

بررسی عددی تأثیر بلوک داغ بر آهنگ انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی داخل یک حفره Γ شکل

رسول محبی*

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

سحر حقیقی

فارغ‌التحصیل کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

مریم شمسی

فارغ‌التحصیل کارشناسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

چکیده

جابه‌جایی طبیعی دوبعدی جریان لایه‌ای تراکم‌ناپذیر در داخل یک حفره Γ شکل با وجود مانع گرم مستطیلی روی دیواره‌ی بالایی، با روش شبکه بولتزمن بررسی شده است. مطالعه‌ی حاضر برای نسبت‌های ابعادی مختلف و حالت‌های گوناگون قرارگیری مانع روی دیواره‌ی بالایی در اعداد رایلی مختلف انجام شده است. آب به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است. رفتار هیدروپدینامیکی و گرمایی سیال در حضور مانع گرم در قالب منحنی‌های جریان، منحنی‌های هم‌دما و عدد ناسلت متوسط بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده بر پایه‌ی این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مانع مستطیلی به طور قابل توجهی بر رفتار جریان سیال و انتقال گرمای داخل حفره‌ی Γ شکل تأثیر می‌گذارد. عدد ناسلت متوسط نیز با افزایش عدد رایلی و افزایش نسبت ارتفاع مانع، افزایش می‌یابد. با تحلیل نمودارها و شکل‌های به دست آمده، در عدد رایلی 10^6 و نسبت ارتفاع مانع برابر با 0.15 ، بیشترین آهنگ انتقال گرما رخ می‌دهد. همچنین با بررسی حالت‌های مختلف قرارگیری مانع در حفره، برای داشتن بیشینه‌ی آهنگ انتقال، بهترین موقعیت $S_x=0.4$ مشاهده گردید. نتایج این تحقیق جهت طراحی حالت بهینه قرارگیری قطعات الکترونیکی در حفره‌ها مفید می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جابه‌جایی طبیعی، عدد ناسلت، مانع، حفره Γ شکل.

Numerical Study of Hot Block on Rate of Natural Convection Heat Transfer inside a Γ Shape Cavity

R. Mohebbi

School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

S. Haghghi

School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

M. Shamsi

School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

Abstract

Natural convection of a two-dimensional laminar incompressible fluid flow in a Γ -shaped cavity with rectangular heating obstacle on the upper wall has been investigated by LBM. The present study has been carried out for different aspect ratio and various cases of position of obstacle on the upper wall in different Rayleigh number. Water is chosen as a working fluid. Hydrodynamic and thermal behavior of fluid in the presence of rectangular heating obstacle was analyzed in form of streamlines, isotherms and the average Nusselt number. Results based on this numerical study showed that the rectangular obstacle considerably affect the hydrodynamic and thermal behavior of fluid in a Γ -shaped cavity. By the increasing Ra number and the height of the obstacle, an increase in the average Nusselt number appeared. By analyzing the resulting graphs and figures, in Rayleigh number of 10^6 and aspect ratio of 0.15 , the best rate of heat transfer occurred. Also by analyzing the various cases of position of the obstacle toward the cavity, the maximum heat transfer rate was observed when the heating obstacle was located at $S_x=0.4$. Results of this research are useful for designing the efficient position of electronic components location in the cavities.

Keywords: Natural convection, Nusselt number, Obstacle, Γ Shape Cavity.

سرمایشی و ... نقش مهمی را ایفا می‌کند [۱]. در برخی از کاربردها لازم است تا انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی از میان دیواره‌های گرم داخل حفره‌ها کاهش یابد که به عنوان مثال می‌توان به پنجره‌های دوجداره، عایق‌سازی ساختمان‌ها و.. اشاره نمود؛ اما در بسیاری موارد لازم است تا آهنگ انتقال گرما را افزایش داده تا گرما سریع‌تر از منبع گرم دفع گردد که به عنوان مثال می‌توان به خنک‌سازی تجهیزات الکتریکی حاوی چاه‌های گرمایی اشاره نمود.

۱- مقدمه

انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی درون یک محفظه بسته دارای دیواره‌ها و بخش‌های گرم و سرد در طی سالیان گذشته مورد توجه دانشمندان و محققان بسیاری بوده است. علت اهمیت این موضوع در این امر نهفته است که جابه‌جایی طبیعی حفره‌ها در بسیاری از صنایع کاربرد دارد. جابه‌جایی طبیعی در توزیع دما در داخل اتاق‌ها، ساختمان‌ها، تلفات گرمایی یا افزایش انتقال گرما در سیستم‌های الکتریکی و تجهیزات

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

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۷/۳۰

در واقع یک مدل کامل شبکه بولتزمن توانایی شبیه‌سازی کامل معادله ناویر-استوکس با دقت بالا را دارا می‌باشد، هر چند این دقت بالا نیازمند برنامه‌نویسی پیچیده و تکنیک‌های بسیار دشوار محاسباتی می‌باشد.

قریب به سه دهه‌ی اخیر، روش شبکه بولتزمن^۱ به یک تکنیک قدرتمند در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی تبدیل شده است. روش شبکه بولتزمن بر پایه مدل مزوسکوپیک استوار است که در آن مجموعه‌ی رفتار ذرات در یک سیستم، برای شبیه‌سازی مکانیک پیوسته از یک سیستم به کار گرفته می‌شود. این معادله به واسطه‌ی ماهیت دیفرانسیلی-انتگرالی‌اش چنان پیچیده است که به گفته‌ی هریس ارائه‌ی اولین حل تقریبی برای آن ۵۰ سال به طول انجامید. این روش که در اوایل سال ۱۹۹۰ گسترش پیدا کرد، تا کنون به عنوان یک روش مناسب توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است. روش شبکه بولتزمن در مقابل روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی مرسوم همچون روش اختلاف محدود^۲، حجم محدود^۳ و یا المان محدود^۴ که بر پایه‌ی گسسته‌سازی و حل عددی معادلات ناویر استوکس استوار است، در شبیه‌سازی جریان‌های یک‌فازی، دوفازی و چند مؤلفه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸-۲]. مزیت این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم در دینامیک سیالات محاسباتی، محاسبات ساده‌تر، سهولت اعمال شرایط مرزی است. در برنامه‌های نوشته‌شده هسته‌های محاسباتی مستقلاً ایجاد می‌شوند که قابلیت اجرای موازی برنامه توسط چندین حافظه‌ی مختلف را فراهم می‌آورند. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که سرعت برنامه روش شبکه بولتزمن حدود سه برابر سرعت برنامه‌های نوشته‌شده توسط روش‌هایی نظیر اختلاف محدود برای حل معادلات ناویر-استوکس باشد [۹].

جریان سیال و انتقال گرمای داخل حفره‌ها توسط پژوهشگران فراوانی بررسی شده است. به عنوان نمونه مطالعاتی توسط فتاحی و همکاران [۱۰] برای مطالعه‌ی انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی نانو سیال Al_2O_3 و Cu در یک حفره با استفاده از روش شبکه بولتزمن انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش کسر حجمی ذرات جامد در هر عدد رایلی انتقال گرما افزایش می‌یابد و همچنین با افزایش عدد رایلی برای حجم مشخصی از ذرات جامد، انتقال گرما افزایش می‌یابد. نعمتی و همکاران [۱۱] برای تشخیص اثر ذرات Al_2O_3 و Cu و CuO روی جابه‌جایی مخلوط در یک حفره، از روش شبکه بولتزمن استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش ذرات نانو، آهنگ انتقال گرمای جابه‌جایی مخلوط سیال پایه را برای تمامی مقادیر اعداد رایلی امتحان شده، افزایش می‌دهد. ابوندا و چمخا [۱۲] مطالعه‌ای برای بررسی انتقال گرمای جابه‌جایی مخلوط نانو سیال آب-آلومینیوم اکسید در یک حفره

شیب‌دار انجام دادند. افزایش انتقال گرما به واسطه‌ی افزایش کسر حجمی ذرات نانو در اعداد ریچاردسون و گراشهف مختلف در نتایج آن‌ها نشان داده شد. بیشترین آهنگ انتقال گرما در نتایج آن‌ها به ازای درصد حجمی ۰/۱ مشاهده گردید که برابر ۱۷/۲ درصد در عدد ریچاردسون ۰/۲ و ۱۷ درصد در عدد ریچاردسون ۲ بود. کفایتی و همکارانش [۱۳] برای مطالعه‌ی جابه‌جایی آزاد نانو سیال آب- SiO_2 در محفظه‌های بسته از روش شبکه بولتزمن استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که عدد ناسلت متوسط با افزایش حجم ذرات (برای تمامی نسبت‌های ظاهری و اعداد رایلی) افزایش می‌یابد. افزایش کسر حجمی ذرات نانو و افزایش نسبت ظاهری کانال برای تمامی مقادیر اعداد رایلی، عدد ناسلت متوسط را افزایش می‌دهد. جابه‌جایی طبیعی داخل یک حفره مربعی با وجود مانع داغ در اعداد رایلی مختلف و موقعیت‌های متفاوت مانع به صورت عددی توسط عبدالعلی و همکاران [۱۴] انجام گرفت. نتایج آن‌ها بیانگر این مطلب بود که قرارگیری مانع در قسمت پایین حفره تأثیر بیشتری در افزایش آهنگ انتقال گرما دارد. اخیراً نیز بررسی عددی با روش شبکه بولتزمن توسط محبی و رشیدی [۱۵] در زمینه‌ی تأثیر وجود مانع در محفظه L شکل تحت تأثیر نانو سیال انجام گرفت که در بررسی آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلفی بر میزان انتقال گرما و جریان سیال داخل محفظه‌های بسته مورد مطالعه قرار گرفت.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، اکثر مطالعات گذشته به بررسی عددی و تجربی جابه‌جایی طبیعی داخل حفره‌ی مربعی پرداخته و هیچ مطالعه‌ای بر حفره ۶ شکل با وجود مانع داغ مستطیلی انجام نگرفته است. لذا به منظور دریافت یک نتیجه‌گیری منطقی در این زمینه و همچنین با توجه به کاربرد این هندسه در تجهیزات الکترونیکی، مبدل‌ها و سلول‌های خورشیدی مطالعه‌ی حاضر برای اولین بار برای محدوده‌ی وسیعی از اعداد رایلی در حالت‌های مختلف انجام گرفته است.

۲- فرمول‌بندی ریاضی

۲-۱- هندسه مورد بررسی

در این مطالعه، جریان سیال و انتقال گرمای دوبعدی در محفظه‌ی ۶ شکل حاوی مانع داغ در دیواره‌ی بالایی با روش شبکه بولتزمن مطابق شکل ۱ بررسی شده است. در شکل نشان داده شده $H=W=1$ طول و ارتفاع حفره‌ی مربعی، S_x فاصله‌ی مانع مربعی از لبه حفره، h ارتفاع مانع و d طول مانع بوده، نسبت $AR=L/H=0.2$ نسبت ابعادی و $d/W=0.2$ می‌باشد. همچنین پارامترهای بی‌بعد $H'=h/H$ و $S_x'=x/W$ به ترتیب به عنوان ارتفاع بی‌بعد مانع و فاصله‌ی بی‌بعد مانع از لبه‌ی حفره در نظر گرفته شده است. x فاصله ابتدا مانع از مبدأ مختصات در راستای افقی است. مانع داغ با ارتفاع‌های مختلف ۰/۱۵ و ۰/۱ و $H'=0.05$ و موقعیت‌های مختلف ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ داخل حفره قرار گرفته و در اعداد رایلی مختلف 10^3 و 10^6 بررسی شده است.

1 Lattice Boltzmann Method
 2 Finite Difference
 3 Finite Volume
 4 Finite Element

اگر $f_i(x, t)$ و $f_i^{eq}(x, t)$ به ترتیب بیانگر تابع توزیع چگالی تک ذره و تابع توزیع تعادلی آن باشد، معادله تکاملی در میدان سرعت به صورت زیر بیان می‌شود [۸]:

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = \quad (2)$$

$$-\frac{1}{\tau_v} [f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)] + \Delta t F_i \cdot e_i$$

این معادله با تعیین سیر تکاملی میدان چگالی و سرعت، بقای جرم و مومنتم را بیان می‌کند. در این معادله، Δt گام زمانی که ۱ است و τ_v لزجت مبنی بر زمان آرامش^۱ و e_i سرعت شبکه می‌باشد. تابع توزیع تعادلی تک ذره به میزان چگالی محلی و سرعت سیال وابسته بوده توسط پنگ و همکاران [۱۶] بیان شده است:

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left[1 + 3 \frac{e_i u}{c^2} + \frac{9(e_i u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right], i = 0 \dots 8 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، u و ρ به ترتیب سرعت ماکروسکوپی و چگالی هستند و c سرعت شبکه می‌باشد. تابع وزنی جریان w_i دارای مقادیر $w_0 = 4/9$ ، $w_1 = 1/9$ برای i یک تا چهار و $w_i = 1/36$ برای i پنج تا هشت است. مقادیر محلی همچون چگالی ρ و سرعت u نیز از روابط (۵) و (۶) به دست می‌آید:

$$\rho = \sum_i f_i \quad (4)$$

$$\rho u = \sum_i f_i e_i \quad (5)$$

مدل D_2Q_9 برای جریان و مدل دما می‌باشد. طبق نتایج هی و همکاران [۱۷] معادله گرما به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$g_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) - g_i(x, t) \quad (6)$$

$$= -\frac{1}{\tau_g} [g_i(x, t) - g_i^{eq}(x, t)]$$

در این رابطه $g_i(x, t)$ و $g_i^{eq}(x, t)$ به ترتیب تابع توزیع دمای تک‌ذره و تابع توزیع تعادلی آن، e_i سرعت شبکه و Δt گام زمانی که ۱ در نظر گرفته می‌شود، τ_g نیز زمان آرامش انتقال انرژی می‌باشد. k رسانایی گرمایی سیال یا جامد، ρ چگالی و c_p گرمای ویژه در فشار ثابت هستند.

میزان $g_i^{eq}(x, t)$ نیز از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$g_i^{eq} = \hat{w}_i T \left[1 + 3 \frac{e_i u}{c^2} \right], i = 0 \dots 8 \quad (7)$$

\hat{w}_i تابع وزنی دما برای مدل دما می‌باشد. لزجت سینماتیک ν و ضریب نفوذ گرمایی α که به زمان آرامش مرتبط هستند، از رابطه (۸) به دست می‌آیند:

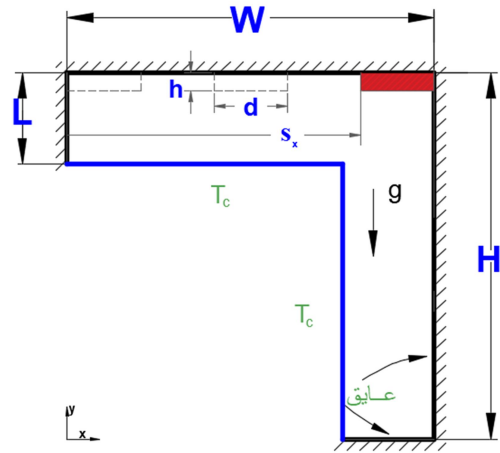
$$\nu = \left[\tau_v - \frac{1}{2} \right] e_s^2 \Delta t, \alpha = \left[\tau_\alpha - \frac{1}{2} \right] e_s^2 \Delta t \quad (8)$$

e_s سرعت شبکه بوده که $c/\sqrt{3}$ در نظر گرفته می‌شود. دمای محلی نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \sum_i g_i \quad (9)$$

به منظور محاسبه نیروی شناوری در رابطه (۲)، داریم:

$$F_i = 3w_i \rho g_y \beta (T - T_m) \quad (10)$$



شکل ۱ - شماتیک دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

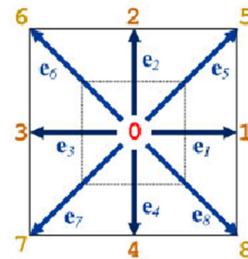
مانع با دمای $T_{in} = 1^\circ C$ فرض شده و دیواره‌های بالایی و پایینی عایق و دیواره‌های نشان داده شده مطابق شکل در دمای $T_c = 0^\circ C$ قرار دارد. سیال داخل محفظه آب بوده و چگالی طبق تعریف بوزینسکی تغییر کرده و ساختار جریان نیز لایه‌ای فرض شده است. آهنگ انتقال گرما داخل حفره در اعداد رایلی متعدد با محاسبه عدد ناسلت میانگین بیان شده است.

۲-۲- روابط و شرایط مرزی

روش شبکه بولتزنم بر اساس نظریه جنبشی، جریان سیال را با دنبال کردن سیر تکاملی توزیع چگالی تک‌ذره، شبیه‌سازی می‌کند. در این مقاله، از مدل شبکه بولتزنم دوبعدی با ۹ مؤلفه سرعت (D_2Q_9) جهت حل معادله شبکه بولتزنم در جریان سیال در سطح معادله‌ی ناویر استوکس استفاده شده است. طرح کلی این مدل در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل، e_i سرعت منفذی تک‌ذره است که مقدار آن در هر جهت طبق رابطه‌ی (۱) مشخص می‌شود:

$$e_i = \begin{cases} 0 & i = 0 \\ (\cos[(i-1)\pi/2], \sin[(i-1)\pi/2])c & i = 1, 2, 3, 4 \\ \sqrt{2}(\cos[(i-5)\pi/2 + \pi/4], \sin[(i-5)\pi/2 + \pi/4])c & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (1)$$

اندیس i بیانگر جهت سرعت تک‌ذره و c سرعت شبکه می‌باشد که در این‌جا برابر یک در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ - مدل D_2Q_9 شبکه بولتزنم

$$Nu_h = -\left(\frac{\partial T}{\partial Y}\right) \quad (17)$$

که در نتیجه عدد ناسلت میانگین با انتگرال گیری از عدد ناسلت محلی در دیواره‌های داغ به صورت ذیل خواهد بود:

$$Nu = \int Nu_h dX \quad (Y = h) \\ + \int Nu_v dY \quad (X = S_x) \quad (18) \\ + \int Nu_v dY \quad (X = S_x + d)$$

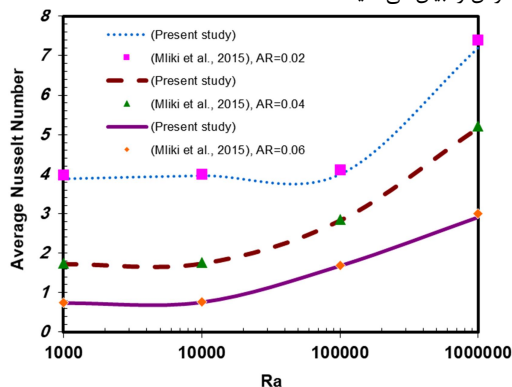
۳-۲- الگوریتم حل

انتخاب یک الگوریتم مناسب به منظور حل مسئله اشاره شده و دست‌یابی به نتایج صحیح، بسیار حائز اهمیت است. دیاگرام گردشی بهترین و مناسب‌ترین روش در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل، ابتدا پارامترهای اولیه همچون Ma , Ra , T_c , T_h , v , Pr توزیع تعادلی اولیه $f_i = g_i = 0$, $i = 0 \dots 8$ در نظر گرفته می‌شوند. سپس، طبق روابط (۳) و (۷) مقادیر توابع توزیع تعادلی در گره‌های سیال محاسبه می‌شوند. در مرحله‌ی تصادم (۲) و (۶) ارضا شده و مقادیر جدید توابع توزیع (پس از تصادم) محاسبه می‌شوند. پس از آن مرحله‌ی جاری شدن اجرا می‌شود که مقادیر توابع توزیع تمامی گره‌ها در راستای خود، بر روی گره‌های هم‌جوار ریخته می‌شوند. بعد از اعمال شرایط مرزی، مقادیر چگالی، سرعت و دما در تمامی شبکه طبق روابط (۴)، (۵)، (۹) محاسبه شده و در صورت همگرا شدن نتایج، برنامه پایان می‌یابد در غیر این صورت مراحل شرح داده شده، تکرار خواهند شد.

۳-۳- بررسی نتایج

۳-۱- اعتبار سنجی و استقلال از شبکه

برای آزمایش کد نوشته شده به زبان فورتن، نتایج تحقیقات گذشته با نتایج موجود از حل کد بررسی شده‌اند. در شکل ۴ نتایج مقایسه بین کد عددی برای جریان سیال در محفظه L شکل در اعداد رایلی 10^3 تا 10^6 با نتایج ملیکی و همکاران [۲۱] انجام شده است. مطابق این شکل، نتایج اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر داشته و صحت روش شبکه بولتزن را بیان می‌نماید.



شکل ۴- عدد ناسلت متوسط و نتایج ملیکی و همکاران

که β و T به ترتیب بیانگر چگالی محلی، بردار شتاب جاذبه، ضریب انبساط گرمایی و دمای محلی بوده و $T_m = (T_h + T_c)/2$ به صورت عددی در رژیم تراکم‌ناپذیر قرار دارد، عدد ماخ بایستی کمتر از 0.3 باشد؛ بنابراین در این مقاله عدد ماخ در مقدار 0.1 ثابت در نظر گرفته شده است. با ثابت نگه داشتن عدد رایلی Ra ، عدد پرناتل و عدد ماخ و تعداد گره‌ها در جهت y ، مقدار لرجت در شبکه بولتزن به صورت زیر خواهد بود:

$$v = \sqrt{\frac{Ma^2 M^2 Pr_g^2}{Ra}} \quad (11)$$

در رابطه بالا M برابر تعداد گره‌ها در جهت y می‌باشد. عدد رایلی و پرناتل به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$Ra = \frac{\beta g_y H^3 Pr_{nf} (T_h - T_c)}{v^2} \quad (12)$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha} \quad (13)$$

H طول مشخصه و v لرجت سینماتیک است. در روش شبکه بولتزن، شرایط مرزی در دو دسته شرط جریان و شرط جامد طبقه‌بندی می‌شود. برای دیواره‌ها با فرض عدم لغزش سرعت، از مدل بونس - بک [۱۸ و ۱۹] استفاده شده است. این مدل اولین و ساده‌ترین مدلی است که شرط عدم لغزش را بیان می‌کند. در این مدل، ذره برخوردی به دیواره‌ی جامد در جهت برعکس خود برمی‌گردد. با در نظر گرفتن جریان جابه‌جایی طبیعی داخل محفظه، شرط مرزی جهش به عقب را می‌توان برای دیواره‌های محفظه‌ی هندسه توصیف‌شده اعمال کرد. در مورد تابع توزیع دما به دلیل دمای ثابت دیواره نحوه اعمال شرایط مرزی متفاوت خواهد بود. نحوه اعمال شرایط مرزی با جزئیات در کتاب روش شبکه بولتزن محمد [۲۰] بیان شده است. به منظور خلاصه‌نویسی، از ذکر مجدد معادلات شرط مرزی اجتناب می‌شود. شرط مرزی دما ثابت $T_h = 0^\circ C$ برای دیواره‌های گرم و $T_c = 0^\circ C$ در دیواره‌های سرد در نظر گرفته شده است [۸]. به منظور بررسی میزان افزایش یا کاهش انتقال گرمای داخل حفره، عدد ناسلت محلی طبق رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$Nu_l = \frac{hH}{k} \quad (14)$$

H طول مشخصه، k رسانندگی گرمایی سیال و h ضریب انتقال گرما است که با رابطه (۱۵) تعریف می‌گردد:

$$h = \frac{q_w}{\theta_h - \theta_c} \quad (15)$$

θ دمای بی‌بعد می‌باشد. عدد ناسلت محلی در دیواره‌های گرم عمودی و افقی به ترتیب برابر است با:

$$Nu_v = -\left(\frac{\partial T}{\partial X}\right) \quad (16)$$

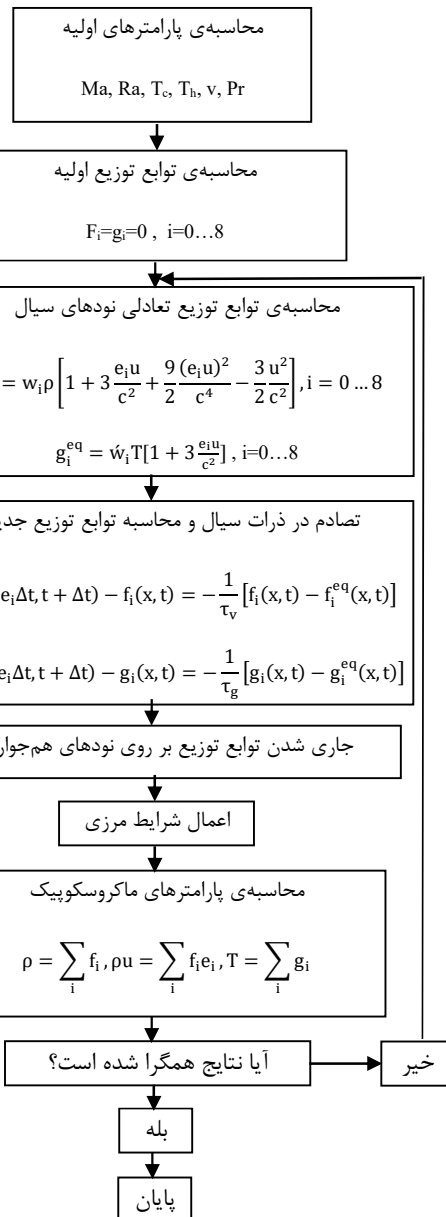
سرعت بیشتر همگرایی در شبکه‌بندی 100×100 این شبکه‌بندی در کل محاسبه‌ی عددی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین مدت زمان تقریبی برای اجرای هر برنامه ۱۸۰۰ ثانیه است.

جدول ۱ - عدد ناسلت متوسط در شبکه‌بندی‌های مختلف

رایلی	شبکه	عدد ناسلت متوسط	درصد خطا	
			$100 \times \left \frac{Nu_{new} - Nu_{old}}{Nu_{new}} \right $	
	60×60	۲/۱۸۳۲		
	80×80	۲/۱۱۴۳		
10^2	100×100	۲/۱۰۳۱		
	120×120	۲/۱۰۲۳		
	60×60	۲/۴۹۸۰		
10^6	80×80	۲/۴۶۲۴		
	100×100	۲/۴۳۴۰		
	120×120	۲/۴۱۲۳		

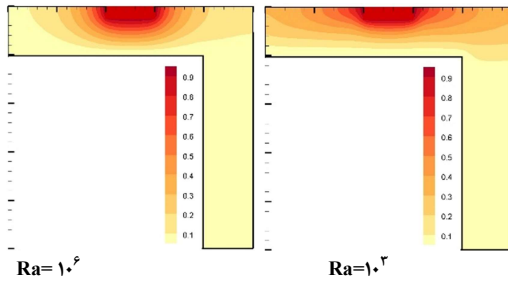
۳-۲- منحنی‌های جریان و منحنی‌های هم‌دما

منحنی‌های جریان و هم‌دما داخل حفره به ازای $S_x = 0.8$ و $H' = 0.5$ و در اعداد رایلی مختلف 10^2 و 10^6 در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل‌ها، منحنی‌های جریان تحت تأثیر مانع و عدد رایلی می‌باشد. دو گردابه‌ی پاد ساعت‌گرد در داخل حفره مشاهده می‌شود که تقریباً هم‌اندازه می‌باشند. با افزایش رایلی میزان قدرت گردابه‌ها (تابع جریان) افزایش یافته و الگوی آن‌ها نیز تغییر می‌کند به گونه‌ای که گردابه‌ی بزرگ و قوی در حفره تشکیل می‌یابد که متمایل به سمت چپ حفره است. طبق شکل ۶، منحنی‌های هم‌دمای داخل حفره به دلیل پدیده‌ی غالب انتقال گرمای رسانشی در عدد رایلی پایین، کاملاً متقارن بوده و با افزایش عدد رایلی، سهم انتقال گرمای جابه‌جایی بیشتر شده و منحنی‌های هم‌دما نامتقارن می‌گردند. با افزایش رایلی، منحنی‌های جریان در اطراف مانع متمرکزتر شده و گردادمان دما افزایش می‌یابد.

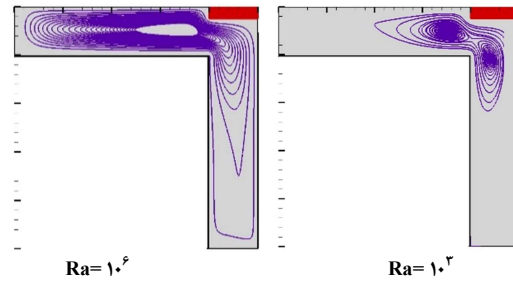


شکل ۳ - دیاگرام چرخشی الگوریتم حل

جهت حل مسئله، دامنه‌ی محاسباتی شبکه‌بندی شده است. یک شبکه‌ی مناسب و تا حد امکان یکنواخت در دقت جواب‌ها و همچنین پایداری حل عددی اهمیت زیادی دارد. عموماً برای حصول جواب دقیق، شبکه را ریز می‌نمایند، از طرف دیگر برای کم کردن حجم محاسبات، شبکه‌بندی مورد استفاده نباید بیش از حد مورد نیاز ریز باشد [۲۲]؛ بنابراین در یک حل عددی لازم است بین دو پارامتر دست‌یابی به نتایج با دقت خوب و سرعت انجام محاسبات، توافق منطقی ایجاد شود. به منظور استقلال کد عددی از شبکه‌ی مورد استفاده نیز جدول یک برای حالت‌های مختلف شبکه‌بندی تهیه گردید. مطابق این جدول نتایج بین گره‌های ۱۰۰ با ۱۲۰ بسیار کم می‌باشد لذا با توجه به

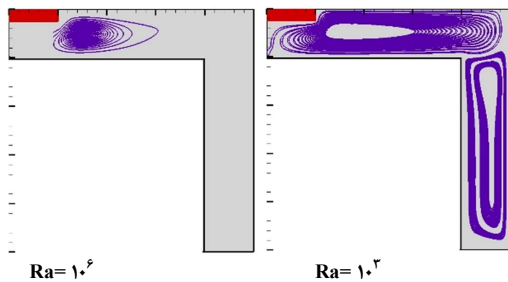


شکل ۸ - منحنی‌های دما داخل حفره در اعداد رایلی مختلف،
 $S_x=0/4$ و $H'=0/05$

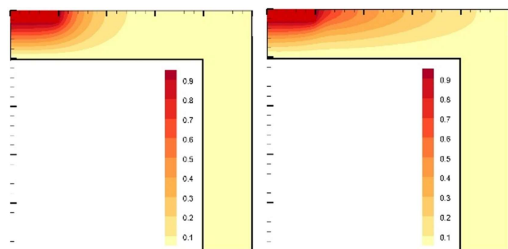


شکل ۵ - منحنی‌های جریان داخل حفره در اعداد رایلی مختلف،
 $S_x=0/8$ و $H'=0/05$

با تغییر قرارگیری مانع در موقعیت $S_x=0/0$ ، تنها یک گردابه‌ی ساعت‌گرد در بخش بالایی حفره به ازای $Ra=10^3$ مطابق شکل ۹ تشکیل می‌شود. افزایش عدد رایلی و در نتیجه افزایش نیروی شناوری، دو گردابه‌ی بزرگ در حفره تشکیل می‌شود، به گونه‌ای که گردابه‌ی قسمت بالایی حفره ساعت‌گرد و گردابه‌ی قسمت پایینی پادساعت‌گرد می‌باشد. با مقایسه شکل ۶ و ۱۰، در حالت قرارگیری مانع در موقعیت انتهایی، انتقال گرمای جابه‌جایی قدرت کمی دارد. میزان عدد ناسلت متوسط در این حالت برای عدد رایلی 10^3 برابر $1/6765$ بوده که کمتر از مقادیر $2/7909$ و $2/1031$ برای موقعیت مانع به ترتیب $S_x=0/4$ و $S_x=0$ است. به عبارت دیگر برای قرارگیری مانع در انتها حفره، انتقال گرمای جابه‌جایی تأثیر کمتری خواهد داشت.

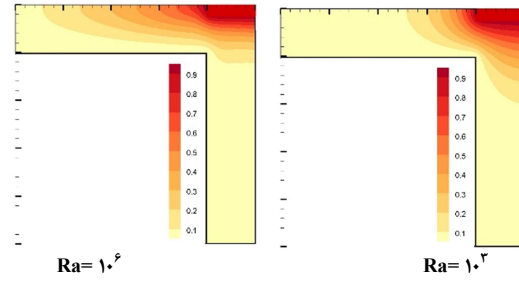


شکل ۹ - منحنی‌های جریان داخل حفره در اعداد رایلی مختلف،
 $S_x=0/0$ و $H'=0/05$



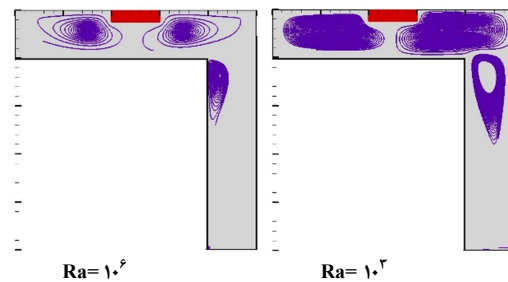
شکل ۱۰ - منحنی‌های دما داخل حفره در اعداد رایلی مختلف،
 $S_x=0/0$ و $H'=0/05$

شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نتایج به دست آمده برای وضعیت قرارگیری مانع در $S_x=0/2$ را در ابعاد مختلف مانع و اعداد رایلی متفاوت را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها تأثیر تغییر موقعیت مانع بر منحنی‌های جریان (ایجاد دو گردابه در عدد رایلی پایین) و دما کاملاً مشهود است. با افزایش H'

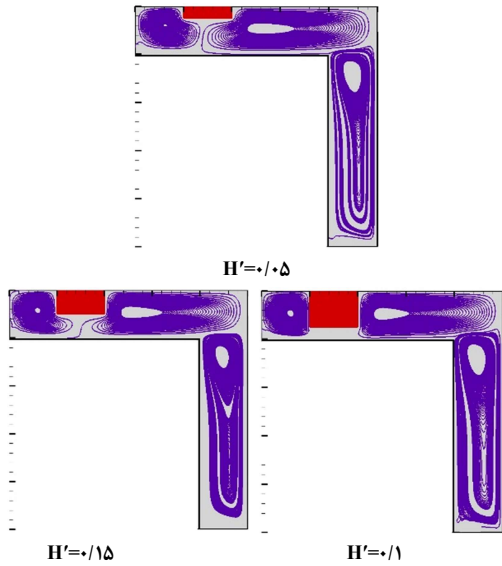


شکل ۶ - منحنی‌های دما داخل حفره در اعداد رایلی مختلف، $H'=0/05$ و
 $S_x=0/8$

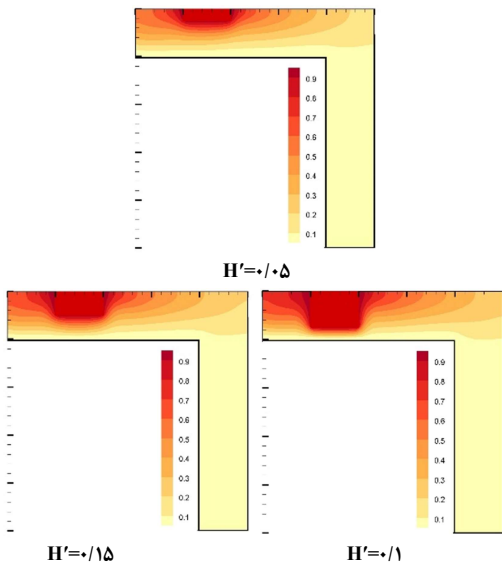
منحنی‌های جریان و هم‌دما داخل حفره به ازای $S_x=0/4$ و $H'=0/05$ و در اعداد رایلی مختلف 10^3 و 10^6 در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد با تغییر مکان قرارگیری مانع، گردابه‌ها به شدت تحت تأثیر مکان مانع می‌باشد و به سه گردابه مستقل تبدیل می‌گردد. گردابه‌ی سمت راست مانع ساعت‌گرد بوده و گردابه‌ی سمت چپ مانع پادساعت‌گرد می‌باشد. گردابه‌ی تشکیل شده در قسمت پایینی حفره نیز پاد ساعت‌گرد می‌باشد. افزایش عدد رایلی نیز باعث قوی‌تر شدن گردابه‌ها شده و کل بخش بالایی حفره را می‌پوشاند. منحنی‌های هم‌دما مرتبط با منحنی‌های جریان اشاره شده، در ادامه در شکل ۸ نمایش داده شده است. مطابق شکل در حالت قرارگیری مانع در موقعیت $S_x=0/4$ ، منحنی‌های هم‌دما بخش کمتری از پایین حفره را می‌پوشاند. به دلیل موقعیت خاص مانع در این حالت نسبت به حالت قبل، با افزایش عدد رایلی نیز منحنی‌ها تقریباً به موازات لبه پایینی حفره باقی می‌ماند.



شکل ۷ - منحنی‌های جریان داخل حفره در اعداد رایلی مختلف،
 $S_x=0/4$ و $H'=0/05$



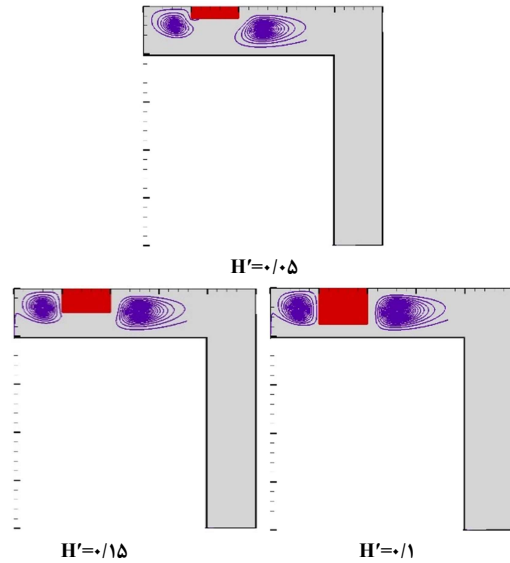
شکل ۱۳ - منحنی‌های جریان داخل حفره در عدد رایلی 10^6 ، $S_x = 0.2$ و به ازای H' های مختلف



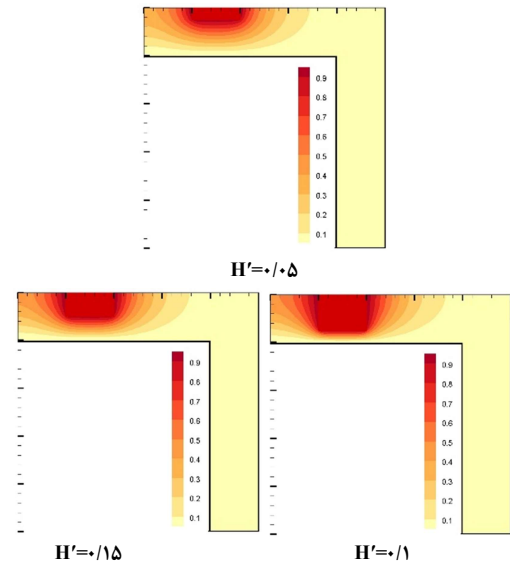
شکل ۱۴ - منحنی‌های دما داخل حفره در عدد رایلی 10^6 ، $S_x = 0.2$ و به ازای H' های مختلف

به منظور بررسی میزان انتقال گرما، عدد ناسلت متوسط پیرامون مانع محاسبه گردید و نمودارهای متعددی به دست آمد. در شکل ۱۵ نمودار عدد ناسلت متوسط در اعداد رایلی متفاوت و به ازای موقعیت‌های مختلف و ارتفاع‌های مختلف مانع (0.05 ، 0.1 و 0.15) نشان داده شده است. مطابق این شکل با افزایش عدد رایلی در تمام حالت‌ها، به علت افزایش سهم جابه‌جایی در مقابل رسانش، میزان آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد. همچنین در یک عدد رایلی ثابت، افزایش نسبت ارتفاع منجر به افزایش سطح گرم و گرادیان دما شده و میزان انتقال گرما به علت افزایش نیروی شناوری، افزایش می‌یابد. همان‌گونه که از این شکل به دست می‌آید، بیشترین آهنگ انتقال گرما به ازای قرارگیری مانع در

شکل و اندازه‌ی گردابه‌ها تغییر می‌کند. مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۴ نیز افزایش ابعاد مانع منجر به افزایش میزان سطح گرم شده که این امر گرادیان دما را افزایش می‌دهد.

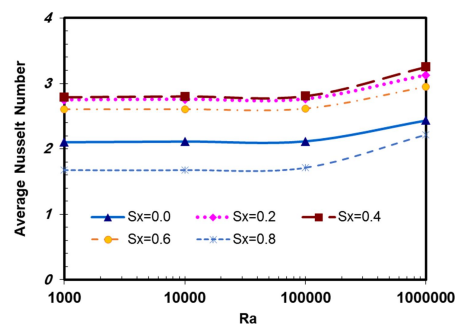


شکل ۱۱ - منحنی‌های جریان داخل حفره در عدد رایلی 10^2 ، $S_x = 0.2$ و به ازای H' های مختلف

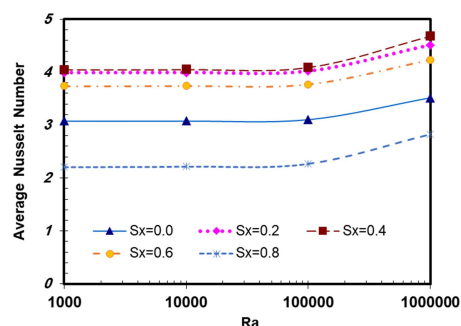


شکل ۱۲ - منحنی‌های دما داخل حفره در عدد رایلی 10^2 ، $S_x = 0.2$ و به ازای H' های مختلف

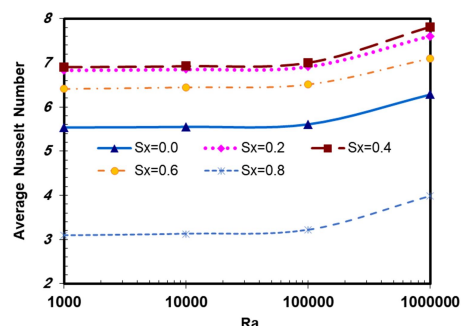
موقعیت $S_x=0.4$ مشاهده می‌شود که می‌تواند به علت وضعیت مناسب جهت گردش مناسب جریان داخل حفره و ایجاد گرادیان مطلوب باشد. لذا می‌توان از این موقعیت جهت قرارگیری قطعات الکترونیکی در حفره‌ها به منظور دستیابی به بهترین آهنگ انتقال گرما استفاده نمود. این میزان افزایش، با افزایش عدد رایلی رشد چشمگیری می‌یابد. قابل ذکر است که بیشترین مقدار عدد ناسلت برابر $7/81138$ در عدد رایلی 10^6 و نسبت ارتفاع 0.15 و به ازای $S_x=0.4$ دیده می‌شود.



$H'=0.05$



$H'=0.1$



$H'=0.15$

شکل ۱۵ - عدد ناسلت متوسط برحسب عدد رایلی، به ازای موقعیت‌های مختلف مانع و در نسبت ارتفاع متفاوت

۵- نتیجه گیری

در این مقاله از روش شبکه بولتزمن جهت بررسی جابه‌جایی طبیعی دوبعدی جریان لایه‌ای تراکم ناپذیر در داخل یک حفره‌ی ۷ شکل با وجود مانع گرم مستطیلی بر روی دیواره‌ی بالایی استفاده شد و قابلیت این روش در شبیه‌سازی محیط‌های بسته مورد بررسی قرار گرفته است.

تأثیر پارامترهای عدد رایلی، تغییر موقعیت مانع داخل حفره و تغییر نسبت ارتفاع مانع مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج زیر از تحلیل‌های مختلف روی نمودارها و شکل‌های به دست آمده قابل ذکر است:

- ۱- با افزایش عدد رایلی از 10^2 به 10^6 ، ضمن افزایش سهم انتقال گرمای جابه‌جایی، آهنگ انتقال گرما افزایش می‌یابد.
- ۲- آهنگ انتقال گرما در محفظه، به نسبت ارتفاع مانع داخل وابسته بوده و با بررسی سه ارتفاع 0.05 ، 0.1 ، 0.15 نتیجه می‌شود که با افزایش نسبت ارتفاع مانع ضمن افزایش گرادیان دما، بیشترین آهنگ انتقال گرما در نسبت ارتفاع 0.15 مشاهده می‌شود.
- ۳- آهنگ انتقال گرما به موقعیت مانع در حفره نیز وابسته است با بررسی موقعیت‌های متفاوت در حفره نتیجه می‌شود که بیشترین آهنگ انتقال گرما در موقعیت $S_x=0.4$ اتفاق می‌افتد.

۶- مراجع

- [1] Azimifar A., Payan S., Optimization of characteristics of an array of thin fins using PSO algorithm in confined cavities heated from a side with free convection. *Applied Thermal Engineering*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.012>
- [2] 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.
- [3] Nazari M., Mohebbi R., 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.
- [4] 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): pp. 55-68, 2016.
- [5] Mohebbi R., Heidari H., Lattice Boltzmann simulation of fluid flow and heat transfer in a parallel-plate channel with transverse rectangular cavities. *International Journal of Modern Physics C*, 28(03): 1750042, 2017.
- [6] Mohebbi R., Izadi M., Chamkha A. J., Heat source location and natural convection in a C-shaped enclosure saturated by a nanofluid. *Physics of Fluids*, 2017, 29: 122009.
- [7] Mohebbi R., Lakzayi H., Sidik N. A. C., et al., Lattice Boltzmann method based study of the heat transfer augmentation associated with Cu/water nanofluid in a channel with surface mounted blocks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117: pp. 425-435, 2018.
- [8] Mohebbi R., Rashidi M. M., Izadi M., et al., Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 117: pp.1291-1303, 2018.
- [9] محمدی پ، مطالعه عددی انتقال گرمای جابه‌جایی طبیعی در یک حفره مربعی باز حاوی نانو سیال با استفاده از روش شبکه بولتزمن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، ۱۳۹۲.
- [10] Fattahi E., Farhadi M., Sedighi K. and Nemati H., Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection Heat Transfer in Nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences*, 52, pp. 137-144, 2012.
- [11] Nemati H., Farhadi M., Sedighi K. and Fattahi E., Lattice Boltzmann Simulation of Nanofluid in Lid-Driven Cavity.

- International Communication in Heat and Mass Transfer*, 37, pp. 1528-1534, 2010.
- [12] Abu-Nadaa E. and Chamkhac A. J., Mixed Convection Flow in a Lid-Driven Inclined Square Enclosure Filled with a Nanofluid. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 29, pp.472-482, 2010.
- [13] Kefayati G. H. R., Hosseinzaeh H. F., Gorji M., Sajjadi H., Lattice Boltzmann simulation of natural convection in tall enclosures using water/SiO₂ nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp.798-805, 2011.
- [14] Abdallaoui M El., Hasnaoui M., Amahmid A., Numerical simulation of natural convection between a decentered triangular heating cylinder and a square outer cylinder filled with a pure fluid or a nanofluid using the lattice Boltzmann method. *Powder Tech.*, 277: pp.193-205, 2015.
- [15] Mohebbi R., Rashidi M. M., Numerical simulation of natural convection heat transfer of a nanofluid in an L-shaped enclosure with a heating obstacle. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 72: pp.70-84, 2017.
- [16] Peng Y., Shu C. and Chew Y.T., Simplified Thermal Lattice Boltzmann Model for Incompressible Thermal Flows. *Physical Review E*, 68, 026701, 2003.
- [17] He X.Y., Chen S.Y. and Doolen G. D., A Novel Thermal Model for the Lattice Boltzmann Method in Incompressible Limit. *J. Computational Physics*, Vol. 146, No. 1, pp. 282-300, 1998.
- [18] Zou, Q.S. and He X.Y., On Pressure and Velocity Boundary Conditions for the Lattice Boltzmann BGK Model. *Physics of Fluids*, 1997, Vol. 9, No. 6, pp. 1591-1598.
- [19] Inamuro T., Yoshino M. and Ogino F., A Non-Slip Boundary Condition for Lattice Boltzmann Simulations. *Physics of Fluids*, Vol. 7, No. 12, pp. 2928-2930, 1995.
- [20] Mohammad A., Lattice Boltzmann Method. *Springer*, 2011.
- [21] Mliki B., Abbassi M. A., Guedri K., Omri A., Lattice Boltzmann simulation of natural convection in an L-shaped enclosure in the presence of nanofluid. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2015 Sep 1;18(3):503-11.
- [22] Izadi M., Mohebbi R., Karimi D., Sheremet M. A., Numerical simulation of natural convection heat transfer inside a \perp shaped cavity filled by a MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids using LBM. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, DOI:10.1016/j.cep.2018.01.004, 2018.