک
استاد، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی و مهندسی مکانیک

چکیده

همرفت طبیعی درون محفظه بسته مربعی با گرمایش متفاوت به صورت عددی بررسی شده است. دو ضلع مجاور محفظه سینوسی هستند. دیواره سمت چپ و راست به ترتیب گرم و سرد و دیواره‌های بالایی و پایینی مسطح و عایق می‌باشند. سیال درون محفظه هوا در نظر گرفته شده است و در حالت اولیه به صورت ساکن می‌باشد. معادلات پیوستگی، مومنوم و انرژی به همراه شرایط مرزی با روش حجم کنترل حل شده است. برای گسسته سازی عبارت‌های جابجایی فشار طرح فراباد مرتبه دوم، انرژی و مومنوم طرح QUICK و برای پیوند سرعت و فشار الگوریتم SIMPLE به کار رفته است. حل عددی مسأله حاضر در حالت پایا و برای تغییرات عدد رایی از 10^5 تا 5×10^6 و دامنه موج برابر ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ و فرکانس موج برابر ۱، ۳ و ۵ صورت می‌گیرد. با تغییر هر یک از این پارامترها، پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند. خواص فیزیکی ثابت برای سیال درون محفظه در نظر گرفته شده است. اعتبارسنجی نتایج انجام شده و توافق خوبی بین جواب‌های به دست آمده و داده‌های موجود در منابع موجود وجود دارد. نتایج به صورت چگونگی تغییرات عدد ناسلت متوسط در دیواره گرم، خطوط جریان و خطوط هم‌دما در محفظه مربعی با دیواره‌های صاف و موجدار با موج سینوسی گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد بهترین حالت نسبت Nu/Nu_0 تقریباً برابر ۲/۵ می‌باشد، یعنی در حالت محفظه موجدار میزان انتقال حرارت ۲/۵ برابر حالت مربع ساده خواهد بود که در شرایط $CA=0.5$ ، $CF=5$ و عدد رایی برابر با 10^5 می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حل عددی، همرفت طبیعی، محفظه بسته موجدار، حالت پایا.

Numerical Study of Natural Convection within Enclosures of Sinusoidal Corrugated Side Walls

M. Esmaili Sangari

M.Sc., University of Tabriz, Faculty of Mechanical Engineering

S. E. Razavi

Professor, University of Tabriz, Faculty of Mechanical Engineering

Abstract

Numerical investigation of natural convection within square enclosures with differential heating has been performed. Two adjacent sides of enclosure are sinusoidal. The left and right side walls are assumed hot and cold, respectively, and top and bottom walls are flat and insulated. The fluid inside the enclosure considered is air is quiescent, initially. Continuity, momentum and energy equations with boundary conditions have been solved using finite volume method. To discretize convective terms of pressure the second order upwind scheme and for momentum and energy equations QUICK scheme are used. Pressure and velocity are coupled using SIMPLE algorithm. Numerical solution to the present study has performed in steady state and the Rayleigh number, Ra equal to 10^5 , 10^6 and 5×10^6 , corrugation amplitude (CA) of 0.1, 0.3 and 0.5 and for corrugation frequency (CF) 1, 3 and 5. By changing each parameter, others are kept constant. Constant physical properties for the fluid medium have been assumed. Validation of the numerical model has performed by the other available works in the literature and the agreement is found to be excellent. Results have been presented in terms of isotherms, streamlines and variation of average Nusselt number in a square enclosure with flat walls and corrugated side walls. The results show the optimum case of Nu/Nu_0 ratio is approximately 2.5, in other words, the heat transfer rate in corrugated enclosure case is 2.5 times of the simple square enclosure which occurs in $CA = 0.5$, $CF = 5$ and $Ra = 10^5$.

Keywords: Numerical solution, Natural convection, Corrugated enclosure, Steady state.

۱- مقدمه

همرفت طبیعی در محفظه مربعی بسته توجه خاصی را در بسیاری از تحلیل‌های بنیادی انتقال حرارت به خود معطوف کرده است که از اهمیت بالایی در کاربردهای فناوری برخوردار است [۱]. پدیده همرفت طبیعی درون محفظه، همانند شکل و موقعیت محفظه، متنوع است. بانگاهی به تعداد کاربردهای مهندسی، پدیده‌های مربوط به محفظه‌ها به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: (الف) محفظه‌های گرم شده از اطراف، (ب) محفظه‌های گرم شده از زیر. گروه اول بیانگر کاربردهایی نظیر جمع‌کننده‌های خورشیدی، عایق‌کاری دیواره‌های دوجداره و گردش هوا درون اتاق‌های یک ساختمان می‌باشد. به علاوه، مثال‌هایی از این گروه را می‌توان در سامانه‌های سرمایش ماشین‌های الکتریکی دوار در ابعاد صنعتی یافت. گروه دوم به عملکرد عایق‌های گرمایی افقی (مانند انتقال گرما در فضای اتاقک زیرشیروانی) اشاره دارد [۲]. جریان‌های ناشی از نیروی شناوری به علت پیوند اجباری بین خواص انتقالی جریان و میدان‌های گرمایی پیچیده‌اند، به ویژه مسایل جریان داخلی پیچیدگی بیشتری نسبت به جریان خارجی دارند. در اعداد رایلی بزرگ، نظریه کلاسیک لایه مرزی می‌تواند باعث ساده‌سازی برای مسایل جریان خارجی می‌شود و ناحیه خارج لایه مرزی تحت تأثیر لایه مرزی قرار نمی‌گیرد. برای همرفت طبیعی محصور، لایه‌های مرزی نزدیک دیواره‌ها تشکیل می‌شوند اما ناحیه خارجی آن‌ها توسط لایه‌های مرزی محصور شده و تشکیل یک ناحیه هسته می‌دهند. از آنجایی که ناحیه هسته به صورت جزئی یا کامل به وسیله لایه‌های مرزی احاطه شده است، خواص جریان هسته از شرایط مرزی مشخص نمی‌شود، اما وابسته به لایه مرزی است، که متقابلاً تحت تأثیر هسته قرار گرفته است. تداخل بین لایه مرزی و هسته باعث پیچیدگی عمده در این مسأله می‌شود. از آنجا که اغلب وجود بیش از یک جریان هسته امکان‌پذیر می‌باشد و زیرناحیه‌های جریان از جمله سلول‌ها و لایه‌ها ممکن است در هسته ظاهر شوند بر پیچیدگی مسأله افزوده می‌شود [۱]. نتایج باچلر [۳] یکی از مشاهدات اولیه در همرفت طبیعی درون یک حفره می‌باشد. نویسنده به صورت آزمایشگاهی بیان کرد که انتقال حرارت هدایت برای اعداد رایلی کوچک در حفره بلند، انتقال حرارت غالب می‌باشد. او همچنین بیان کرد که سیال درهسته هم‌دما است. بعدها وجود لایه‌بندی‌های مختلف سیال درهسته توسط اکرت و کارلسون [۴] در حالی که مشغول مطالعه آزمایشگاهی بر روی گرمایش متفاوت در محفظه لایه‌ای هوا بین دو صفحه عمودی بودند، نشان داده شد. پترسون و ایمبرگر [۵] نخستین کسانی بودند که جنبه انتقال حرارت همرفت طبیعی ناپایا داخل یک حفره با گرمایش و سرمایش

ناگهانی را بر پایه تحلیل مقیاسی مطالعه نمودند. مارکاتوس و پرسیلوس [۶]، جریان همرفت طبیعی آرام و آشسته در محفظه‌های بسته را به روش اختلاف محدود سلول اهدایی^۱ و با تصحیح شبکه^۲ برای اعداد رایلی 10^3 تا 10^{16} مطالعه کردند. ژونگ و همکاران [۷] با روش اختلاف محدود اثرات خواص متغیر روی میدان‌های سرعت و دما و انتقال حرارت در محفظه دو بعدی تحت گرمایش متفاوت از اطراف را بررسی نمودند. آن‌ها برای ناحیه آشسته جریان، با فرض آغاز اغتشاش از عدد رایلی 10^6 ، مدل K-epsilon را به کار بردند. نیکولت و همکاران [۸] همرفت طبیعی گذرای داخل محفظه مربعی دوبعدی را به صورت عددی و تجربی بررسی نمودند. آن‌ها در مطالعه عددی از طرح فراباد نیمه ضمنیو در مطالعه تجربی از روش ماخ-زندر^۳ استفاده نمودند. مایر و همکاران [۹] جریان همرفت طبیعی آشسته در محفظه مکعبی تحت گرمایش از کف را به صورت تجربی و با استفاده از فناوری سینمایی Particle Image Velocity (PIV) در عدد رایلی $10^{10} \times 1/4$ بررسی نمودند. کورکسی و اوزکان [۱۰] همرفت طبیعی درون محفظه بسته مکعبی را به صورت تجربی و عددی مطالعه نمودند. آن‌ها برای اندازه‌گیری سرعت از فناوری PIV و برای حل معادلات سه بعدی جریان آرام در عدد رایلی $10^7 \times 1/3$ از نرم افزار فلوئنت^۴ استفاده نمودند. سیانفرینی و همکاران [۱۱] جریان همرفت طبیعی درون محفظه‌های مربعی تحت گرمایش متفاوت از اطراف حاوی نانوسیال آلومینیوم سولفیت^۵ را برای اعداد رایلی 10^3 تا 10^7 به صورت عددی و با الگوریتم SIMPLE-C^۶ بررسی نمودند. حسین و همکاران [۱۲] به روش حجم محدود پاتانکار^۶ [۱۳]، جریان همرفت طبیعی پایای دوبعدی در محفظه مربعی با دیواره‌های عمودی موجدار V شکل را به صورت عددی مطالعه نمودند. همچنین مائو و همکاران [۱۴] جابجایی طبیعی گذرا در محفظه‌های بسته را به صورت تحلیل مقیاسی برای خواص سیال ثابت و لیل و همکاران [۱۵] به صورت حل تبدیل انتگرالی برای خواص سیال متغیر بررسی کردند. باساک و همکاران [۱۶] روش المان محدود پنالتی^۷ را برای مطالعه‌ی همرفت طبیعی درون محفظه با سیال هوا برای رایلی‌های 10^3 تا 10^5 برای موارد دیواره‌ی پایینی دما ثابت و با دمای متغیر سینوسی به کار بردند. لو و همکاران [۱۶] جریان همرفت داخل حفره گرمایشی از دیواره چپ و سرمایشی از دیواره راست با هر دو دیواره افقی عایق برای شرایط لایه

¹ Donor-cell Differencing Method

² Mesh Refinement

³ Mach-Zehnder interferometer

⁴ Fluent

⁵ $Al_2SO_3 + H_2O$

⁶ Patankar

⁷ Penalty Method

۱-۲ - معادلات حاکم

معادلات بی بعد پایستاری جرم، مومنتوم^۳ و انرژی برای جریان‌های دو بعدی پایا عبارتند از:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (6)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \text{RaPr}\theta \quad (7)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (8)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (9)$$

که متغیرهای بی بعد در آن مانند زیر تعریف می‌شوند:

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{\alpha/H}, V = \frac{v}{\alpha/H}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_H - T_c}, \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, \text{Ra} = \frac{g\beta(T_H - T_c)H^3}{\alpha\nu}$$

$$P = \frac{pH^2}{\rho\alpha^2}$$

همچنین در معادلات فوق، فرض بوسینسک اعمال شده است.

معادله دیواره عمودی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x = C \text{Asin} \left[CF \left(\frac{2\pi}{H} y \right) \right] \quad (10)$$

عدد ناسلت میانگین در طول دیواره گرم:

$$Nu = - \int_0^H \frac{hy}{k} dY$$

$$= - \int_0^1 \frac{y}{H} \left(\frac{\partial \theta_s(Y)}{\partial X} \right)_{X=0.1} dY \quad (11)$$

$$= - \int_0^1 Y \left(\frac{\partial \theta_s(Y)}{\partial X} \right)_{X=0.1} dY$$

۲-۲ - شکل هندسی و شرایط مرزی

شکل (۱) هندسه، دامنه محاسباتی و شرایط مرزی مساله

را نشان می‌دهد که در آن داریم: $H=L=1$

همچنین شرایط مرزی بدین شرح می‌باشند:

(الف) دیواره بالا، عایق با شرط عدم لغزش:

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, U = 0, V = 0$$

(ب) دیواره پایین، عایق با شرط عدم لغزش:

$$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0, U = 0, V = 0$$

(ج) دیواره چپ، دیواره گرم دما ثابت:

$$\theta = 1, U = 0, V = 0$$

(د) دیواره راست، دیواره سرد دما ثابت:

مرزی دمایی با استفاده از روش تفاضل مرتبه دوم بررسی کردند. حسن و همکاران [۱۷] روش المان محدود گالرکین^۱ را برای همرفت طبیعی گذرا درون محفظه مربعی با دیواره‌های عمودی موجدار سینوسی با گرمایش متفاوت، و دیواره‌های افقی عایق و سیال هوا به کار بردند. سجودی و همکاران [۱۸] همرفت طبیعی درون محفظه مربعی با دیواره‌های متخلخل را که در آن دو دیواره عمودی موجدار سینوسی و دیواره‌های افقی صاف و عایق هستند روش حجم محدود ضمنی بررسی نمودند.

با توجه به کاربردهای فراوان محفظه‌های بسته در خنک‌سازی مواد غذایی و شیمیایی در بسیاری از کارخانجات و همچنین کاربرد آن‌ها در سلول‌ها و جمع‌کننده‌های خورشیدی و بسیاری کاربردهای دیگر لزوم یافتن راه‌های بهینه جهت افزایش تبادل گرما در آن‌ها حائز اهمیت است که در تحقیق حاضر، هدف بررسی نقش موجدار کردن دیواره‌های عمودی محفظه‌های بسته در افزایش انتقال گرمای همرفت طبیعی درون آن است.

۲- بیان مسأله

در این پژوهش یکبار به بررسی خواص انتقال حرارت برای محفظه مربعی با اعداد رایلی $10^5, 10^6, 5 \times 10^6$ پرداخته می‌شود که در ناحیه آرام می‌باشند [۱۹] و سپس در مورد خواص با اصلاح دوزلع مجاور به کمک منحنی سینوسی با دامنه‌های موج $0.1, 0.3, 0.5$ و فرکانس‌های موج $1, 3, 5$ با همان اعداد رایلی بحث می‌شود. در تمامی موارد تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم، کانتورهای هم‌دما و خطوط جریان ارائه می‌شوند. حالت بهینه برای محفظه‌ها در مورد انتقال حرارت همرفت طبیعی در هر عدد رایلی حالتی خواهد بود که بیشینه مقدار انتقال حرارت (Q) را داشته باشد که طبق رابطه (۱) و با توجه به اینکه عمق محفظه در این مساله برابر ۱ در نظر گرفته شده است و هدف حل دو بعدی آن می‌باشد، این مقدار برابر با عدد ناسلت ضربدر یک مقدار ثابت می‌باشد، پس برای یافتن بهینه حالت کافی است فقط اعداد ناسلت با هم مقایسه شوند.

$$Q = hA\Delta T \quad (1)$$

$$A = l \times 1 \quad (2)$$

$$Nu = \frac{h l}{K} \quad (3)$$

$$\rightarrow Q = Nu \times l \times 1 \times \Delta T \times \frac{K}{l} \quad (1-3)$$

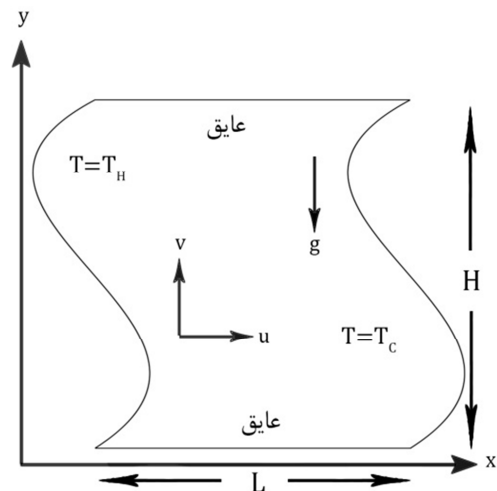
$$\rightarrow Q = Nu \times \text{مقدار ثابت} \quad (4)$$

^۱ Galerkin

^۲ Contour

^۳ Momentum

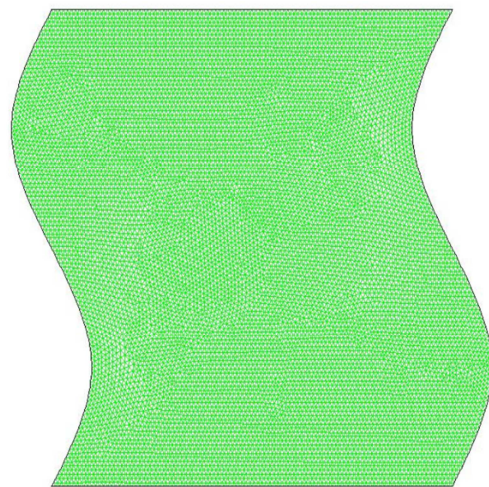
$\theta = 0, \quad U = 0, \quad V = 0$
گفتنی است هوا به عنوان سیال عامل با عدد پرانتل ثابت $Pr = 0.71$ در این مساله انتخاب شده است.



شکل ۱- شکل هندسی مساله و شرایط مرزی

۲-۳- ایجاد شبکه

شکل (۲) نمونه‌ای از شبکه بندی مقطع موردنظر را نشان می‌دهد. این شبکه به شکل شبکه‌های بی سازمان مثلثی ایجاد شده است.



شکل ۲- نمونه شبکه بندی مقطع مورد نظر محفظه موجدار

۲-۴- روش حل عددی

معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی با روش حجم کنترل حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی عبارتهای جابجایی فشار طرح فراباد مرتبه دوم، انرژی و مومنتم طرح QUICK و برای پیوند سرعت و فشار الگوریتم SIMPLE به کار رفته است. تمامی

خواص در معادلات در دمای میانگین سیال، ثابت در نظر گرفته شده‌اند. تلفات لزجتی سیال به دلیل سرعت پایین و جریان آرام در نظر گرفته نشده است. با ضریب فرورهایهای متناسب با هر مورد، در تمامی موارد همگرایی مسأله با شرط برقراری معادله (۱۶) در کمتر از ۱۲۰۰ تکرار برآورد شده است.

$$\left| \frac{\Gamma^{n+1} - \Gamma^n}{\Gamma^n} \right| \leq 10^{-6} \quad (12)$$

که در آن Γ به ترتیب برابر U, V, P و θ می‌باشد. این مساله برای مقادیر دامنه موج $0.1, 0.3$ و 0.5 مقادیر فرکانس موج $1, 3$ و 5 و اعداد رایلی $10^5, 10^6$ و 5×10^6 و یک بار هم برای محفظه مربعی با همین اعداد رایلی حل شده است.

۲-۵- استقلال از شبکه

شکل (۳) تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم را در شبکه با تعداد سلولهای متفاوت نشان می‌دهد. مساله حاضر با تعداد سلول برابر ۲۲۴۴۶ حل شده است که شکل (۳) نشانگر استقلال از شبکه در این مقدار می‌باشد.

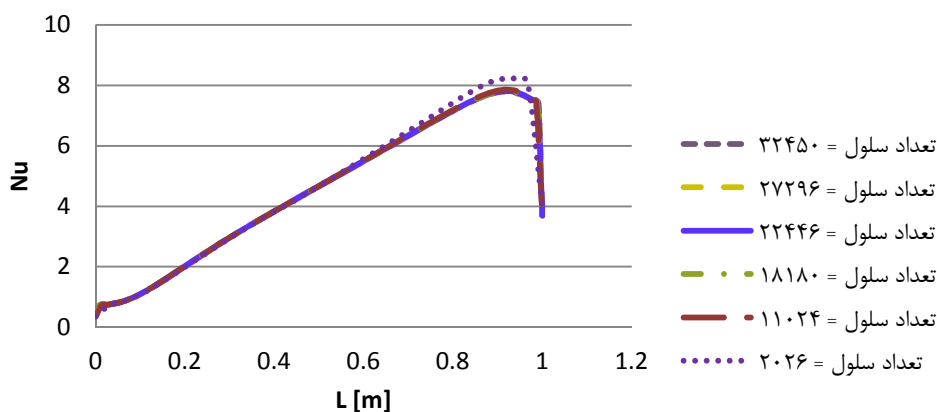
۲-۶- اعتبارسنجی عددی

برای تطبیق نتایج این تحقیق با نتایج موجود در ادبیات فن و تأیید صحت کار، نتایج حاصل از کار حاضر برای محفظه مربعی ساده با نتایج کارهای صورت گرفته توسط بجان [۲]، پتیریر [۲۰]، امری [۲۱] مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در شکل (۴) نمایش داده شده است که نزدیکی داده‌ها نشانگر صحت کار حاضر می‌باشد.

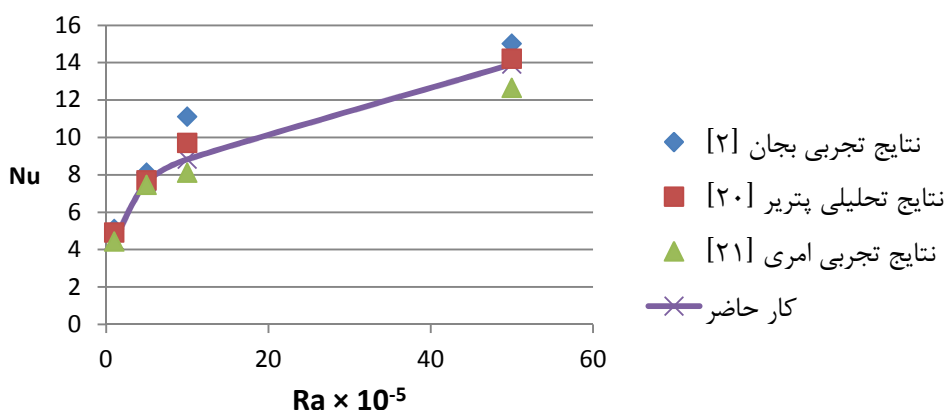
۳- نتایج

حل عددی مسأله حاضر در حالت پایا و برای تغییرات عدد رایلی از 10^5 تا 5×10^6 و دامنه موج برابر $0.1, 0.3$ و 0.5 و فرکانس موج برابر $1, 3$ و 5 صورت می‌گیرد. با تغییر هر یک از این پارامترها، پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند. خواص فیزیکی ثابت برای سیال درون محفظه در نظر گرفته شده است. نتایج به صورت چگونگی تغییرات عدد ناسلت میانگین در دیواره‌ی گرم محفظه موجدار نسبت به محفظه ساده، خطوط جریان و خطوط هم‌دما در محفظه مربعی با دیواره‌های موجدار با موج سینوسی گزارش شده است.

در شکل‌های (۵) تا (۱۰) نسبت عدد ناسلت متوسط در محفظه موجدار به محفظه ساده در طول دیواره گرم در حالت‌های مختلف بررسی شده است.



شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت محلی روی دیوار گرم بر حسب طول دیواره در محفظه مربعی در تعداد سلول‌های مختلف



شکل ۴- مقایسه کار حاضر با کارهای موجود در منابع موجود برای محفظه مربعی ساده

در این دو حالت به ازای فرکانس موج‌های بالا با بررسی نسبت $\frac{Nu}{Nu_0}$ که مقادیر کمتر از یک را نشان می‌دهند واضح است که موجدار کردن دیواره موجب کاهش انتقال حرارت نسبت به حالت مربعی می‌شود که مطلوب نمی‌باشد.

در شکل (۷) ملاحظه می‌شود که در دامنه موج $CA = 0.5$ ثابت و عدد رایلی ثابت، با افزایش فرکانس موج نسبت $\frac{Nu}{Nu_0}$ همواره افزایش می‌یابد که برای توجیه آن با توجه به شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود که به دلیل نزدیکی دیواره‌های چپ و راست به هم و کاهش مساحت بین دو دیواره، سرعت سیال افزایش یافته که موجب اغتشاش جریان می‌شود که در این دامنه موج همواره انتقال حرارت بیشتری نسبت به حالت مربع ساده خواهیم داشت. با توجه به شکل (۱۲) ملاحظه می‌شود که در دامنه موج $CA = 0.5$ ثابت و عدد رایلی ثابت با افزایش فرکانس موج، تعداد دفعات تشکیل گردابه سیال زیاد شده و انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

شکل (۱۱) کانتورهای خطوط هم‌دما و خطوط جریان را برای تغییرات دامنه موج نشان می‌دهد. برای مشاهده تأثیرات

برای مشخص کردن حالت بهینه برای دیواره‌های موجدار از شکل‌های (۵) تا (۱۰) استفاده می‌کنیم.

شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) کانتورهای خطوط جریان و خطوط همدمای بی بعد محفظه مربعی را به ازای اعداد رایلی و دامنه و فرکانس موج‌های مختلف نمایش می‌دهد. برای بررسی حالت بهینه کانتورهای دما و خطوط جریان را با ثابت نگه داشتن یک پارامتر بهینه و تغییر پارامترهای دیگر بررسی می‌کنیم.

۳-۱- تأثیر دامنه موج

طبق شکل (۵) و (۶) در دامنه موج $CA = 0.1$ و $CA = 0.3$ ثابت و عدد رایلی ثابت، همواره با افزایش فرکانس موج نسبت اعداد ناسلت محفظه موجدار نسبت به حالت مربعی $\left(\frac{Nu}{Nu_0}\right)$ حالت نزولی دارد که برای توجیه آن می‌توان گفت که در دامنه موج $CA = 0.1$ و $CA = 0.3$ ثابت و عدد رایلی ثابت، با افزایش فرکانس موج، در نزدیکی دیواره‌ها انتقال حرارت هدایت بر انتقال حرارت همرفت به علت نفوذ کمتر جریان غالب می‌شود.

دامنه موج، مقادیر عدد رایلی و فرکانس موج به ترتیب 10^5 و ۵ در نظر گرفته شده‌اند. از شکل (۱۱) نتیجه می‌شود که یک افزایش در دامنه موج، ناحیه‌ای را که در طول فرآیند بدون تغییر باقی می‌ماند کاهش می‌دهد. افزایش در دامنه موج باعث کاهش در ناحیه هسته می‌شود. در نواحی پایین سمت چپ و بالا سمت راست خطوط هم‌دما متراکم‌تر هستند. افزایش دامنه موج باعث به هم خوردن الگوی جریان‌های نفوذی می‌شود، به علت این که برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های دامنه موجب کاهش فاصله بین دو دیواره می‌شود.

برای خطوط جریان، چرخش گردابه‌ها درون محفظه به علت فرورفتگی‌های موج درون محفظه، تمایل به جدایش و تبدیل به گردابه‌های کوچک‌تر بیشتر دارند. افزایش دامنه موج، ناحیه حرکت عمودی جریان تحت تأثیر نیروی شناوری را کاهش می‌دهد و باعث تجزیه گردابه به گردابه‌های کوچک‌تر با قدرت کمتری می‌شود.

۳-۲ تأثیر فرکانس موج

طبق شکل‌های (۸) تا (۱۰) ملاحظه می‌شود که با ثابت ماندن فرکانس موج و عدد رایلی، افزایش دامنه موج همواره موجب افزایش نسبت $\frac{Nu}{Nu_0}$ می‌شود که برای توجیه آن با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که در یک فرکانس خاص، همواره افزایش دامنه موجب کاهش مساحت بین دو دیواره و در نتیجه افزایش سرعت، گردابه سیال و انتقال حرارت می‌شود.

شکل (۱۲) کانتورهای خطوط هم‌دما و خطوط جریان را برای تغییرات فرکانس موج نشان می‌دهد. برای مشاهده تأثیرات فرکانس موج، مقادیر عدد رایلی و دامنه موج به ترتیب 10^5 و 0.5 در نظر گرفته شده‌اند. از شکل (۱۲) نتیجه می‌شود که افزایش فرکانس موج در مقایسه با افزایش دامنه موج، تأثیر کمتری بر ناحیه هسته دارد. اما الگوهای جریان و دما نزدیک دیواره‌ها به شدت تحت تأثیر تغییرات فرکانس موج قرار دارند. با افزایش فرکانس موج، خطوط هم‌دما نزدیک دیواره‌ها به تدریج به سمت داخل ناحیه برآمدگی نفوذ می‌کنند، که برای توجیه این رفتار می‌توان گفت با افزایش فرکانس موج در مجاورت بخش نوک تیز دیواره سرد یا گرم، سیال گردان دمایی کمتری دارد. این جابجایی به سوی داخل خطوط هم‌دما مسافت طی شده توسط جریان را کاهش داده و الگوی تأثیر بر جریان‌های متقابل سرد و گرم را تغییر می‌دهد.

برای خطوط جریان، با افزایش فرکانس موج، گردابه‌های تشکیل شده نزدیک دیواره‌های محفظه به هم می‌ریزند. افزایش فرکانس موج فضای چرخش را کم می‌کند. با افزایش فرورفتگی و برآمدگی سطح در نتیجه افزایش فرکانس موج، تعداد گردابه‌ها افزایش یافته و از قدرت آن‌ها کاسته می‌شود.

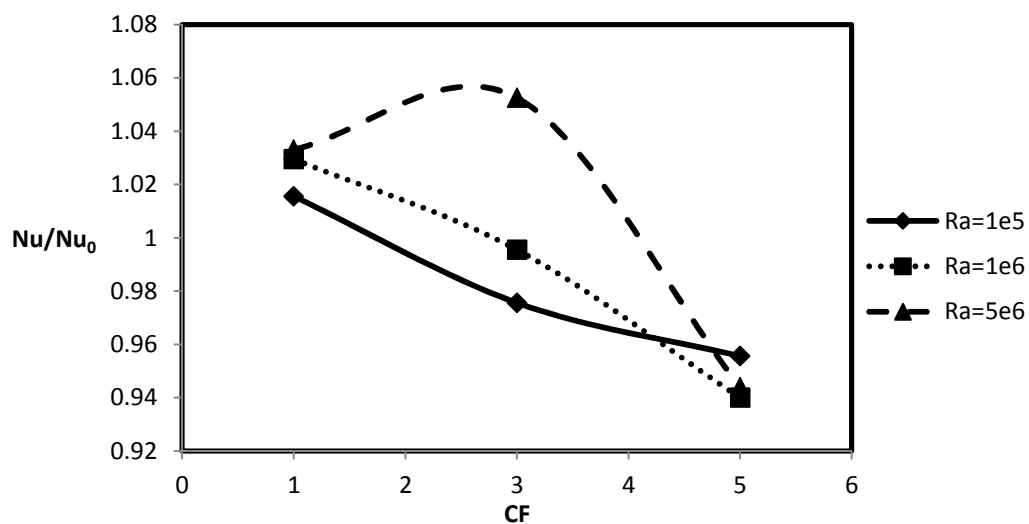
۳-۳ تأثیر عدد رایلی

شکل (۱۳) کانتور خطوط هم‌دما و خطوط جریان را برای تغییرات عدد رایلی نشان می‌دهد. برای مشاهده تأثیرات تغییر رایلی، مقادیر دامنه موج و فرکانس موج به ترتیب 0.5 و ۵ در نظر گرفته شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای رایلی‌های متفاوت در نواحی فرورفتگی موج خطوط هم‌دما به صورت متراکم بوده و در نواحی برآمدگی به صورت پراکنده هستند. با افزایش عدد رایلی خطوط هم‌دما در نواحی فرورفتگی متراکم‌تر و در نواحی برآمدگی پراکنده‌تر می‌شوند. همچنین نفوذ خطوط هم‌دما به درون نقاط برآمدگی بیشتر می‌شود.

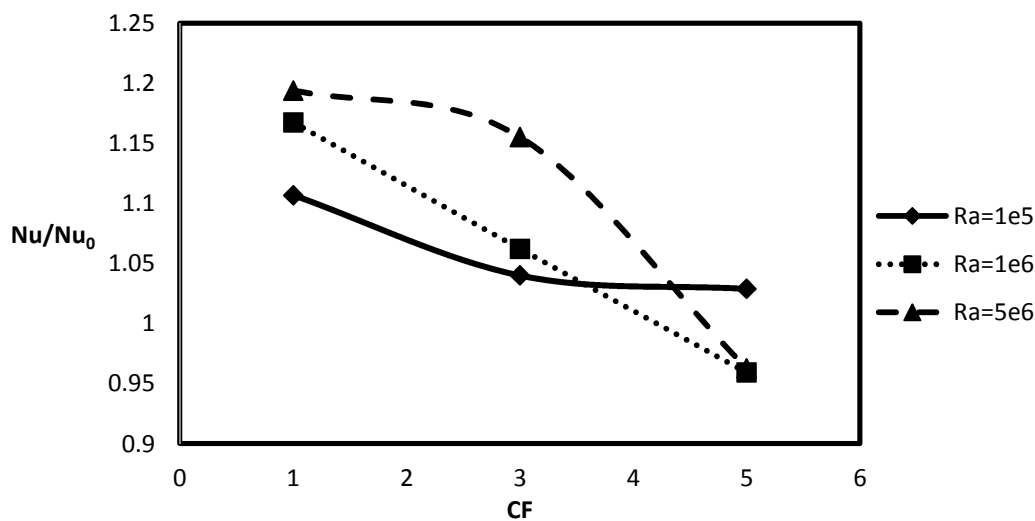
برای خطوط جریان با افزایش عدد رایلی جریان قوی‌تر می‌شود که دلیل آن افزایش نیروی شناوری ناشی از افزایش عدد رایلی می‌باشد. برای همه حالت‌های موجود گردابه‌هایی مابین نواحی فرورفتگی و برآمدگی تشکیل می‌شوند. با افزایش عدد رایلی به دلیل افزایش گردابه در جریان سیال، گردابه‌های قوی‌تری تشکیل می‌شود.

۴- نتیجه گیری

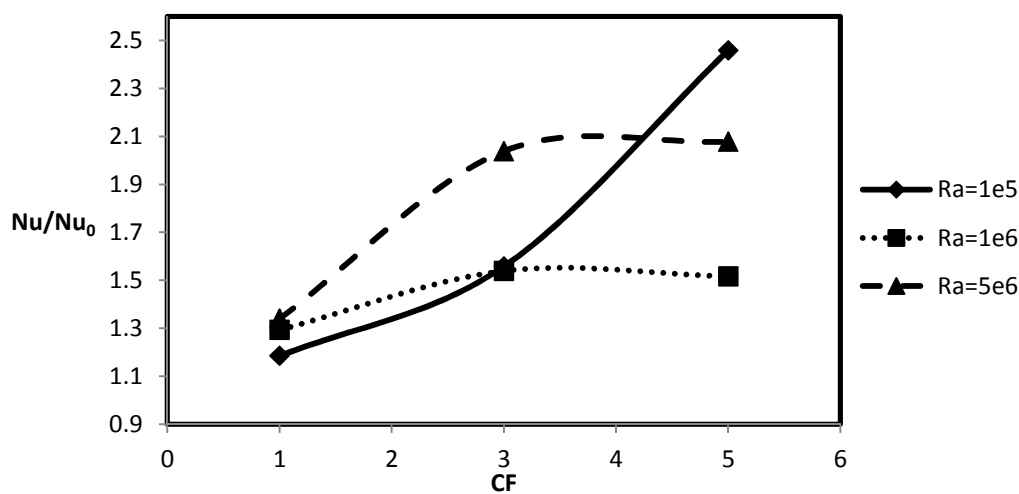
افزایش عدد رایلی در یک دامنه و فرکانس موج خاص همواره موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود که علت آن افزایش گردابه‌ها در حرکت سیال می‌باشد؛ اما با ملاحظه شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) ملاحظه می‌شود نسبت $\frac{Nu}{Nu_0}$ در فرکانس موج‌های بالا برای اعداد رایلی کوچک بهتر از اعداد رایلی بزرگتر می‌باشد یعنی راندمان بهتری خواهند داشت. پس برای افزایش بهره‌وری لزومی ندارد که اعداد رایلی خیلی بزرگی انتخاب کنیم و حالت بهینه حالتی خواهد بود که بیشترین مقدار $\frac{Nu}{Nu_0}$ را بدهد. با بررسی نتایج واضح است که بهترین حالت از نظر $\frac{Nu}{Nu_0}$ در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که تقریباً برابر نسبت $\frac{Nu}{Nu_0} = 2.5$ می‌باشد یعنی انتقال حرارتی معادل ۲٫۵ برابر حالت مربع ساده خواهد داشت که حالت $CA=0.5$ ، $CF=5$ و عدد رایلی برابر با 10^5 می‌باشد.



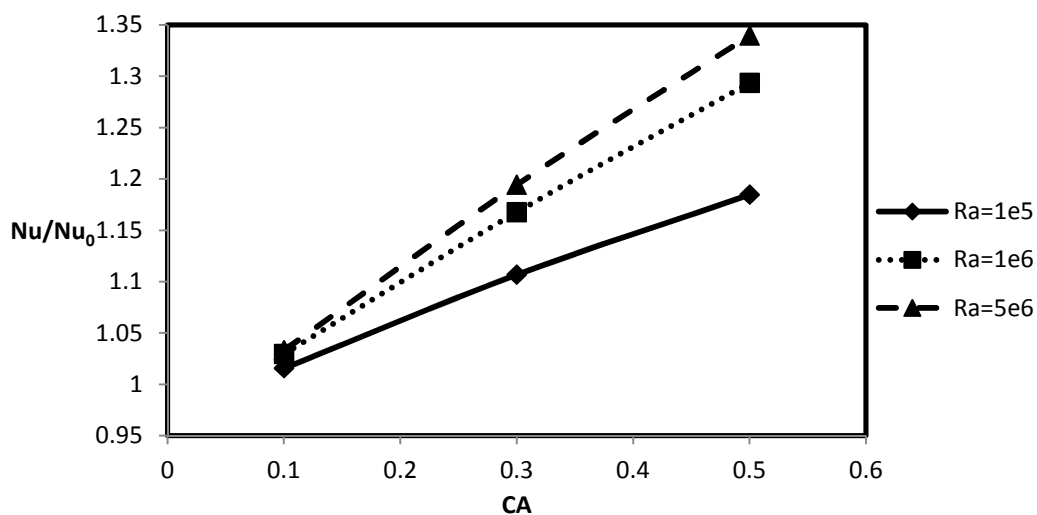
شکل ۵- تغییرات Nu/Nu_0 دیواره گرم برحسب فرکانس موج در دامنه‌ی موج $CA = 0.1$ ثابت



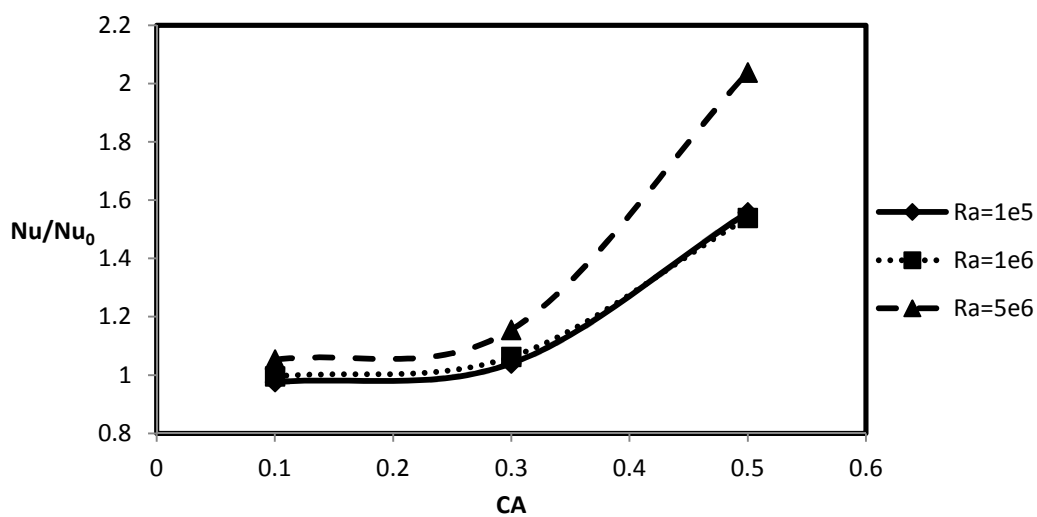
شکل ۶- تغییرات Nu/Nu_0 دیواره گرم برحسب فرکانس موج در دامنه موج $CA = 0.3$ ثابت



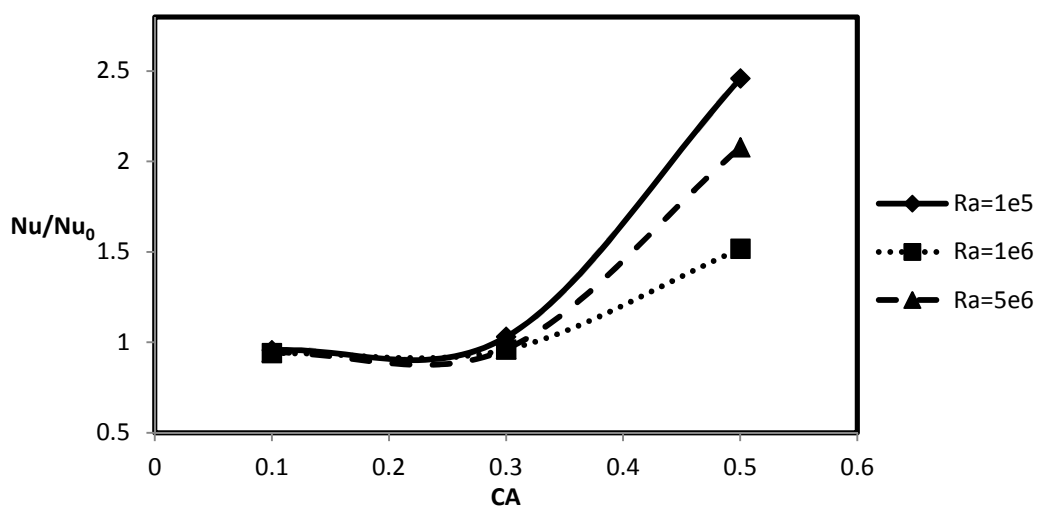
شکل ۷- تغییرات Nu/Nu_0 دیواره گرم برحسب فرکانس موج در دامنه موج $CA = 0.5$ ثابت



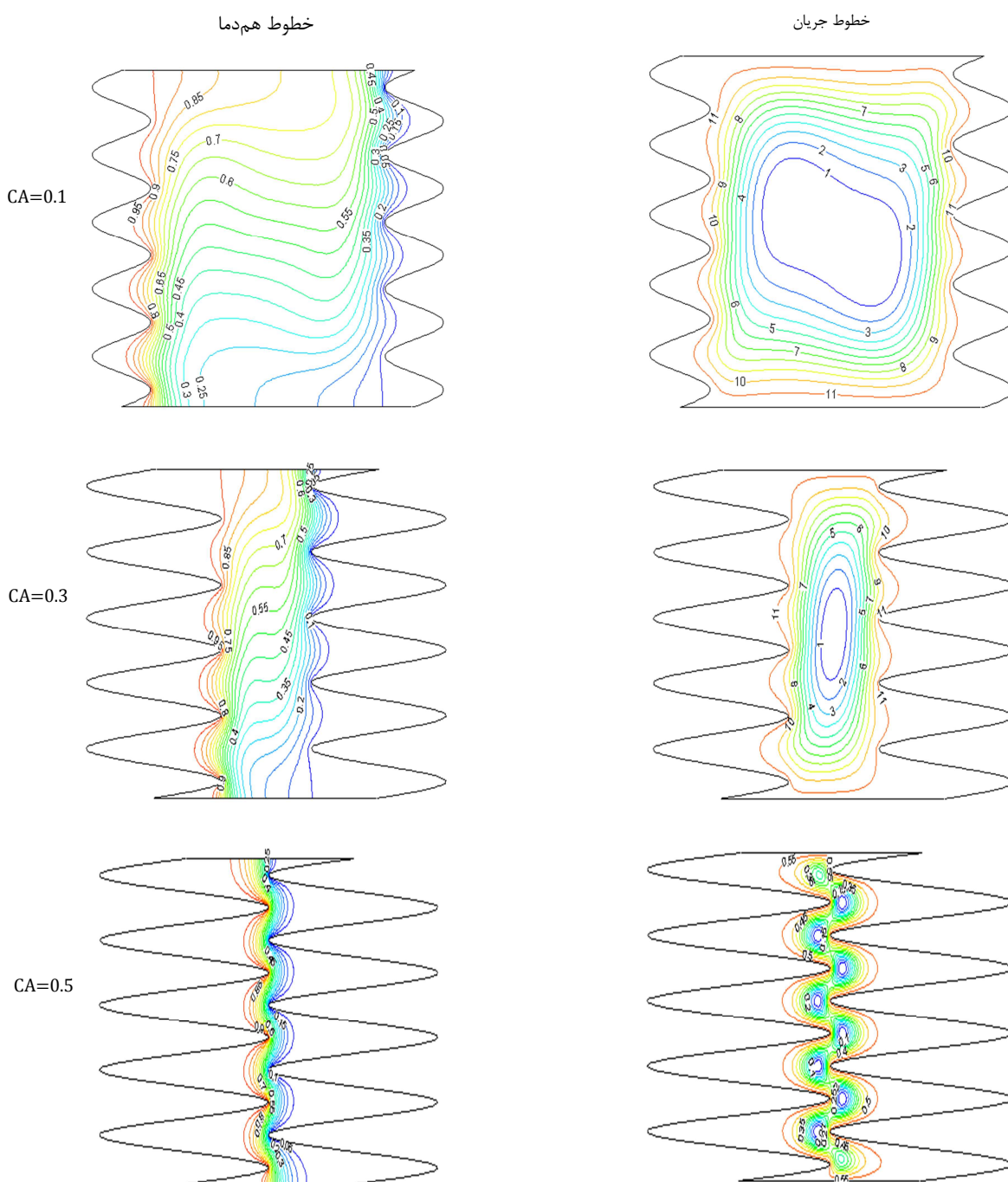
شکل ۸- تغییرات Nu/Nu_0 دیواره گرم برحسب دامنه موج در فرکانس موج $CF=1$ ثابت



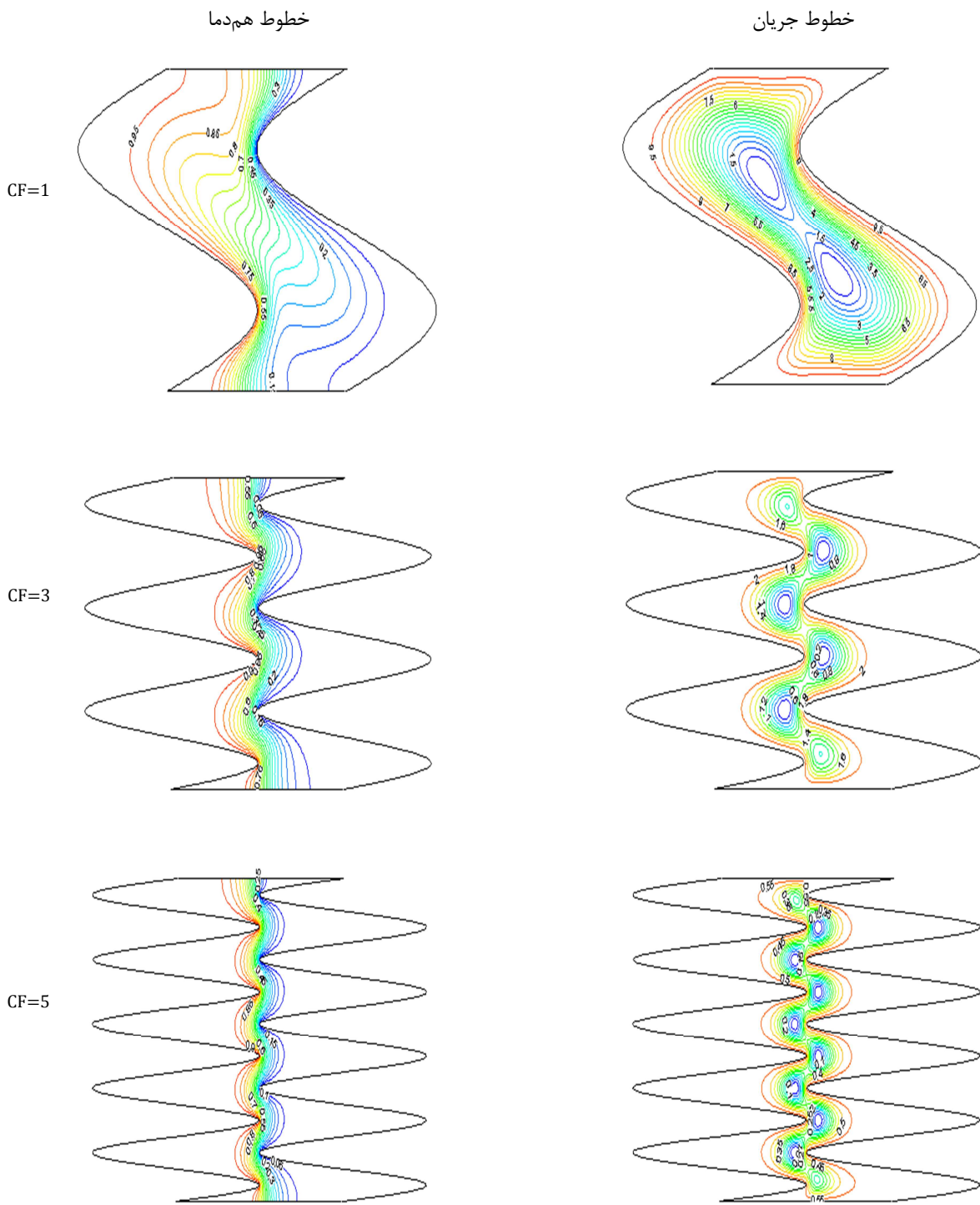
شکل ۹- تغییرات Nu/Nu_0 دیواره گرم برحسب دامنه موج در فرکانس موج $CF=3$ ثابت



شکل ۱۰- تغییرات Nu/Nu_0 دیواره گرم برحسب دامنه موج در فرکانس موج $CF=5$ ثابت



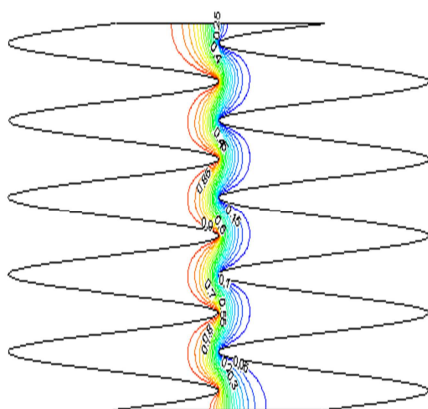
شکل ۱۱- کانتورهای خطوط جریان و خطوط همدمای بی بعد در حالت پایا برای دامنه‌های موج مختلف در عدد رایلی $Ra=10^5$ و فرکانس موج $CF=5$ ثابت



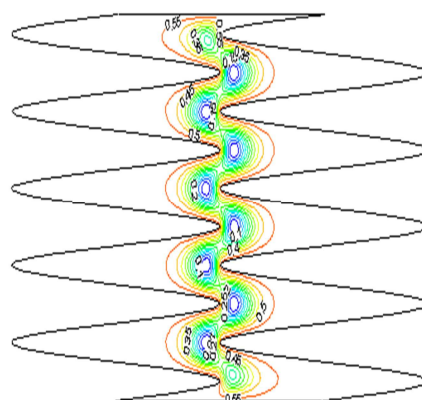
شکل ۱۲- کانتورهای خطوط جریان و خطوط هم‌دمای بی بعد در حالت پایا برای فرکانس‌های موج مختلف در عدد رابلی $Ra=10^5$ و دامنه موج $CA=0.5$ ثابت

$Ra = 10^5$

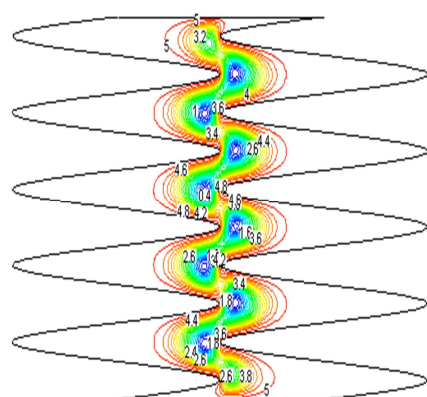
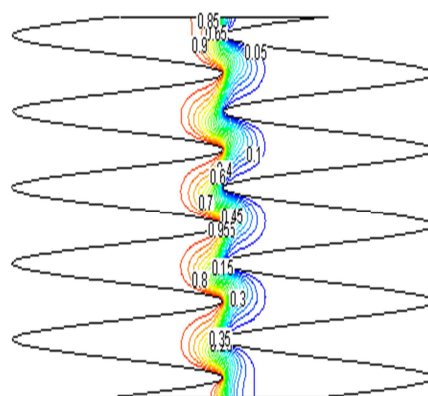
خطوط هم‌دما



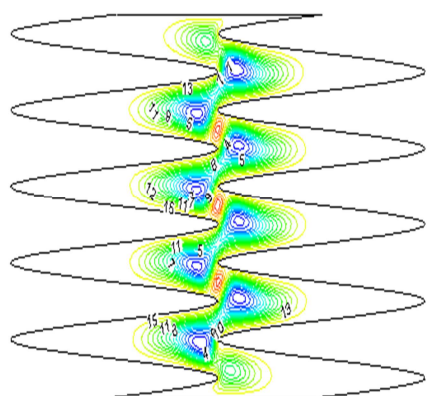
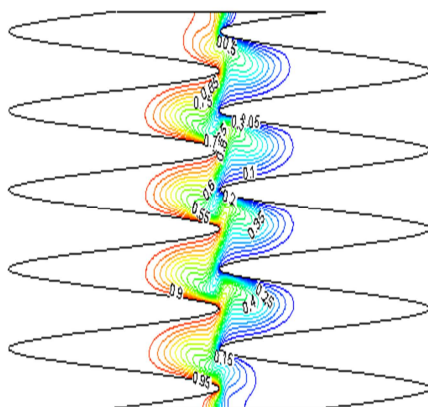
خطوط جریان



$Ra = 10^6$



$Ra = 5 \times 10^6$



شکل ۱۳- کانتورهای خطوط جریان و خطوط هم‌دمای بی بعد در حالت پایا برای اعداد رایلی مختلف دامنه موج $CA=0.5$ و فرکانس موج $CF=5$ ثابت

علائم			
A	مساحت دیوار گرم (m^2)	β	ضریب انبساط حجمی ($1/K$)
C_p	ثابت گرمای ویژه ($J/kg.K$)	$\square$	چگالی (kg/m^3)
CA	دامنه موج (m)	α	ضریب پخشندگی گرمایی (m^2/s)
CF	فرکانس موج ($1/m$)	Γ	متغیر دما

زیر نویس ها

C	دماي سرد	H	دماي گرم
H	ارتفاع محفظه (m)	p	فشار ثابت
h	ضریب انتقال گرمای جابجایی (W/m^2K)	s	سطح
K	ضریب هدایت گرمایی ($W/m.K$)		
L	عرض محفظه (m)		
l	طول دیوار گرم (m)		
n	اندیس تکرار نیوتن		
Nu	عدد ناسلت (بی بعد)		
Nu_0	عدد ناسلت محفظه مربعی (بی بعد)		
P	فشار بی بعد		
p	فشار (N/m^2)		
Pr	عدد پرانتل (بی بعد)		
Q	انتقال گرما (W)		
Ra	عدد رایلی (بی بعد)		
T	دما (K)		
U	سرعت بی بعد در راستای x		
u	سرعت در راستای x (m/s)		
V	سرعت بی بعد در راستای y		
v	سرعت در راستای y (m/s)		
(X, Y)	مختصات کارتیزین بی بعد		
(x, y)	مختصات کارتیزین (m)		
μ	لزجت دینامیکی ($Pa.s$)		
ν	لزجت سینماتیکی (m^2/s)		

مراجع

- [1] Basak T., Roy S., Balakrishnan A., "Effects of thermal boundary conditions on natural convection flows within a square cavity", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 49, no. 23, pp. 4525-4535, 2006 .
- [2] Bejan A., "convection heat transfer, third ed., Wiley", New York, pp. 244-290, 2003 .
- [3] Batchelor G., "Heat transfer by free convection across a closed cavity between vertical boundaries at different temperatures", Quart. Appl. Math, vol. 12, no. 3, pp. 209-233, 1954 .
- [4] Eckert E., Carlson W. O., "Natural convection in an air layer enclosed between two vertical plates with different temperatures", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 2, no. 1, pp. 106-120, 1961 .
- [5] Patterson J., Imberger J., "Unsteady natural convection in a rectangular cavity", Journal of FluidMechanics, vol. 100, no. 01, pp. 65-86, 1980 .
- [6] Markatos N. C., Pericleous K., "Laminar and turbulent natural convection in an enclosed cavity", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 27, no. 5, pp. 755-772, 1984 .
- [7] Zhong Z., Yang K., Lloyd J., "Variable property effects in laminar natural convection in a square enclosure", Journal of Heat Transfer, vol. 107, no. 1, pp. 133-138, 1985 .
- [8] Nicolette V., Yang K., Lloyd J., "Transient cooling by natural convection in a two-dimensional square enclosure", International journal of heat and mass transfer, vol. 28, no. 9, pp. 1721-1732, 1985 .
- [9] Meyer K. E., Larsen P. S., Westergaard C., Guillard F., "Temperature and velocity fields in natural convection by PIV and LIF", 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, pp.1-12, 2002 .
- [10] Kurekci N. A., O. Özcan, Anexperimental and Numerical Study of Laminar Natural Convection in

- a Differentially-Heated Cubical Enclosure, ISI Bilimi ve Teknigi Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology, vol. 32, no. 1, pp. 1-8, 2012 .
- [11] Cianfrini M., Corcione M., Quintino A., "Natural convection in square enclosures differentially heated at sides using alumina-water nanofluids with temperature-dependent physical properties", Thermal Science, no. 00, pp. 111-111, 2012 .
- [12] Hussain S. H., Hussein A. K., Mahdi M. M., "Natural convection in a square inclined enclosure with vee-corrugated sidewalls subjected to constant flux heating from below", Nonlinear Analysis, vol. 16, no. 2, pp. 152-169, 2011 .
- [13] Patankar S., "Numerical heat transfer and fluid flow": CRC Press, pp. 25-160, 1980 .
- [14] Mao Y., Lei C., Patterson J. C., "Unsteady near-shore natural convection induced by surface cooling", Journal of Fluid Mechanics, vol. 642, pp. 213-233, 2010 .
- [15] Leal M., Machado H., Cotta R., "Integral transform solutionsof transient natural convection in enclosures with variable fluid properties", International journal of heat and mass transfer, vol. 43, no. 21, pp. 3977-3990, 2000 .
- [16] Lo D., Young D., Tsai C., "High resolution of 2D natural convection in a cavity by the DQ method", Journal of computational and applied mathematics, vol. 203, no. 1, pp. 219-236, 2007 .
- [17] Hasan M. N., Saha S. C., Gu Y., "Unsteady natural convection within a differentially heated enclosure of sinusoidal corrugated side walls", International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 55, no. 21, pp. 5696-5708, 2012 .
- [18] Sojoudi A., Saha S. C., Khezerloo M., Gu Y., "Unsteady Natural Convection Within a Porous Enclosure of Sinusoidal Corrugated Side Walls", Transport in Porous Media, pp. 1-16, 2014 .
- [19] Jiji Latif M., "Heat Convection, Springer-Verlag Berlin Heiderberg", pp. 259-265, 2006.
- [20] Arnas J. J. P. a. O. A., "Heat Transfer and Turbulent Buoyant Convection", vol. 2, pp. 231-317, 1977.
- [21] Emery A. F., "The effect of magnetic upon the free convection in a conducting fluid", J. Heat Transfer, vol. 85, no. 2, pp. 119-124, 1963.