

شبیه سازی جریان سیال و انتقال گرمای داخل حفره U شکل چین دار

دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران، rasul_mohebbi@du.ac.ir
 دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، saharhaghighi@aut.ac.ir
 دکتری، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، dr.masoudmohebbi@gmail.com

رسول محبی*

سحر حقیقی خلیل آباد

مسعود محبی

چکیده

در مطالعه حاضر، انتقال گرمای همرفت طبیعی در یک حفره U شکل چین دار بررسی شده است. برای حل معادله بقای جرم (پیوستگی)، معادله بقای اندازه حرکت خطی (معادله مومنوم) و معادله انرژی از روش المان محدود استفاده شده است. صحت روش مورد استفاده با نتایج موجود بررسی گردیده و تطابق بالایی میان آن‌ها به دست آمده است. جریان سیال دوبعدی و آب نیز به عنوان سیال عامل در حفره انتخاب شده است. اعداد رایلی مختلف ($10^3 - 10^6$) و دیواره‌های چین دار، متغیرهای تأثیرگذار بر میدان‌های جریان و انتقال گرما می‌باشند. نتایج به صورت کانتور سرعت، جریان سیال، دما و عدد ناسلت متوسط بیان شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده این است که با افزایش عدد رایلی، آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار آن برابر ۷۶/۴۳ در عدد رایلی 10^6 است. همچنین در یک عدد رایلی ثابت، حفره صاف میزان آهنگ انتقال گرما بالاتری دارد و بیشترین مقدار افت انتقال گرما در حفره دو طرف چین دار اتفاق می‌افتد.

واژه‌های کلیدی: انتقال گرمای همرفت طبیعی، روش المان محدود، حفره U شکل، چین دار طرفین، چین دار مثلثی.

Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer inside a U-shape Corrugated Cavity

R. Mohebbi

S. Haghighi Khalilabad

M. Mohebbi

School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

School of Railway Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran

Abstract

In the present study, the natural convection heat transfer inside a corrugated U-shaped cavity studied numerically. For solving the mass equation (continuity), conservation of linear momentum equation and energy equation, the finite element method applied. The accuracy of used method investigated with the available results and a high agreement between them observed. Fluid flow is two-dimensional and water is chosen as the working fluid in the cavity. Different Rayleigh numbers (10^3-10^6) and corrugated walls are the variables affecting the fluid and heat transfer fields. The results expressed in terms of velocity contour, fluid flow, temperature and the average Nusselt number. The extracted results indicate that by rising the Rayleigh number, the heat transfer rate increases which the highest value of it is equal to 76.43 at $Ra=10^6$. Also, at a fixed Rayleigh number, the smooth cavity has a highest heat transfer rate and the maximum of heat transfer's loss occurs at cavity by corrugated on the both sides.

Keyword: Natural convection heat transfer, Finite element method, U-shaped cavity, corrugated on both sides, Triangular corrugated.

دلیل تشکیل گردابه های جانبی می گردد.

انتقال گرمای داخل محیط متخلخل در محفظه مثلثی پره دار با روش اختلاف محدود توسط وارول و همکاران [۵] بررسی گردید. نتایج آنها نشان داد که از پره می توان به عنوان ابزار کنترل کننده انتقال گرما استفاده نمود. همچنین آیونالا و همکاران [۶] جریان سیال و انتقال گرمای داخل حفره مایل با دیواره منحنی را بررسی نمودند. آنها دریافتند که با افزایش دامنه موج دیواره، میزان عدد ناسلت محلی کاهش می یابد. حیدری و کرمانی [۷] انتقال گرمای داخل کانال موجی شکل حاوی نانوسیال را بررسی نمودند. در بررسی آنها تغییرات دامنه موج بر روی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک سطحی بررسی شد. نتایج آن‌ها بهبود استفاده از نانو ذرات در افزایش آهنگ انتقال گرما را نشان داد.

همرفت طبیعی انتقال گرمای داخل حفره با چین خوردگی های سینوسی در اعداد رایلی مختلف با استفاده از روش المان محدود، توسط حسن و همکاران [۸] بررسی گردید. آنها از هوا به عنوان سیال

۱- مقدمه

بررسی جریان سیال و انتقال گرما داخل حفره‌ها [۲ و ۱] و کانال‌ها [۳] از موضوعات مهم و کاربردی روز دنیا می باشد که به دلیل اهمیت کاربرد آن در گردآورهای خورشیدی، مبادله‌کن‌های گرمایی و تجهیزات الکترونیکی، تا کنون توسط محققان بسیاری با روش های مختلف تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این بین، محفظه های چین دار به دلیل تغییر در الگوی جریان، به عنوان روشی برای افزایش یا کاهش انتقال گرما مورد توجه دانشمندان قرار گرفته اند.

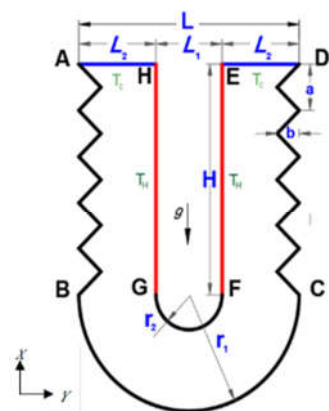
انتقال گرمای همرفت طبیعی داخل محفظه موجی شکل حاوی ماده متخلخل توسط راتیش کومار و شالینی [۴] بررسی گردید. آنها از روش المان محدود جهت شبیه سازی خود استفاده نموده و به بررسی خطوط جریان و دما در داخل محفظه پرداختند. نتایج آنها نشان داد که چین سطح موجی شکل ایجاد شده، باعث کاهش آهنگ انتقال گرما به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: rasul_mohebbi@du.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۱/۱۸

شده $L=H$ طول و ارتفاع حفره، $r_1=L/2$ و $r_2=0.15L$ به ترتیب شعاع‌های بخش خارجی و داخلی قسمت U شکل، $L_1=0.3L$ و $L_2=0.35L$ به ترتیب طول وجه‌های بالایی حفره می‌باشند.



شکل ۱- هندسه مورد بررسی

ارتفاع و قاعده بخش چین دار نیز به ترتیب برابر $a=0.2L$ و $b=0.1L$ می‌باشد. در این پژوهش حفره‌های مختلفی بررسی گردیدند که شامل حفره صاف فاقد چین، حفره دارای چین در دیواره چپ، حفره دارای چین در دیواره راست و حفره هر دو دیواره چپ و راست چین دار در اعداد رایلی 10^2 تا 10^6 است.

سیال عامل مورد استفاده آب بوده و دیواره‌های AH و ED سرد با دمای $T_c=0$ K، EF و GH گرم با دمای $T_h=1$ K و مابقی دیواره‌ها، عایق در نظر گرفته شدند. چگالی طبق تعریف بوزینسکی تغییر کرده و ساختار جریان نیز آرام فرض شده است. گرانش برای ایجاد اختلاف چگالی ضروری است. آهنگ انتقال گرما داخل حفره در اعداد رایلی متعدد با محاسبه عدد ناسلت روی دیواره‌های گرم بیان شده است.

۲-۲- روابط و شرایط مرزی

در این شبیه سازی، معادلات ابتدا در فرم بی بعد به صورت زیر تعریف گردیدند:

$$X = x/L, Y = y/H, U = (uL)/\alpha, V = (vL)/\alpha$$

$$P = (pL^2)/(\rho\alpha^2), \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (1)$$

که U و V مؤلفه‌های سرعت در جهات x و y ، T دما، p فشار و θ دمای بی بعد می‌باشد. همچنین α و ρ به ترتیب ضریب پخش گرمایی و چگالی سیال است. با تعریف پارامترهای بی بعد تعریف شده، معادلات جریان دائمی پیوستگی، مومنتم و انرژی برای همرفت طبیعی لایه‌ای داخل حفره در حالت بی بعد به شرح ذیل بیان می‌شود:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (2)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \text{Ra Pr } \theta \quad (4)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (5)$$

که اعداد پرانتل و رایلی طبق رابطه (۶) تعریف می‌شوند:

عامل استفاده نمودند و دریافتند که افزایش دامنه و فرکانس موج باعث کاهش آهنگ انتقال گرما می‌شود.

انتقال گرمای همرفت طبیعی داخل حفره مثلثی در حضور نانو سیال دارای دیوار چین دار توسط رحمان و همکاران [۹] بررسی شد. در مطالعه آنها دیواره پایینی گرم و دیواره های کناری سرد در نظر گرفته شده بود و بهبود انتقال گرما در استفاده از نانو سیال مشاهده گردید.

نوایی و همکاران [۱۰] به طور عددی به بررسی اثر چین دار کردن کانال بر میزان انتقال گرما در اعداد رینولدز مختلف پرداختند. نتایج آنها نشان داد که استفاده از نانو سیال باعث افزایش آهنگ انتقال گرما می‌گردد.

حسین [۱۱] همرفت طبیعی هیدرومغناطیسی داخل حفره سینوسی مایل در عدد پرانتل 0.24 را بررسی نمود. نتایج وی بیانگر افزایش آهنگ انتقال گرما با افزایش عدد لوییس بود. تأثیر موج دار کردن محفظه مربعی شکل و نانو سیال بر میزان آهنگ انتقال گرما توسط میلانی شیروانا و همکاران [۱۲] بررسی شد. نتایج آنها بیانگر اثر نامطلوب اثر افزایش دامنه موج بر میزان انتقال گرما بود.

یوآن و همکاران [۱۳] به بررسی همرفت طبیعی حفره I شکل، تحت تاثیر میدان مغناطیسی و وجود منابع گرم و سرد متعدد پرداختند. آنها نشان دادند که آرایش گرمایی منابع سرد و گرم به طور قابل توجهی بر الگوهای سرعت و عملکرد انتقال گرما تأثیر می‌گذارد. مظفری و همکاران [۱۴] با استفاده از روش شبکه بولتزمن، انتقال گرما رسانشی داخل میکروکانال مایل را بررسی نمودند و دریافتند که گرانش باعث تغییر در المان های سرعت می‌گردد.

با بررسی مطالعات انجام شده در گذشته، آشکار می‌شود که تا کنون هیچ مطالعه ای در خصوص جریان سیال و انتقال گرمای داخل حفره U شکل چین دار تحت تاثیر اعداد رایلی مختلف که کاربرد فراوانی در طراحی و ساخت مبادله‌کن‌های گرمایی و تجهیزات الکترونیکی دارد، انجام نشده است. لذا در این مقاله برای اولین بار تأثیر چین ها در اعداد رایلی مختلف در دیواره‌های طرفین یک حفره‌ی U شکل حاوی آب بر آهنگ انتقال گرما، در نرم‌افزار کامسول^۱ بررسی شده است.

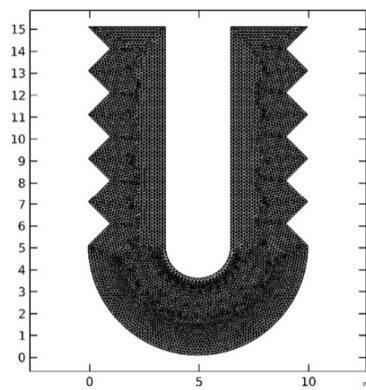
نرم افزار کامسول نرم‌افزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی عددی پدیده‌های فیزیکی مختلف است. این نرم افزار با داشتن ماژول‌های متنوع، قابلیت شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف در حوزه‌های مکانیک سیالات و جامدات را دارد. این نرم‌افزار نسبت به سایر نرم‌افزارهای شبیه‌سازی ویژگی‌هایی از جمله امکان تعریف و ایجاد هندسه، انتخاب ماژول و ایجاد شبکه محاسباتی و حل کردن معادلات جدید بر مبنای روش المان محدود، رابط کاربری بسیار خوب، امکان ورود و خروج فایل و غیره دارد که به این دلیل برای شبیه‌سازی انتخاب شده است.

۲- فرمول ها و روابط

۲-۱- هندسه مورد بررسی

در این مطالعه، جریان سیال و انتقال گرمای دوبعدی در محفظه U شکل چین دار مطابق شکل ۱ بررسی شده است. در شکل نشان داده

^۱ Comsol



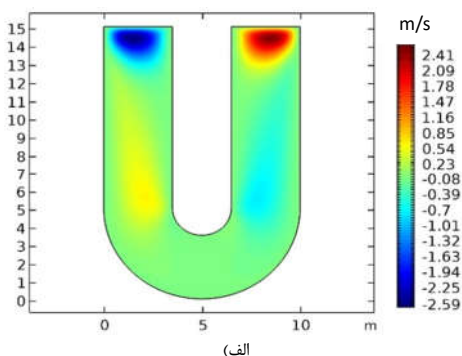
شکل ۲- مش مورد استفاده

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط در شبکه‌بندی‌های مختلف برای حفره هر دو طرف چین دار

رایلی	شبکه	عدد ناسلت متوسط	درصد خطا $100 \times \frac{ Nu_{new} - Nu_{old} }{Nu_{new}}$
۱.۳	۱۴۰	۱۰/۷۹۵۴	۱۶/۶۵
	۴۳۶	۹/۲۵۴۲	۷/۳۱
	۳۳۰۲	۸/۶۲۳۸	۰/۱۸
۱.۶	۱۴۰	۸۵/۴۹۶۳	۹/۲۴
	۴۳۶	۷۸/۲۵۹۴	۲/۹۴
	۳۳۰۲	۷۶/۰۱۹۷	۰/۱۵

۲-۳- کانتورهای سرعت، دما و خطوط جریان

همان گونه که آشکار است، به منظور بررسی یک بیان و تحلیل دقیق بین نتایج حاصل از اعمال چین در حفره، نیاز است که در ابتدا نتایج حاصل از حفره صاف مورد مطالعه قرار گیرد، لذا در شکل ۳ کانتورهای سرعت داخل حفره برای اعداد رایلی مختلف به ازای حفره صاف نشان داده شده است. مطابق این شکل، اندازه سرعت در بخش بالایی حفره ماکزیمم بوده که تحت تأثیر شکل حفره است. همان گونه که مشاهده می‌گردد، مقدار سرعت در مابقی قسمت‌ها بسیار پایین است. با افزایش عدد رایلی و بزرگ شدن جمله همرفتی، این مقدار سرعت افزایش می‌یابد. بردار سرعت در هر دو بخش حفره متقارن می‌باشد.



(الف)

$$Ra = \frac{g\beta L^3(T_h - T_c)}{\nu\alpha} Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (6)$$

که g شتاب جاذبه، β و θ ضریب انبساط حجمی و لزجت سینماتیک و L طول محفظه است. شرایط مرزی بی‌بعد نیز به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شوند:

$$U = V = 0 \quad \text{شرط عدم لغزش در کل دیواره‌ها} \quad (7)$$

$$\theta = 1 \quad \text{برای دیواره‌های گرم}$$

$$\theta = 0 \quad \text{برای دیواره‌های سرد}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{برای دیواره‌های عایق}$$

عدد ناسلت محلی و متوسط نیز در دیواره داخلی با استفاده از

روابط (۸) و (۹) در جهت عمود بر سطح (n)، به دست می‌آید:

$$Nu_{local} = -\frac{\partial \theta}{\partial n} \quad (8)$$

$$Nu = \int_0^1 Nu_{local} dY \quad (9)$$

۳- بررسی نتایج

۳-۱- اعتبار سنجی

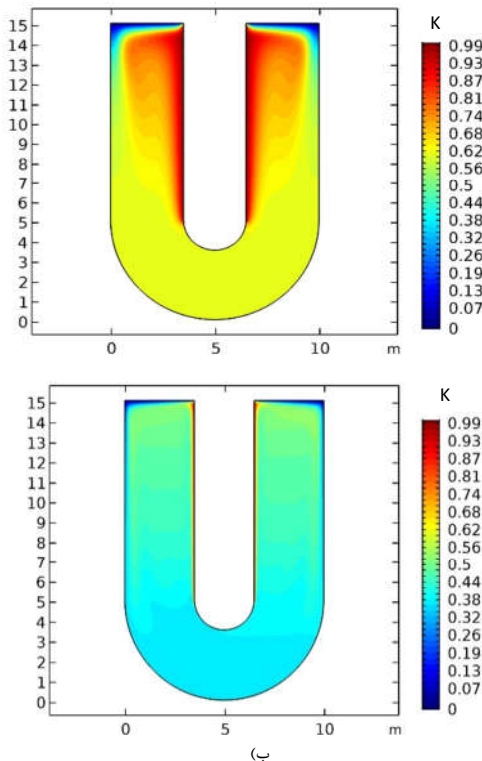
به منظور اثبات قابلیت اعتماد روش عددی، نتایج تحقیقات گذشته با نتایج موجود از حل حاضر بررسی شده‌اند. در جدول ۱ نتایج مقایسه بین روش حاضر برای جریان سیال در محفظه خالی با مطالعات گذشته انجام شده است. مطابق این شکل‌ها، نتایج اختلاف بسیار اندکی (کمتر از ۰/۵ درصد) با یکدیگر دارد.

جدول ۱- عدد ناسلت متوسط و نتایج موجود

عدد رایلی	یمان و همکاران	درصد خطا با مطالعه حاضر	مزرهاب و همکاران	درصد خطا با مطالعه حاضر	تحقیق حاضر
۱.۳	۱/۱۱۵	0/1796	۱/۱۱۲	0/08985	۱/۱۱۳
۱.۴	۲/۲۴۷	0/2230	۲/۲۴۱	0/0446	۲/۲۴۲
۱.۵	۴/۵۴۴	0/4642	۴/۵۱۹	0/08844	۴/۵۲۳
۱.۶	۸/۸۱۳	0/0906	۸/۸۱۷	0/04535	۸/۸۲۱

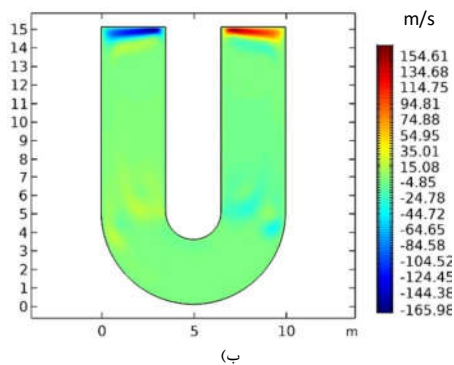
جهت حل مسئله، دامنه محاسباتی شبکه‌بندی شده است. یک شبکه مناسب و تا حد امکان یکنواخت در دقت جواب‌ها و همچنین پایداری حل عددی اهمیت زیادی دارد. مش مورد استفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور استقلال کد عددی از شبکه مورد استفاده نیز جدول ۲ برای حالت‌های مختلف شبکه‌بندی تهیه گردید. مطابق این جدول تعداد ۱۲۶۷۹ المان در کل محاسبه عددی مورد استفاده قرار گرفت.

در شکل ۵ کانتورهای دمای حفره صاف در حالت‌های مختلف نمایش داده شده که به دلیل پدیده‌ی غالب انتقال گرمای رسانی، خطوط هم‌دما در اعداد رایلی پایین کاملاً متقارن بوده و با افزایش عدد رایلی، سهم انتقال گرمای همرفتی بیشتر شده و خطوط هم دما در اطراف دیواره گرم متمرکزتر می‌گردد.



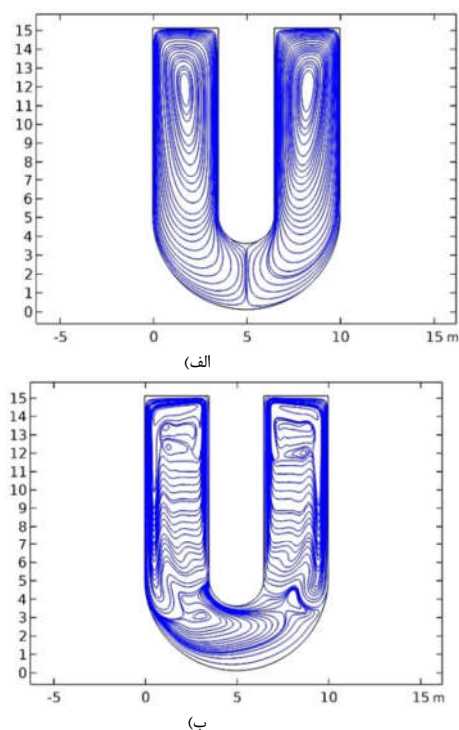
شکل ۵- کانتورهای دما در اعداد رایلی مختلف در حفره صاف،
الف) $Ra=10^3$ ب) $Ra=10^6$

به منظور بررسی تأثیر چین در حفره، حالت‌های مختلف حفره دو طرف چین دار، چین در سمت راست و چین در سمت چپ حفره بررسی شد. شکل‌های ۶ تا ۸ تأثیر چین دو طرف را بر کانتورهای سرعت، خطوط جریان و دما نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶، در قسمت‌های بالایی حفره، سرعت جریان بالا بوده و این تمرکز سرعت در قسمت چین دار نیز مشاهده می‌گردد. به نظر می‌رسد که در انتهای حفره به همین دلیل، تمرکز جریان بالایی وجود دارد. همچنین تأثیر افزایش عدد رایلی بر میزان افزایش سرعت در شکل ۶ (ب) نشان داده شده است. لبه‌های بالایی حفره و چین‌های طرفین حفره، از جمله نقاط دارای تمرکز سرعت بالا می‌باشند که می‌تواند در آهنگ انتقال گرما نیز تأثیر داشته باشند.

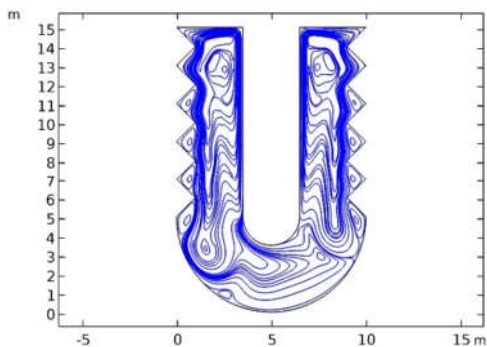


شکل ۳- کانتورهای سرعت در اعداد رایلی مختلف در حفره صاف، الف) $Ra=10^3$ ب) $Ra=10^6$

در شکل ۴ خطوط جریان حفره صاف در اعداد رایلی مختلف نیز نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها، خطوط جریان تحت تأثیر شکل حفره و عدد رایلی می‌باشد. یک گردابه ساعت‌گرد و یک گردابه پادساعت‌گرد در داخل حفره مشاهده می‌شود. همان گونه که آشکار است، تقارن گردابه‌ها در طرفین وجود دارد. گردابه‌ها تشکیل شده، جریان داخل حفره را به گردش در می‌آورند که باعث توزیع آن نیز می‌گردد. تأثیر افزایش عدد رایلی در این شکل نیز آشکار است. با افزایش عدد رایلی میزان قدرت گردابه (تابع جریان) افزایش یافته و الگوی آن نیز تغییر می‌کند به گونه‌ای که گردابه تشکیل یافته از حالت متقارن خارج می‌شود. در عدد رایلی پایین، شکل گردابه‌های تشکیل یافته، بیضوی با هسته‌های قابل تشخیص و منظم است که در حالت رایلی بالا، هسته اصلی به صورت افقی و نامنظم می‌گردد.

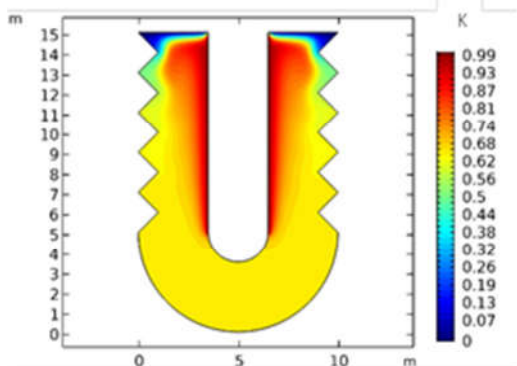


شکل ۴- خطوط جریان در اعداد رایلی مختلف در حفره صاف، الف) $Ra=10^3$ ب) $Ra=10^6$

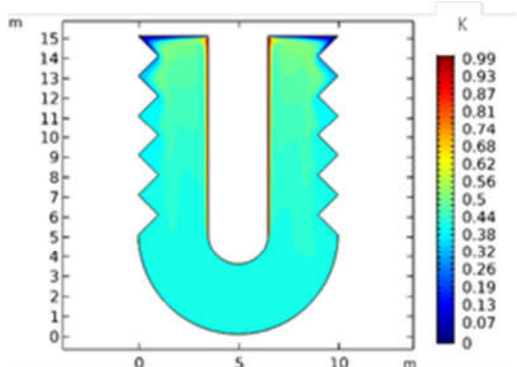


شکل ۷- خطوط جریان در اعداد رایلی مختلف در حفره دو طرف چین دار، الف) $Ra=10^2$ ب) $Ra=10^6$

مطابق شکل ۸، کانتورهای دما نیز کاملاً تحت تأثیر چین ها قرار می‌گیرند. مقایسه بین شکل ۵ و ۸ نشان می‌دهد که گرادیان دمای دیواره گرم در حالت حفره صاف، بیشتر از حالت حفره دارای چین می‌باشد. این امر منجر به کاهش آهنگ انتقال گرما در حالت استفاده از چین در حفره می‌گردد. علت این امر ناشی از به دام افتادن جریان توسط این چین ها و در نتیجه افزایش دمای داخل حفره می‌باشد. مطابق شکل ۸) ب، افزایش عدد رایلی باعث افزایش آهنگ انتقال گرما می‌گردد.

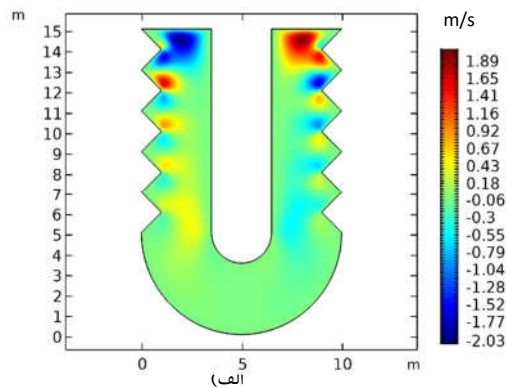


الف)

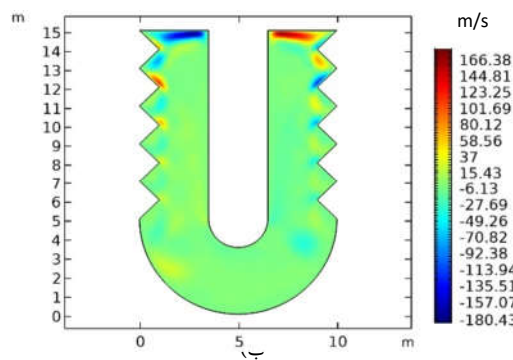


ب)

شکل ۸- کانتورهای دما در اعداد رایلی مختلف در حفره دو طرف چین، الف) $Ra=10^2$ ب) $Ra=10^4$ ج) $Ra=10^5$ د) $Ra=10^6$



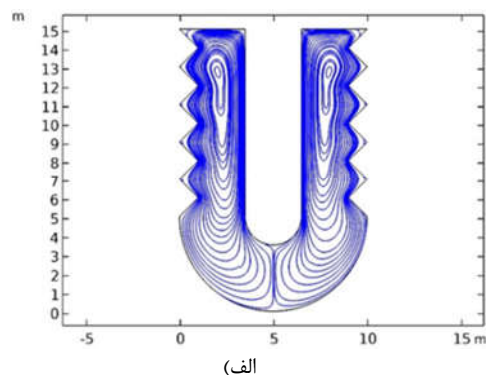
الف)



ب)

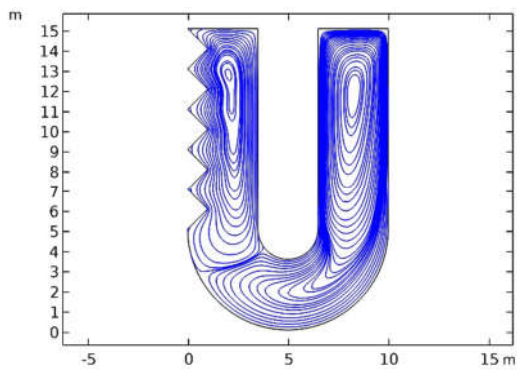
شکل ۶- کانتورهای سرعت در اعداد رایلی مختلف در حفره دو طرف چین دار، الف) $Ra=10^2$ ب) $Ra=10^6$

مطابق شکل ۷، چین ها در حفره، کاملاً در تغییر الگوی خطوط جریان تأثیر دارند. در رایلی 10^3 دو گردابه با هسته بیضی‌شکل در طرفین حفره تشکیل می‌گردد که با افزایش عدد رایلی بر تعداد گردابه‌های کوچک داخل حفره افزوده شده که این پدیده در رایلی 10^6 کاملاً مشهود است. چین ها با به دام انداختن جریان، باعث تشکیل گردابه‌های کوچکی می‌گردند.

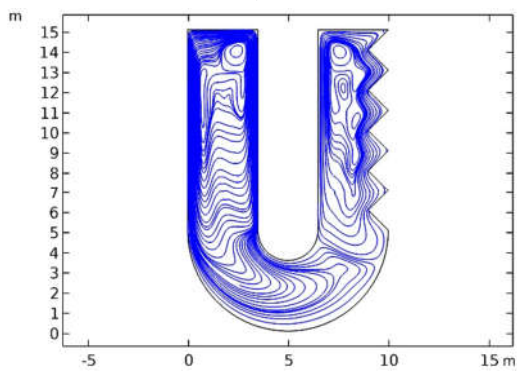


الف)

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ تأثیر چین در طرف چپ یا راست حفره بر کانتورهای سرعت، خطوط جریان و کانتورهای دما نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، چین‌ها در دیواره‌ها کاملاً بر میدان جریان و دما تأثیر می‌گذارند. به دلیل عدم تقارن در این حالت در به کارگیری چین‌ها، تمرکز سرعت، جریان و دما نیز نامتقارن می‌گردد. این شکل‌ها مقایسه خوبی بین حالت بخش صاف حفره با بخش چین‌دار می‌باشد. مطابق شکل ۹، گرچه بخش بالایی حفره از جمله نقاط پر سرعت محسوب می‌گردد، اما چین نیز با به دام انداختن جریان، منجر به افزایش سرعت به خصوص در لبه‌ها شده است. تأثیر افزایش عدد رایلی نیز کاملاً مشهود است.



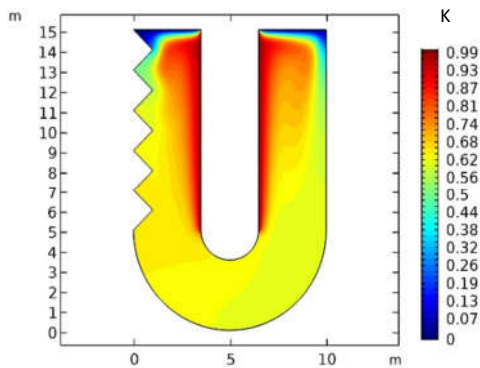
(الف)



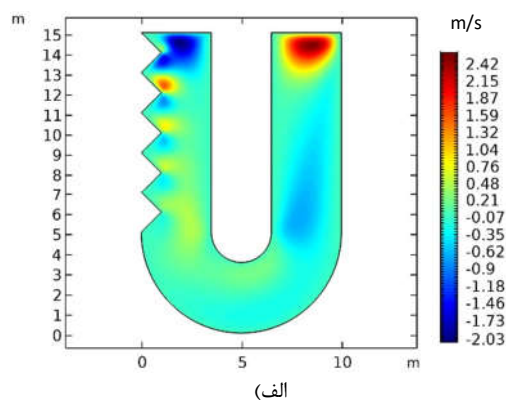
(ب)

شکل ۱۰- خطوط جریان در اعداد رایلی مختلف در حفره با چین در طرفین، (الف) $Ra=10^3$ (ب) $Ra=10^6$

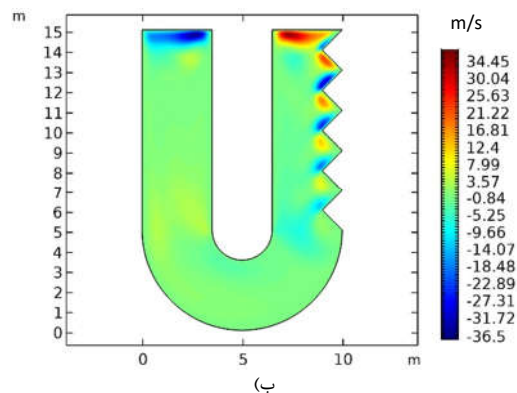
مطابق شکل ۱۱، گوشه‌های بالایی حفره از جمله نقاط سرد محسوب می‌گردند که در این قسمت‌ها گرما به خوبی نفوذ نکرده است. همچنین افزایش عدد رایلی نیز باعث افزایش گرادیان دما در دیواره‌های گرم و در نتیجه افزایش آهنگ انتقال گرما شده است.



(الف)



(الف)



(ب)

شکل ۹- کانتورهای سرعت در اعداد رایلی مختلف در حفره با چین در طرفین، (الف) $Ra=10^3$ (ب) $Ra=10^6$

مطابق شکل ۱۰، گردابه‌ها به سمت بخش چین‌دار کشیده شده‌اند که نشان‌دهنده تمایل بالای چین‌ها در متمرکز کردن سیال است.

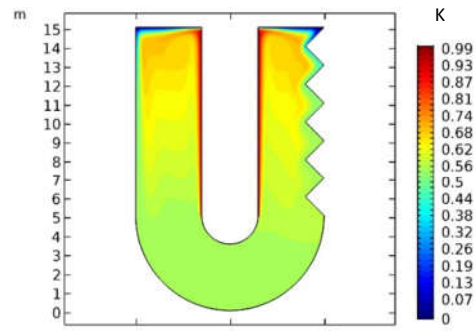
افزایش آهنگ انتقال گرما می‌شود. همچنین نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این مطلب است که بیشترین آهنگ انتقال گرما برای حالت حفره صاف است.

۵- سپاسگزاری

از حمایت های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه دامغان در اجراء قرارداد همکاری تحقیقاتی به شماره ۲۶۴۶۳۴-۴/۱- تشکر و قدردانی می‌شود.

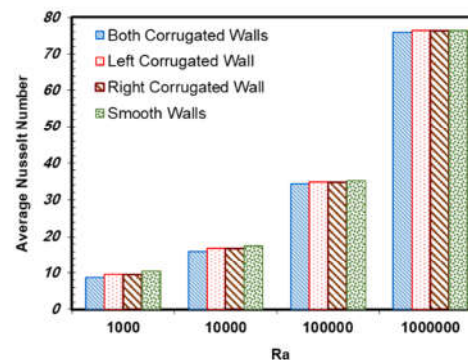
۶- مراجع

- [1] Matori A., Mohebbi R., Hashemi Z., Ma Y., Lattice Boltzmann study of multi-walled carbon nanotube (MWCNT)-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids natural convection heat transfer in a Π -shaped cavity equipped by hot obstacle. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, No., 136, pp., 2495-2508, 2018.
- [2] Alsabery A.I., Mohebbi R., Chamkha A.J. et al. Impacts of magnetic field and non-homogeneous nanofluid model on convective heat transfer and entropy generation in a cavity with heated trapezoidal body. *J Therm Anal Calorim*, Vol., 138, pp., 1371-1394, 2019.
- [3] Mohebbi R., Nazari M., Kayhani M.H., Comparative study of forced convection of a power-law fluid in a channel with a built-in square cylinder. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, Vol. 57, No. 1, 2016.
- [4] Rathish Kumar B., Shalini., Free convection in a non-Darcian wavy porous Enclosure. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 41, pp. 1827-1848, 2003.
- [5] Varol Y., Oztop H., Varol A., Natural convection in porous triangular enclosures with a solid adiabatic fin attached to the horizontal wall. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 19-27, 2007.
- [6] Aounallah M., Addad Y., Benhamadouche S., Imine O., Adjout L., Laurence D., Numerical investigation of turbulent natural convection in an inclined square cavity with a hot wavy wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1683-1693, 2007.
- [7] Heidary H., Kermani M., Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1520-1527, 2010.
- [8] Hasan M. N., Sahab S. C., Gu Y. T., Unsteady natural convection within a differentially heated enclosure of sinusoidal corrugated side walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 5696-5708, 2012.
- [9] Rahmana M. M., Mojumderc S., Sahac S., Mekhilefa S., Saidur R., Augmentation of natural convection heat transfer in triangular shape solar collector by utilizing water based nanofluids having a corrugated bottom wall. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 117-127, 2014.
- [10] Navaeia A. S., Mohammedb H. A., Munisamy K. M., Yarmande H., Gharekhani S., Heat transfer enhancement of turbulent nanofluid flow over various types of internally corrugated channels. *Powder Technology*, Vol. 286, pp. 332-341, 2015.
- [11] Hussain S. H., Analysis of heatlines and entropy generation during double-diffusive MHD natural convection within a tilted sinusoidal corrugated porous enclosure. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 19, pp. 926-945, 2016.
- [12] Milani Shirvana K., Ellahib R., Mamouriana M., Moghiman M., Effects of wavy surface characteristics on natural convection heat transfer in a cosine corrugated square cavity filled with nanofluid. *International Journal of*



شکل ۱۱- دانتورهای دما در اعداد رایلی مختلف در حفره با چین در طرفین، الف) $Ra=10^3$ ب) $Ra=10^6$

به منظور بررسی میزان انتقال گرما، عدد ناسلت متوسط داخل حفره محاسبه گردید. در شکل ۱۲ عدد ناسلت متوسط در اعداد رایلی متفاوت و به ازای حفره با چین های مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش عدد رایلی در تمام حالت‌ها، به علت افزایش سهم همرفت در مقابل رسانش، میزان آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد. همچنین در یک عدد رایلی ثابت، حفره صاف به دلیل کمتر بودن گردابه‌های کوچک، میزان آهنگ انتقال گرمای بالاتری دارد. لذا می‌توان از این حفره جهت به منظور دستیابی به بهترین آهنگ انتقال گرما استفاده نمود. این میزان افزایش، با افزایش عدد رایلی رشد چشمگیری می‌یابد. قابل ذکر است که بیشترین مقدار عدد ناسلت برابر $76/43$ در عدد رایلی 10^6 دیده می‌شود. حفره دو طرف چین دار نیز بیشترین افت انتقال گرما را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نمودارهای عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رایلی، به ازای وجود حفره در حالت‌های مختلف

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش از روش المان محدود جهت بررسی همرفت طبیعی دوبعدی جریان لایه‌ای تراکم‌ناپذیر در داخل یک حفره U شکل چین دار استفاده شد و قابلیت این روش در شبیه‌سازی محیط‌های بسته مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر پارامترهای عدد رایلی و چین های مختلف در حفره مورد مطالعه قرار گرفت. آهنگ انتقال گرما در محفظه، به شکل حفره وابسته بوده و با ایجاد چین ها کاهش می‌یابد. افزایش عدد رایلی نیز، منجر به افزایش سهم انتقال گرمای همرفت و

Heat and Mass Transfer, Vol. 107, pp. 1110-1118, 2017.

- [13] Yuan Ma, Mohebbi, R., Rashidi, M. M., Yang, Z., Sheremet, M., Nanoliquid thermal convection in I-shaped multiple-pipe heat exchanger under magnetic field influence, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol., 550, 2020.
- [14] Mozaffari M., D'Orazio A., Karimipour A. Abdollahi, A. and Safaei, M.R. (2020), "Lattice Boltzmann method to simulate convection heat transfer in a microchannel under heat flux: Gravity and inclination angle on slip-velocity", *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 30 No. 6, pp. 3371-3398
- [15] Mezrhab A., Moussaoui M.A., Jami M., Naji H., Bouzidi M. H., Double MRT thermal lattice Boltzmann method for simulating convective flows, *Physics Letter A*, Vol., 374, pp., 3499-3507, 2010.
- [16] Yang X., Shi B., Chai Z., Generalized modification in the lattice Bhatnagar-Gross-Krook model for incompressible Navier-Stokes equations and convection-diffusion equations, *Physics Review E*, 90 013309, 2014.