

بررسی انتقال گرمای جابجایی طبیعی یک حفره مربعی دارای المانهای زبری مثلثی

رسول محبی*

محمد مسعودنیا

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

فارغ التحصیل کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

چکیده

جابجایی طبیعی دوبعدی جریان لایه‌ای تراکم ناپذیر در داخل یک حفره مربعی با وجود المان‌های زبری مثلثی بر روی دیواره‌های عمودی، با روش المان محدود بررسی شده است. مطالعه حاضر برای نسبت‌های ابعادی مختلف و حالت‌های گوناگون قرارگیری المان‌ها بر روی دیواره‌چپ به تنهایی و هر دو دیواره‌چپ و راست با هم، در اعداد رایلی مختلف انجام شده است. هوا به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است. رفتار هیدروپویسمیک و گرمایی سیال در حضور المانهای زبری مثلثی در قالب خطوط جریان، خطوط هم‌دما و عدد ناسلت متوسط بررسی شده است. نتایج به دست آمده بر پایه این شبیه‌سازی نشان دهنده این مطلب است که المانهای مثلثی به طور قابل توجهی بر رفتار جریان سیال و انتقال گرمای داخل حفره مربعی تاثیر می‌گذارد. بیشترین کاهش در آهنگ انتقال گرما نسبت به حفره خالی برای حالت $A=0.05$ ، در عدد رایلی 10^6 و برابر 26.66% برای زمانی که المان‌ها زبری در دیواره گرم واقع شده است، محاسبه گردید.

واژه‌های کلیدی: جابجایی طبیعی، حفره مربعی، المانهای مثلثی، عدد ناسلت.

Simulation of Natural Convection Heat Transfer of a Square Cavity Consist of Triangular Roughness Elements

R. Mohebbi

School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

M. Masodnia

School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

Abstract

Natural convection of a two-dimensional laminar incompressible fluid flow inside a square cavity with triangular roughness elements on the vertical walls has been investigated by finite element method. The present study has been carried out for different aspect ratio and various cases of position of element on the left wall singly and both left and right wall together in different Rayleigh number. Air is chosen as a working fluid. Hydrodynamic and thermal behavior of fluid in the presence of triangular roughness elements was analyzed in form of streamlines, isotherms and the average Nusselt number. Results based on this numerical study showed that the triangular elements considerably affect the hydrodynamic and thermal behavior of fluid in a square cavity. The maximum reduction in the rate of heat transfer toward the smooth cavity in case of $A=0.05$, was calculated to be 26.66% when the roughness elements were located on the hot wall in Rayleigh number equal to 10^6 .

The abstract should state briefly the purpose of the research, the principal results and major conclusions.

Keywords: Natural convection, Square cavity, Triangular elements, Nusselt number.

۱- مقدمه

انتقال گرمای جابجایی طبیعی درون یک محفظه بسته به علت اهمیت آن در مسایل مختلف مهندسی جزو پرستندترین مسایل مهندسان و محققان می‌باشد. از جمله روشهای افزایش انتقال گرما در این محفظه‌ها، استفاده از المانهای زبری می‌باشد [۱] که در تجهیزات الکترونیکی، کلکتورهای خورشیدی، سیستم‌های انرژی، تجهیزات فرآیندهای شیمیایی، راکتورهای هسته‌ای و غیره کاربرد دارد [۷-۲]. با روش‌های مختلف تجربی و عددی می‌توان جریان سیال و انتقال گرمای داخل در کانال‌ها و حفره‌ها را بررسی نمود. [۱۳-۸].

محفظه‌های دارای یک المان مربعی یا مثلثی شکل به علت شکل ساده آنها تا کنون توسط محققان بسیاری به صورت عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی بررسی شده است [۱۶-۶] اما به

علت پیچیدگی طبیعت تیغه‌های مستطیلی و المان‌های مثلثی تا کنون مطالعات متناقض و بسیار اندکی در این زمینه انجام گرفته است. لذا جهت درک بهتر و دقیقتر نقش این المانها در جابجایی طبیعی، انجام تحقیقات بنیادی در این زمینه بسیار مهم به نظر می‌رسد.

از جمله تحقیقات انجام گرفته در این زمینه می‌توان به مطالعات باجورک و لیود [۱۷] اشاره نمود. آنها به صورت تجربی تاثیر یک تیغه مستطیلی نصب شده بر روی دیواره عایق حفره ای مربعی پرداختند. نتایج آنها کاهش 12% تا 21% انتقال حرارت در حضور تیغه، نسبت به حفره صاف را نشان داد. کاویانی [۱۸] به مطالعه عددی تاثیر برآمدگی استوانه‌ای بر روی دیوار افقی آدیاباتیک یک حفره مربعی حاوی هوا پرداخت. وی مشاهده نمود که با تغییر ابعاد برآمدگی، میزان عدد ناسلت و آهنگ انتقال گرما کاهش می‌یابد. تاثیر المان‌های زبری مربعی بر روی

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

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۲۹

نرخ انتقال گرما در یک حفره مکعبی حاوی آب توسط اندرسون و بان [۱۹] به صورت تجربی بررسی گردید.

شاو و همکاران [۲۰] به بررسی عددی تاثیر تیغه نصب شده بر دیواره آدیاباتیک افقی حفره مربعی پرداخته و به این نتیجه رسیدند که با افزایش ارتفاع تیغه، میزان عدد ناسلت کاهش می یابد. شاکرین و همکاران [۲۱] به بررسی تجربی و عددی نقش المانهای زبری مستطیلی در یک حفره مربعی پرداختند.

آچاریا و جتلی [۲۲] به صورت عددی نقش تیغه داخل حفره ای مربعی را در جریان لایه ای و درهم بررسی نمودند. روح الامین [۲۳] به بررسی تاثیر المانهای مستطیلی در یک حفره پرداخت. یوسل و اوزدم [۲۴] به بررسی عددی نقش تیغه آدیاباتیک بر دیواره افقی حفره حاوی هوا پرداختند. آنها با استفاده از روش تفاضل محدود و با تغییر شرایط مرزی دیواره های افقی به این نتیجه رسیدند که عدد ناسلت متوسط کاهش می یابد.

بررسی عددی نقش پره نازک بر روی انتقال گرمای داخل محفظه مربعی در جریان لایه ای در عدد پرانتل ۰/۷ توسط شی و خدادادی [۲۵] انجام گرفت. نظری و رضانی [۲۶] انتقال گرمای جابه جایی آزاد در یک محفظه مربعی بسته، با وجود یک مانع گرم را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آنها، جریان سیال و انتقال گرما برای نسبت های مختلف طول مانع به ابعاد حفره و همچنین با قرار دادن مانع در موقعیت های مختلف، برای اعداد گراشیف گوناگون انجام شده بود.

شیخ زاده و همکاران [۲۷] به بررسی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال های مختلف داخل یک محفظه مربعی با منبع گرمای مرکزی در نسبت های مختلفی مختلف پرداخته و روابطی برای عدد ناسلت بر حسب عدد رایلی و کسرحجمی نانوذرات به دست آوردند. یوسف و عثمان [۲۸] به بررسی عددی جابجایی طبیعی دوبعدی در یک حفره دارای المانهای زبری سینوسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداختند. مطالعه آنها که برای محدوده وسیعی از اعداد رایلی انجام گرفت، کاهش در آهنگ انتقال گرما را در اثر استفاده از المانها نشان داد. همانگونه که مشاهده می شود، اکثر مطالعات متناقض گذشته به بررسی عددی و تجربی جابجایی طبیعی داخل حفره مربعی با وجود المانهای زبری مستطیلی یا مربعی، تیغه یا پره بر روی دیواره های حفره پرداخته و هیچ مطالعه ای بر تاثیر المانهای مثلثی انجام نگرفته است. لذا به منظور دریافت یک نتیجه گیری منطقی در این زمینه، مطالعه حاضر برای اولین بار برای محدوده وسیعی از اعداد رایلی و نسبت های ابعادی المانها در حالت های مختلف و برای عدد پرانتل ۱ در نرم افزار کامسول^۱ انجام گرفته است.

^۱ Comsol

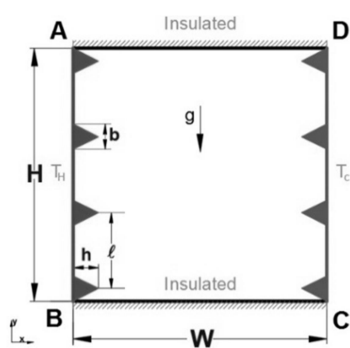
قابل ذکر است که استفاده از المان های مثلثی در آرایش های مختلف و با ابعاد و تعداد گوناگون در دیواره های چپ و راست حفره از جمله نوآوری های تحقیق حاصل نسبت به مطالعات گذشته می باشد.

۲- فرمول بندی ریاضی

۲-۱- هندسه مورد بررسی

در این مطالعه دوبعدی، سیال نیوتنی در محفظه مربعی دارای المانهای زیر مثلثی برای حالت های بر روی دیواره چپ به تنهایی و یا هر دو دیواره چپ و راست با یکدیگر مطابق شکل ۱ بررسی شده است. در شکل نشان داده شده $H=W=1$ طول حفره مربعی، h و b به ترتیب ارتفاع و طول قاعده المانها و l فاصله آنها از یکدیگر می باشد. المانها در تعداد ۲، ۶ و ۱۰ تایی و با نسبت های ابعادی $C=b/H$ برابر ۰/۰۵۵، ۰/۱ و ۰/۳ و نسبت $B=h/H$ برابر ۰/۰۵، ۰/۱۵ و ۰/۲۵ در نظر گرفته شده است.

دیوار AB در دمای $T_H=1$ ، دیوار CD در دمای $T_C=0$ ، دیواره های AD و BC آدیاباتیک و موانع روی دیواره های چپ و راست دارای دمایی برابر با دمای دیواره دارند. سیال داخل محفظه هوا بوده و چگالی طبق تعریف بوزینسکی تغییر کرده و ساختار جریان نیز لایه ای فرض شده است. آهنگ انتقال گرما داخل حفره در اعداد رایلی متعدد 10^2 تا 10^6 با محاسبه عدد ناسلت میانگین بیان شده است.



شکل ۱- طرحواره دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

۲-۲- روابط و شرایط مرزی

به منظور بیان معادلات حاکم در نرم افزار کامسول در فرم بی بعد و حل آن در این نرم افزار، پارامترهای بدون بعد زیر تعریف گردید:

$$X = x / W, Y = y / W, U = (uW) / \alpha, V = (vW) / \alpha$$

$$P = (pW^2) / (\rho \alpha^2), \theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C} \quad (1)$$

که U و V مولفه های سرعت در جهات x و y ، T دما و p فشار می باشد. همچنین α و ρ به ترتیب پخشندگی گرمایی و چگالی سیال است. با تعریف پارامترهای بی بعد تعریف شده،

تعداد المان ۲۵۷۹۷ با توجه به هزینه محاسباتی و دقت عددی در کل شبیه سازی این مقاله در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- عدد ناسلت متوسط و نتایج موجود

عدد رایلی	یان و همکاران [۳۰]	مزرهاب و همکاران [۲۹]	تحقیق حاضر
۱۰ ^۳	۱/۱۱۵	۱/۱۱۲	۱/۱۱۳
۱۰ ^۴	۲/۲۴۷	۲/۲۴۱	۲/۲۴۲
۱۰ ^۵	۴/۵۴۴	۴/۵۱۹	۴/۵۲۳
۱۰ ^۶	۸/۸۱۳	۸/۸۱۷	۸/۸۲۱

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط در شبکه بندی های مختلف

تعداد المان ها	Nu	درصد خطا $100 \times \frac{ Nu_{new} - Nu_{old} }{Nu_{new}}$
۱۹۳۸	۱,۵۵۶۴	-
۶۴۲۴	۱,۵۸۲۵	۱,۶۴۹۲
۲۵۷۹۷	۱,۶۳۶۶	۳,۳۰۶۵
۱۰۲۷۳۵	۱,۶۴۲۵	۰,۳۵۹۲

۳-۲- خطوط جریان و خطوط هم دما

به منظور بررسی تاثیر المانهای زبری بر خطوط جریان داخل حفره، در ابتدا نتایج یک حفره خالی فاقد زبری بررسی شده و نتایج برای اعداد رایلی ۱۰^۳ و ۱۰^۶ در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل در عدد رایلی پایین، سیال گرم شده که چگالی آن کاهش یافته است، از طرف دیواره چپ به سمت بالا حرکت کرده و پس از برخورد به دیواره های عایق، از طرف دیواره سرد سمت راست به پایین حرکت می کند که باعث تولید یک جریان چرخشی ساعتگرد با یک گردابه در مرکز می شود. با افزایش عدد رایلی و افزایش اثر شناوری، در داخل گردابه اصلی دو گردابه کوچک و در طرفین دیواره های هم دما تشکیل می شود. قابل ذکر است که با افزایش عدد رایلی، بیشینه مقدار مطلق تابع جریان نیز افزایش می یابد.

معادلات جریان دائمی پیوستگی، مومنتم و انرژی برای جابجایی طبیعی لایه ای داخل حفره در حالت بی بعد به شرح ذیل بیان می شود:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (۲)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Y} \right) \quad (۳)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right) + \text{Ra Pr } \theta \quad (۴)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{\partial \theta}{\partial Y} \quad (۵)$$

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

$$\text{Ra} = \frac{g \beta \Delta T W}{\alpha \nu}, \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (۶)$$

که β و θ ضریب انبساط حجمی و لزجت سینماتیک، g شتاب جاذبه و ΔT اختلاف دما است. شرایط مرزی بی بعد نیز به صورت رابطه (۷) تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} U = V = 0, \theta = 1 & \quad \text{برای دیوار سمت چپ} \\ U = V = 0, \theta = 0 & \quad \text{برای دیوار سمت راست} \\ U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 & \quad \text{برای دیوار بالا و پایین} \end{aligned} \quad (۷)$$

در این صورت - بر حسب - یورو - با شرط عدم لغزش اعمال گردیده است. دیواره سمت چپ گرم و دیواره سمت راست سرد فرض شده و شرط آدیاباتیک برای دیواره های بالا و پایین در نظر گرفته شد. عدد ناسلت محلی و متوسط نیز در دیواره سمت چپ با استفاده از روابط (۸) و (۹) در جهت عمود بر سطح و المان ها (n)، بدست می آید:

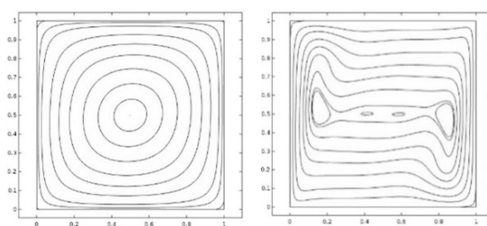
$$\text{Nu}_{\text{local}} = -\frac{\partial \theta}{\partial n} \quad (۸)$$

$$\text{Nu} = \int_0^1 \text{Nu}_{\text{local}} dY \quad (۹)$$

۳- بررسی نتایج

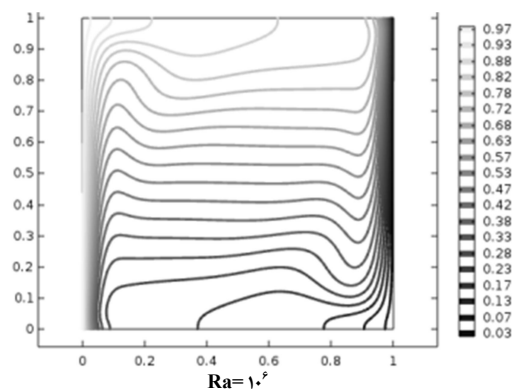
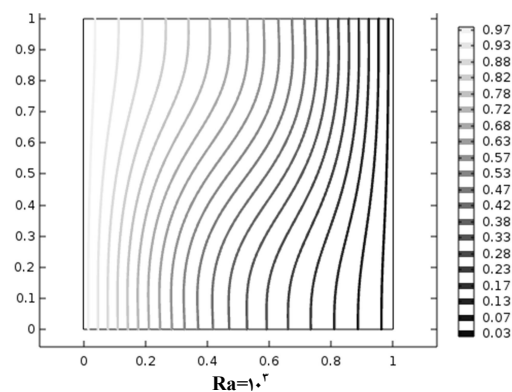
۳-۱- اعتبارسنجی

در این تحقیق، به منظور بررسی دقت روش مورد استفاده در نرم افزار کامسول، نتایج عدد ناسلت متوسط برای یک حفره مربعی خالی محاسبه گردیده و با نتایج مطالعات گذشته که در جدول ۱ آمده است، مقایسه گردیده و تطابق خوبی مشاهده شد. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد و اندازه مش، سه نوع شبکه بندی با تعداد المانهای مختلف تولید شد. میزان عدد ناسلت متوسط برای حالت ۶ مانع در دیوار سمت چپ، B برابر ۰/۱۵ و C برابر ۰/۱ و عدد رایلی ۱۰^۶ در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق این جدول، اختلاف بین تعداد المان های ۲۵۷۹۷ و ۱۰۲۷۳۵ کمتر از یک درصد است اما مدت زمان لازم جهت رسیدن به همگرایی در تعداد المان ۱۰۲۷۳۵ تقریباً ۴ برابر مدت زمان سپری شده در تعداد المان ۲۵۷۹۷ می باشد. لذا



شکل ۲- خطوط جریان داخل حفره صاف در اعداد رایلی مختلف

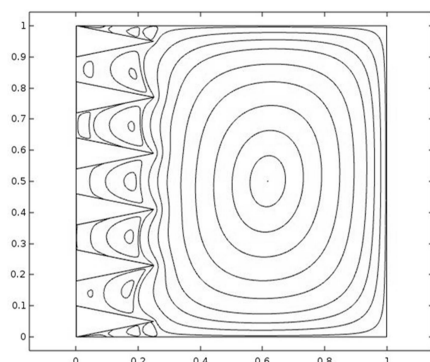
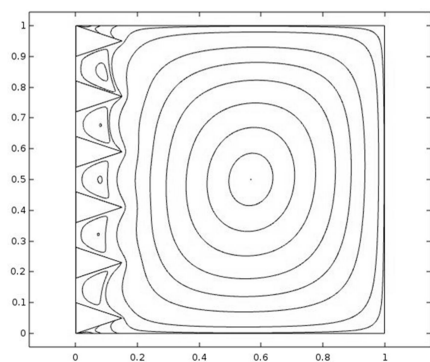
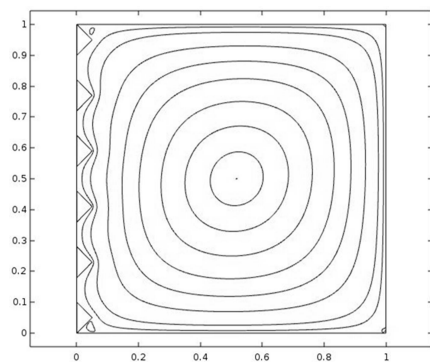
خطوط هم دمای نشان داده در شکل ۳ در محفظه صاف در اعداد رایلی 10^3 و 10^6 ، بیان کننده مکانیزم غالب رسانایی در اعداد رایلی پایین به علت موازی بودن خطوط هم دما با دیواره های سرد و گرم و جابجایی در اعداد رایلی بالا می باشد. به عبارت دیگر با افزایش عدد رایلی خطوط جریان افقی شده و ناحیه وسیعی از فضای حفره را می پوشاند. همچنین گرادیان دما در گوشه های بالا سمت راست و پایین سمت چپ حفره در عدد رایلی 10^6 بیشتر از عدد رایلی 10^3 است.



شکل ۳- خطوط هم دما داخل حفره صاف در اعداد رایلی مختلف

در شکل های ۴ و ۵ رفتار جریان سیال با تغییر مقدار B از $0/25$ تا $0/1$ در تعداد ثابت ۶ المان، $C = 0/1$ و در اعداد رایلی 10^3 و 10^6 به ترتیب نشان داده شده است. همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می شود، در نسبت ابعادی پایین B یعنی مقدار

$0/05$ ، خطوط جریان کاملاً مشابه یک حفره صاف تشکیل شده است. در نسبت $B = 0/15$ ، گردابه های کوچکی در بین المانها تشکیل می شود که افزایش بیشتر این نسبت ($B = 0/25$) منجر به افزایش هرچه بیشتر شدت و اندازه گردابه می گردد.

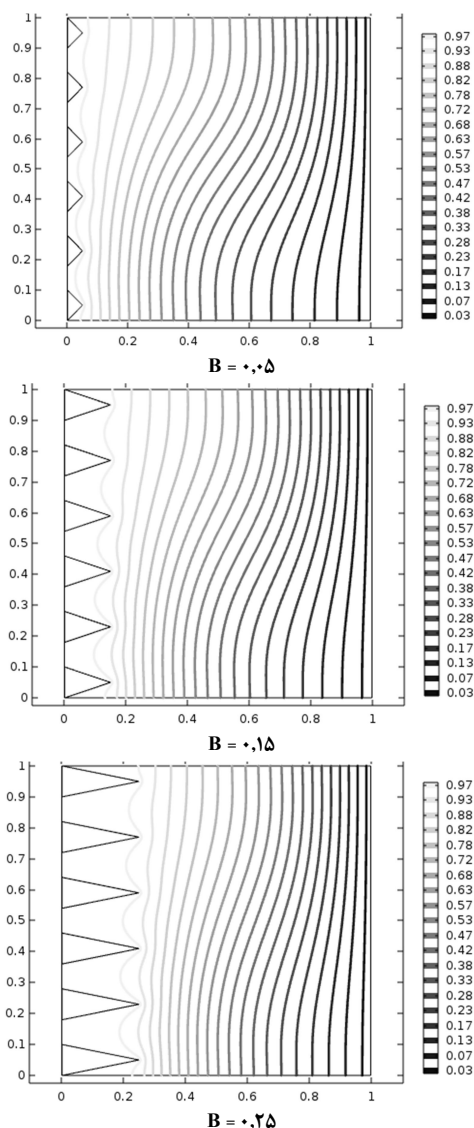


شکل ۴- خطوط جریان داخل حفره دارای المان زبری در دیواره سمت چپ برای تعداد ۶ المان، $C = 0/1$ و در نسبت های مختلف B

اثرات شناوری ناشی از هر جفت اجزای سرد و گرم مقابل هم باعث تشکیل گردابه در محفظه می شود. در این حالت، به دلیل وجود گردابه ها، اختلاط سیال افزایش می یابد. مطابق شکل ۵، افزایش عدد رایلی تغییر چندانی در شکل کلی خطوط جریان داخل حفره نسبت به حالت مشابه حفره صاف ایجاد نکرده و تنها باعث فشردگی بیشتر خطوط می شود.

دچار انحراف جزئی می گردد. با افزایش عدد رایلی و در نتیجه افزایش نیروی شناوری، خطوط هم دما به خطوط افقی تبدیل می شوند و تحت تاثیر وجود المانهای مثلی، در بین المانهای متمرکز می گردد. تراکم بالای خطوط بویژه در شکل ۷ و برای $B=0.25$ کاملاً آشکار است.

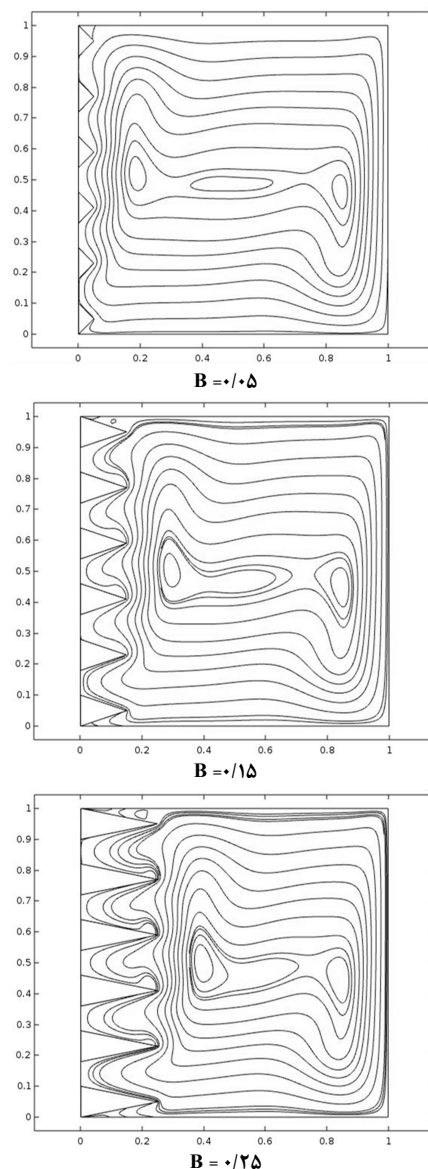
در شکل های ۸ و ۹، خطوط جریان در اعداد رایلی مختلف 10^3 و 10^6 ، $B=0.15$ و به ازای تعداد المان های زبری مختلف نشان داده شده است.



شکل ۶- خطوط هم دما داخل حفره دارای المان زبری در دیواره سمت چپ برای تعداد ۶ المان، $C=0.1$ ، $Ra=10^3$ و در نسبت های مختلف B

مطابق این شکل در تعداد ۱۰ المان و در عدد رایلی 10^3 ، خطوط جریان به موازات نوک المان ها شکل گرفته و

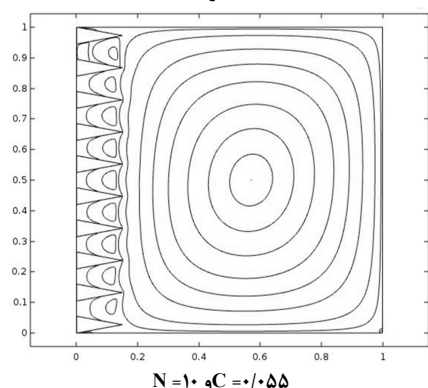
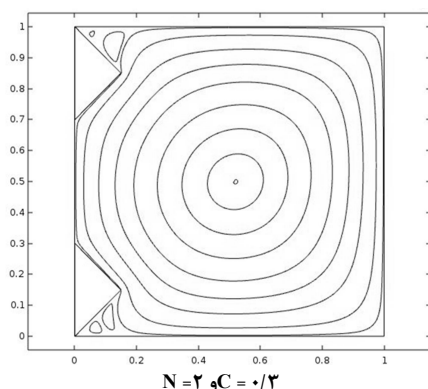
با افزایش نسبت B گردابه های کوچک تشکیل شده در شکل ۴، محو شده و تنها خطوط جریان متاثر از شکل و اندازه المانهای می گردد. خطوط هم دما در اعداد رایلی مختلف 10^3 و 10^6 و به ازای مقادیر متفاوت B در تعداد ثابت ۶ المان و $C=0.1$ به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است.



شکل ۵- خطوط جریان داخل حفره دارای المان زبری در دیواره سمت چپ برای تعداد ۶ المان، $C=0.1$ ، $Ra=10^6$ و در نسبت های مختلف B

خطوط هم دما نیز مشابه خطوط جریان، در اعداد رایلی پایین و به ازای $B=0.05$ کاملاً مشابه خطوط هم دمای حفره صاف بوده و به علت نیروی شناوری پایین، متمایل به دیواره های گرم و سرد است که به افزایش مقدار B ، متاثر از شکل المانهای

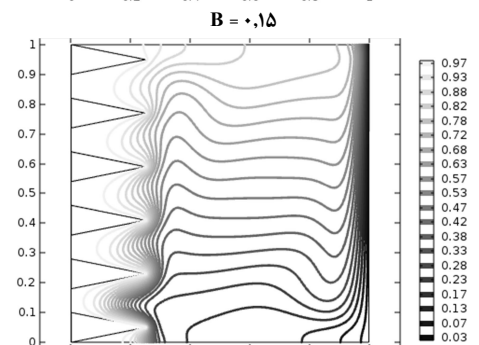
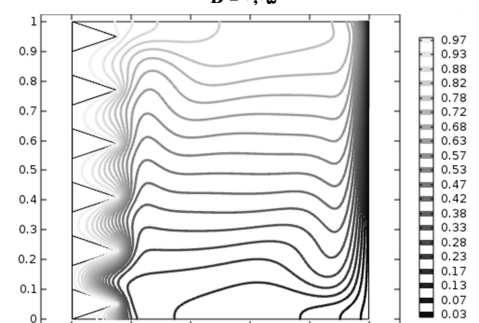
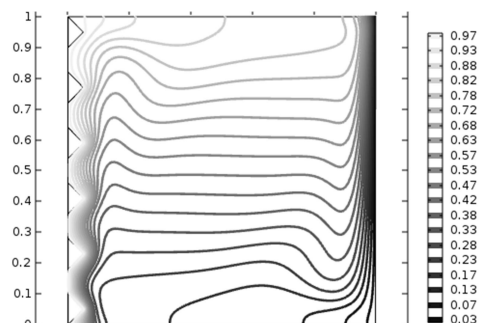
گردابه های کوچکی در بین موانع تشکیل می شود. اما برای حالت وجود ۲ المان، به علت فاصله زیاد المانها از یکدیگر، تنها یک گردابه اصلی در حفره تشکیل شده و دو گردابه کوچک در طرفین موانع مثلی تشکیل می گردد.



شکل ۸- خطوط جریان داخل حفره دارای المان زیری در دیواره سمت چپ در تعداد المان های مختلف و به ازای نسبت متفاوت C در $Ra=10^6$ و $B=10^2$

خطوط هم دما داخل حفره به ازای تعداد المان های مختلف، $B=0.15$ و اعداد رایلی مختلف 10^3 و 10^6 در شکل های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. با مقایسه این شکل ها و شکل ۳ مربوط به حفره خالی، تغییر چندانی در الگوی اصلی خطوط هم دما نسبت به حفره خالی مشاهده نمی شود و تنها موانع مثلی منجر به خمیدگی این خطوط در نزدیکی موانع می گردد.

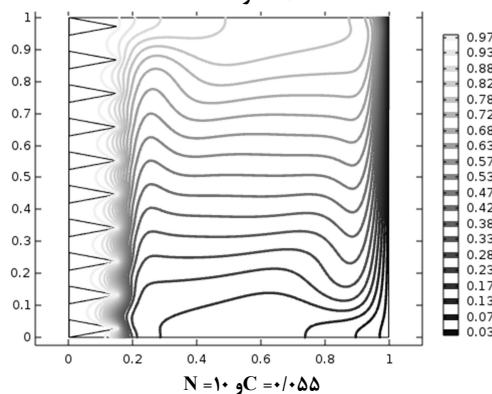
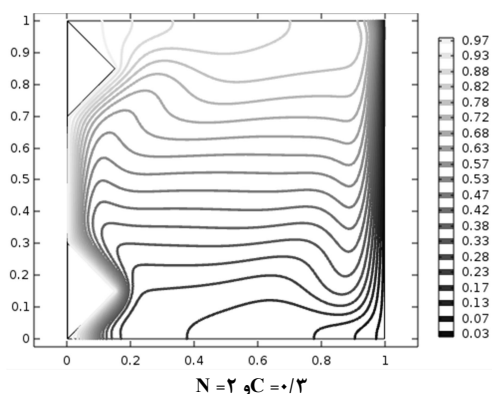
به منظور بررسی تاثیر وجود المانهای زیری در هر دو دیواره چپ و راست حفره، شکل ۱۲ در عدد رایلی 10^6 به ازای نسبت های ابعادی مختلف B و برای تعداد ۶ المان و $C=0.1$ ترسیم گردید. مشابه نتایج شکل ۴، در نسبت ابعادی 0.05 گردابه ای در حفره ایجاد نمی گردد اما با افزایش نسبت ابعادی B، گردابه هایی در طرفین حفره و بین المان ها تشکیل شده که در $0.25=B$ بر قدرت و شدت آنها افزوده می شود. قابل ذکر است که وجود



شکل ۷- خطوط هم دما داخل حفره دارای المان زیری در دیواره سمت چپ برای تعداد ۶ المان، $C=0.1$ و $Ra=10^6$ در نسبت های مختلف B

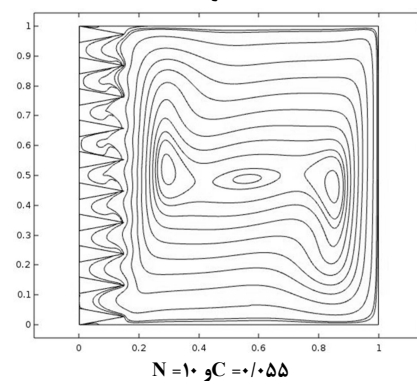
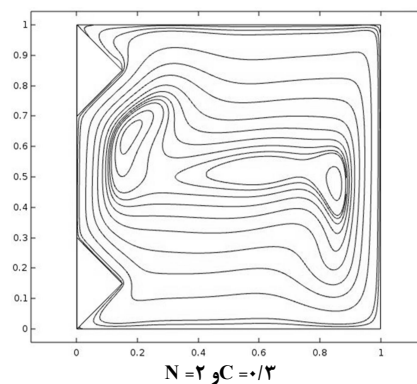
در واقع با کاهش فاصله موانع (افزایش تعداد المان ها)، گردابه های کوچک بین موانع تشکیل می شود. با افزایش عدد رایلی (شکل ۹) و به ازای تعداد المان برابر با ۲، تغییر چندانی در الگوی کلی جریان نسبت به حفره خالی مشابه (شکل ۲) ایجاد نشده و گردابه اصلی مرکزی حفره به صورت جزئی به طرف بالا کشیده می شود. در حالت تعدا المان برابر ۱۰ نیز

المان های زبری در طرفین باعث فشرده تر شدن گردابه ساعتگرد مرکزی می شود. علت محو شدن گردابه ها با افزایش عدد رایلی در این امر نهفته است که در اعداد رایلی پایین، نیروی شناوری و میزان سرعت جریان پایین بوده و لذا جریان سیال در گردابه های المان ها به دام می افتد. اما با افزایش عدد رایلی و تقویت نیروی شناوری و افزایش سرعت، جریان سیال، گردابه ها را از بین می برد. خطوط هم دما مربوط به وجود المانهای زبری در هر دو دیواره چپ و راست حفره، در عدد رایلی 10^6 به ازای نسبت های ابعادی مختلف B و برای تعداد 6 المان و $C = 0.1$ در شکل ۱۳ ترسیم گردید. تفاوت اندکی بین این خطوط و خطوط هم دمای مربوط به حفره صاف مشاهده می گردد به طوریکه المانها باعث منقبض شدن فضای وسط حفره شده و خطوط هم دما را در وسط حفره فشرده می کند.

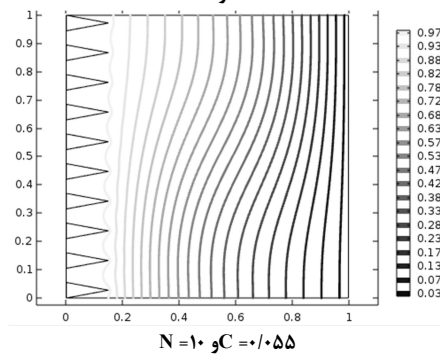
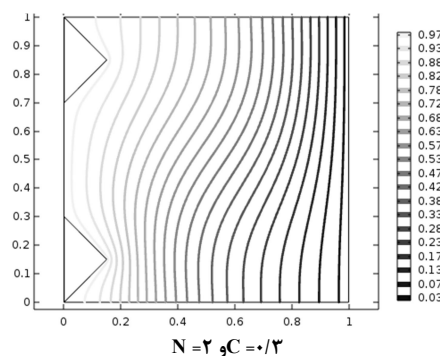


شکل ۱۱- خطوط هم دما داخل حفره دارای المان زبری در دیواره سمت چپ در تعداد المان های مختلف و به ازای نسبت متفاوت C در 10^6 و B

نکته قابل توجه در این شکلها، فشردگی بیشتر خطوط به هم در قسمت پایینی دیواره گرم حفره نسبت به قسمت بالایی مشابه دیواره گرم و فشردگی بیشتر خطوط در قسمت بالایی دیواره سرد نسبت به قسمت پایینی مشابه آن می باشد. همچنین افزایش عدد رایلی و به تبع آن افزایش جابجایی، منجر

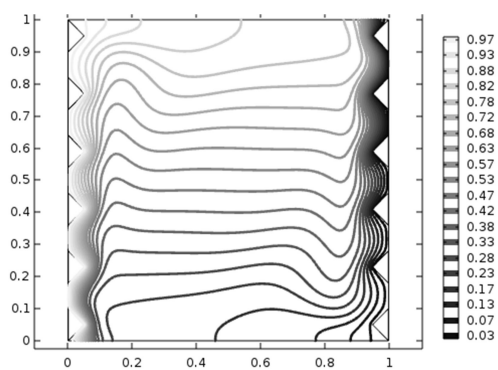


شکل ۹- خطوط جریان داخل حفره دارای المان زبری در دیواره سمت چپ در تعداد المان های مختلف و به ازای نسبت متفاوت C در 10^6 و B

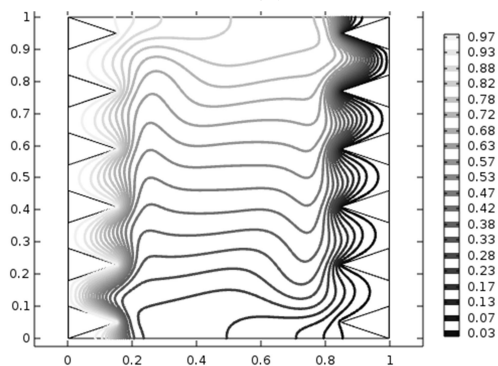


شکل ۱۰- خطوط هم دما داخل حفره دارای المان زبری در دیواره سمت چپ در تعداد المان های مختلف و به ازای نسبت متفاوت C در 10^6 و B

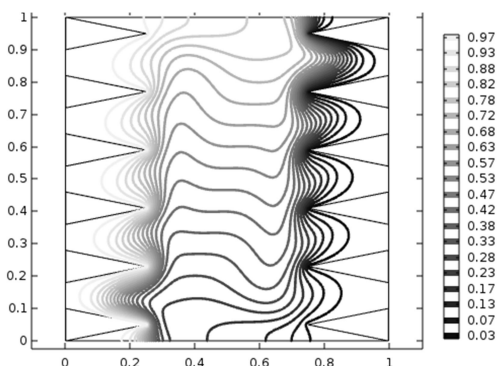
به حرکت خطوط هم دما به سمت دیواره های گرم و سرد می شود. خطوط هم دما در قسمت مرکزی حفره مستقیم هستند که بیانگر وجود رسانایی قوی در این قسمت است.



$B = 0.05$



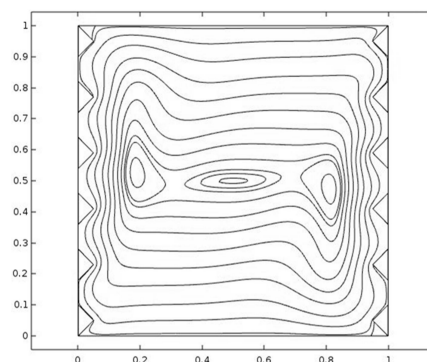
$B = 0.15$



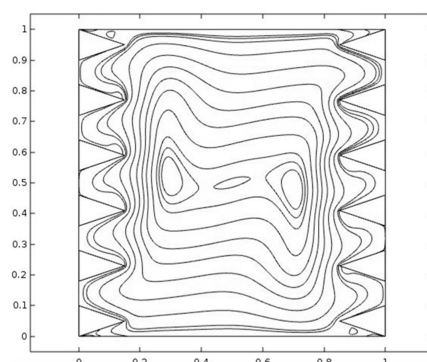
$B = 0.25$

شکل ۱۳- خطوط هم دما داخل حفره دارای المان زبری در هر دو دیواره سمت چپ و راست برای تعداد ۶ المان، $C=0.1$ ، $Ra=10^6$ و در نسبت های مختلف B

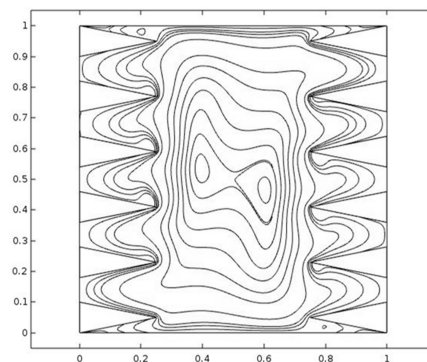
به منظور بررسی میزان انتقال گرما، عدد ناسلت متوسط در دیواره سمت چپ حفره محاسبه گردید. در شکل ۱۴ نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد رایلی به ازای وجود ۶ المان و $C=0.1$ در نسبت های ابعادی مختلف ترسیم گردیده است. در کلیه حالت ها وجود المان های زبری منجر به کاهش عدد ناسلت نسبت به حالت حفره خالی می گردد. اما این کاهش در نسبت ابعادی ۰.۰۵ و اعداد رایلی پایین، کمتر است. بیشترین کاهش در نرخ انتقال حرارت نسبت به حفره خالی برای حالت $A=0.05$ ، در عدد رایلی 10^6 و برابر ۲۶/۶۶٪ می باشد. لذا کوچکتر نمودن



$B = 0.05$



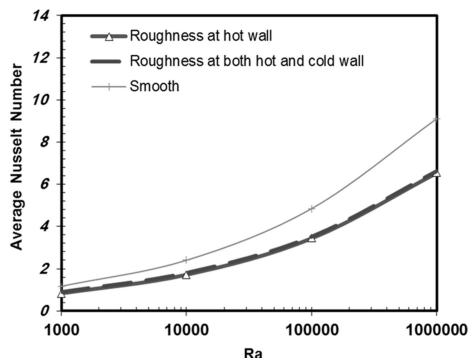
$B = 0.15$



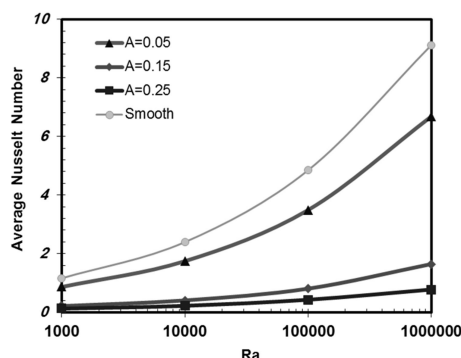
$B = 0.25$

شکل ۱۴- خطوط جریان داخل حفره دارای المان زبری در هر دو دیواره سمت چپ و راست برای تعداد ۶ المان، $C=0.1$ ، $Ra=10^6$ و در نسبت های مختلف B

ابعاد المان ها، از تاثیر منفی آنها کم می کند.



شکل ۱۶- مقایسه بین عدد ناسلت متوسط برای حالت های دو المان در دیواره چپ با وجود دو المان در هر دو دیواره چپ و راست حفره بر حسب عدد رایلی به ازای $B = 0.15$



شکل ۱۴- عدد ناسلت متوسط برای وجود المان های زیری در دیواره سمت چپ بر حسب عدد رایلی به ازای $N = 6$, $C = 0.1$ و در نسبت های ابعادی مختلف A

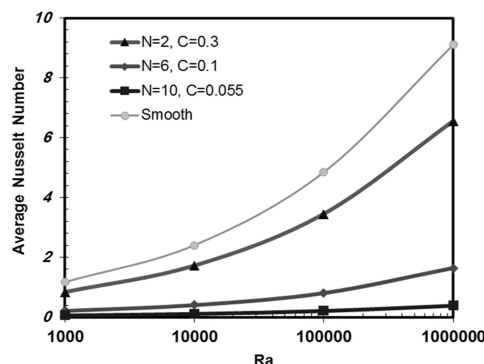
۴- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوی جریان و انتقال گرما درون حفره حاوی المانهای زیری مثلثی با استفاده از روش المان محدود در نرم افزار کمسول بررسی گردید و تاثیر پارامترهای عدد رایلی، تغییر نسبت های ابعادی المان ها و حالت های گوناگون قرارگیری المان ها بر روی دیواره چپ به تنهایی و یا هر دو دیواره چپ و راست با هم، مورد مطالعه قرار گرفت. خطوط جریان و دما در حالت های مختلف و به ازای اعداد رایلی متعدد بررسی گردید و مشاهده شد که با افزایش نسبت ابعادی و افزایش تعداد المان ها عدد ناسلت متوسط کاهش می یابد. بیشترین کاهش در آهنگ انتقال گرما نسبت به حفره خالی برای حالت $A = 0.5$ ، در عدد رایلی 10^6 و برابر $26/66\%$ می باشد. همچنین افزایش عدد رایلی نیز، منجر به افزایش سهم انتقال گرمای جابجایی و افزایش آهنگ انتقال گرما می شود.

۵- مراجع

- [1] Shishkina O., Wagner C., Modelling the influence of wall roughness on heat transfer in thermal convection, Journal of Fluid Mechanics, 686, pp. 568–582. 2011.
- [2] de Vahl Davis G., Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution, International Journal of Numerical Methods of Fluids, 3, pp.249–264. 1983.
- [3] Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan R. L., Sammakia B., Buoyancy induced flows and transport. Hemisphere, 1988.
- [4] Ostrach, S., Natural Convection in Enclosures, ASME J Heat Trans, 110, pp. 1175–1190. 1988.
- [5] Bhavnani S., Bergles A., Natural convection heat transfer from sinusoidal wavy surfaces, Wrmе-und Stoffübertragung, 26, pp. 341–349, 1991.
- [6] Ruhul Amin, M., Natural convection heat transfer in enclosures fitted with a periodic array of hot roughness elements at the bottom, International Journal of Heat and Mass Transfer, 36, pp. 755–763, 1993.
- [7] Bejan A., Convection Heat Transfer. Second ed, Wiley & Sons, 1995.

شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر تعداد المان های موجود بر دیواره سمت چپ حفره در اعداد رایلی مختلف و به ازای $B = 0.15$ را نشان می دهد. با افزایش تعداد المان، میزان آهنگ انتقال گرما کاهش می یابد. در کلیه حالتها، وجود المانهای زیری باعث کاهش عدد ناسلت متوسط نسبت به حفره خالی شده و افزایش عدد رایلی و در نتیجه افزایش جابجایی در مقابل رسانایی منجر به افزایش عدد ناسلت می گردد. بیشترین کاهش در آهنگ انتقال گرما نسبت به حفره خالی برای حالت $N = 10$ و $C = 0.055$ ، در عدد رایلی 10^6 برابر $95/76\%$ می باشد. مقایسه بین عدد ناسلت متوسط برای وجود المان ها در دیواره چپ به تنهایی با وجود المان ها در هر دو دیواره چپ و راست، به ازای $B = 0.15$ و $N = 2$ ، در اعداد رایلی مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده که تفاوت چندانی بین دو حالت مشاهده نمی گردد. در این دو حالت بیشترین کاهش در نرخ انتقال حرارت نسبت به حفره خالی در عدد رایلی 10^6 کمتر از 28% می باشد.



شکل ۱۵- عدد ناسلت متوسط برای وجود المان های زیری در دیواره سمت چپ بر حسب عدد رایلی به ازای $B = 0.15$ و در تعداد المان های زیری مختلف

- [28] Yousaf M., Usman S., Natural convection heat transfer in a square cavity with sinusoidal roughness elements, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, pp. 368–377, 2015.
- [29] 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*, 374, 3499–3507, 2010.
- [30] 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.
- [8] Kayhani M. M, Mohebbi R, Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer on the Porous Media Between Two Parallel Plates Using the Lattice Boltzmann Method, *Aerospace Mechanics Journal* 9 (1), pp. 63-76, 2013.
- [9] Nazari M., Kayhani M.H, Mohebbi R., “Heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous block: lattice Boltzmann method”. *International Journal of Modern Physics C* 24 (09), 1350060, 2013.
- [10] Nazari M., Kayhani M.H, Mohebbi R., Numerical Investigation of Heat Transfer of Non-Newtonian Fluid in a Porous Medium, *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 3 (1), pp. 105-119, 2013.
- [11] Mohebbi R., Nazari M., Kayhani M.H., Power-law fluid flow and heat transfer in a channel with a built-in porous square cylinder: Lattice Boltzmann simulation, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 204, pp. 38-49, 2014.
- [12] 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* 57 (1), 2016.
- [13] Heidari H., Mohebbi R., Safarzade A., Parameter estimation in fractional convection-diffusion equation, *PONTE International Scientific Research Journal* 72 (2), 2016.
- [14] Bejan A., Kraus A. D., *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons, 2003.
- [15] Ozisik M. N., *Heat transfer: a basic approach*, 1985.
- [16] Jiji L.M., Jiji L.M., *Heat Convection*, Springer, 2006.
- [17] Bajorek S., Lloyd J., Experimental investigation of natural convection in partitioned enclosures, *Journal of Heat Transfer*, 104, pp.527–532, 1982.
- [18] Kaviani M., Effect of a protuberance on thermal convection in a square cavity, *Journal of Heat Transfer*, 106, pp.830–834, 1984.
- [19] Anderson R., Bohn M., Heat transfer enhancement in natural convection enclosure flow, *Journal of Heat Transfer*, 108, pp. 330–336, 1986.
- [20] Shaw H.J., Chen C.o.K., Cleaver, J., Cubic spline numerical solution for twodimensional natural convection in a partially divided enclosure, *Numerical Heat Transfer, Part A: Application*, 12, pp. 439–455, 1987.
- [21] Shakerin S., Bohn M., Loehrke R., Natural convection in an enclosure with discrete roughness elements on a vertical heated wall, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 31, pp. 1423–1430, 1988.
- [22] Acharya S., Jetli R., Heat transfer due to buoyancy in a partially divided square box, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33, pp. 931–942, 1990.
- [23] Ruhul Amin, M., Natural convection heat transfer and fluid flow in an enclosure cooled at the top and heated at the bottom with roughness elements, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, pp. 2707–2710, 1993.
- [24] Yucel N., Ozdem A. H., Natural convection in partially divided square enclosures, *Heat Mass Transfer*, 40, pp. 167–175, 2003.
- [25] Shi X., Khodadadi J., Laminar natural convection heat transfers in a differentially heated square cavity due to a thin fin on the hot wall, *Journal of Heat Transfer*, 125, pp. 624–634, 2003.

[۲۶] نظری م. و رضائی س., انتقال حرارت جابه جایی آزاد در یک حفره مربعی با وجود مانع گرم به روش شبکه بولتزمن. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*, د. ۱۱, ش. ۲, ص ۱۱۹–۱۳۳, ۱۳۹۰.

[۲۷] شیخ زاده ق. ع., احترام ح. ر. و آقایی, ع., بررسی عددی جابجایی طبیعی نانوسیال در محفظه مربعی با منبع حرارتی مرکزی و ارائه روابطی برای محاسبه عدد ناسلت, *مجله مهندسی مکانیک مدرس*, د. ۱۳, ش. ۱۰, ص ۶۲–۷۴, ۱۳۹۲.