

تاثیر چین خوردگی متفاوت بر میزان آهنگ انتقال گرمای جابجایی طبیعی درون یک حفره مربعی

رسول محبی*

محمد مسعودنیا

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه دامغان، دامغان، ایران

چکیده

جابجایی طبیعی دوبعدی جریان لایه‌ای تراکم ناپذیر در داخل یک حفره مربعی با وجود چین خوردگی های متفاوت در دیواره پایینی، با روش المان محدود در نرم افزار COMSOL بررسی شده است. دیواره های بالا و پایین عایق بوده، دیواره چپ در دمای ثابت T_h و دیواره راست در دمای ثابت T_c ($T_c < T_h$) نگه داشته شده است. در این تحقیق حفره هایی با چین خوردگی های متفاوت با شکل های مستطیلی، دوزنقه ای، مثلثی و سینوسی برای دامنه های مختلف بلوکها، دامنه تناوب و اعداد رایلی مختلف بررسی شده است. هوا به عنوان سیال عامل در نظر گرفته شده است. رفتار هیدرودینامیکی و گرمایی سیال در قالب خطوط جریان، خطوط هم دما و عدد ناسلت متوسط بررسی شده است. نتایج به دست آمده بر پایه این شبیه سازی نشان دهنده این مطلب است که با افزایش عدد رایلی میزان عدد ناسلت افزایش می یابد. مقدار بهینه ای برای افزایش آهنگ انتقال گرما با افزایش دامنه بلوک ها و دامنه تناوب آنها وجود دارد. همچنین بیشترین آهنگ انتقال گرما در حفره دارای چین خوردگی سینوسی رخ می دهد.

واژه های کلیدی: جابجایی طبیعی، حفره مربعی، چین خوردگی، عدد ناسلت.

The Effect of Different Corrugated on the rate of Natural Convection Heat Transfer inside a Square Cavity

R. Mohebbi
M. Masodnia

Mechanical Engineering, School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

Bachelor of Science, Student School of Engineering, Damghan University, Damghan, Iran

Abstract

Natural convection of a two-dimensional laminar incompressible fluid flow in a square cavity with different corrugated on the bottom wall has been investigated by finite element method in Comsol software. The top and the bottom walls are insulated, the left and the right walls are maintained at a constant temperature T_c ($T_H > T_c$). In this study, cavities with different corrugated by shapes of rectangular, trapezoidal, triangular and sinusoidal are studied for different amplitude of shapes of blocks, periodicity amplitude and aspect ratio and Rayleigh number. The air is chosen as a working fluid. Hydrodynamic and thermal behavior of fluid is analyzed in form of streamlines, isotherms and the average Nusselt number. Results based on this numerical study showed that the by increasing the Rayleigh number the rate of Nusselt number increases. There is an optimized range for increment rate of heat transfer by increasing the amplitude of shapes of blocks and periodicity amplitude. Also the maximum rate of heat transfer occurs in sinusoidal shape of cavity.

Keywords: Natural convection, Square cavity, Corrugated, Nusselt number.

۱- مقدمه

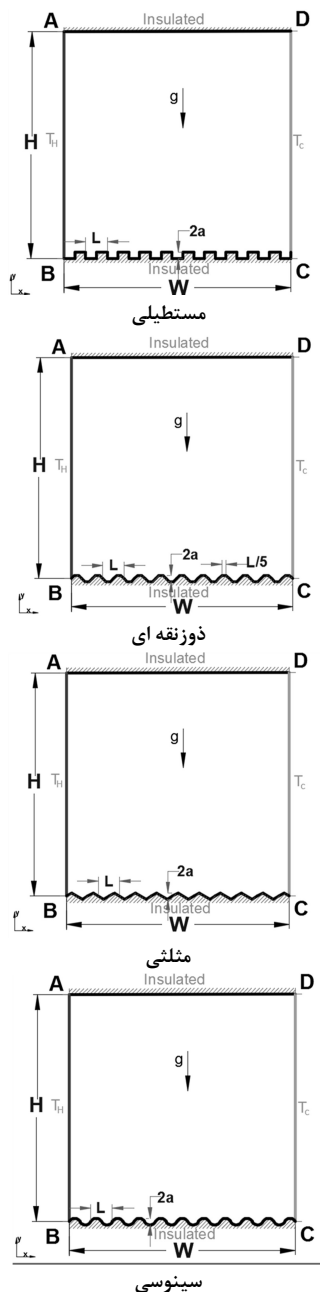
انتقال گرمای جابجایی طبیعی درون یک محفظه یا حفره بسته نقش مهمی در مهندسی دارد، چراکه کاربرد فراوانی در وسایل و تجهیزات الکترونیکی، سیستم های انرژی، گردآورنده خورشیدی و .. ایفا می کند [۱-۶]. در این زمینه تاکنون مطالعات عددی، آزمایشگاهی و تحلیلی زیادی انجام شده است.

محفظة های چین دار نقش مهمی در تبادل گرما بین منابع گرم و سرد ایفا می کنند. این محفظه ها را می توان به عنوان وسایل کنترلی فعالی در جهت کاهش یا افزایش انتقال گرما در نظر گرفت. در سال های اخیر، اکثر بهبود های انتقال گرما با تغییر الگوی جریان در محفظه های مستطیلی و مربعی انجام گرفته است. بررسی جریان سیال و انتقال گرما داخل کانال ها و حفره ها نیز با روش های مختلف تجربی، عددی و تحلیلی امکان پذیر است [۷-۱۲].

راتیش کومار و شالینی [۱۳] مطالعات عددی بر روی جابجایی طبیعی غیر دارسی در یک محفظه عمودی موجی شکل پر شده با

محیط متخلخل انجام داد. هوانگ و همکاران [۱۴] به مطالعه عددی در زمینه میزان بهبود انتقال گرمای ناشی از نصب بلوک های متعدد گرم شده در کانال حاوی محیط متخلخل پرداختند. وارول و همکاران [۱۵] به بررسی تاثیر مکان تیغه در دیواره پایینی یک محفظه مثلثی که با جریان متخلخل پر شده بود، پرداختند. آیونالا و همکاران [۱۶] نیز در زمینه اثر زاویه انحراف و دامنه صعود و نزول انتقال گرمای درهم در یک محفظه محدود با دو دیواره با درجه دمای متفاوت، مطالعاتی را انجام دادند. خانافر [۱۷] انتقال گرمای جابجایی آزاد درون یک حفره با دیواره موجی عمودی و پر شده با محیط متخلخل را بررسی نمود. حیدری و کرمانی [۱۸] به بررسی بهبود انتقال گرما و هیدرودینامیک میدان جریان در یک کانال موجی حاوی نانو سیال پرداختند. در مطالعه آنها تغییرات دامنه موج بر روی عدد ناسلت میانگین و عدد ناسلت محلی و همچنین ضریب اصطکاک سطحی بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که وجود ذرات نانو باعث بهبود انتقال گرمای تا ۶۰ درصد می گردد. مطالعه عددی دیگری نیز توسط حسن و همکاران [۱۹] در زمینه جابجایی طبیعی محفظه هایی با چین خوردگی

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



شکل ۱- طرحواره دامنه محاسباتی و شرایط مرزی

۲-۲- روابط و شرایط مرزی

به منظور بیان معادلات حاکم در فرم بی بعد در نرم افزار کومسول، 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، معادلات جریان دائمی پیوستگی، مومنتم و انرژی برای جابجایی طبیعی لایه ای داخل حفره در

سینوسی در اعداد رایلی مختلف انجام گرفت. سیال داخل حفره مورد بررسی آنها هوا در نظر گرفته شده بود. نتایج آنها نشان داد که با تغییر پارامترهای کانال سینوسی، میزان آهنگ انتقال گرمای نیز تغییر می کند. رحمان و همکاران [۲۰] انتقال گرمای جابجایی طبیعی یک حفره مثلثی در حضور نانوسیال با دیواره پایینی چین دار را بررسی نمودند. دیواره پایینی محفظه مورد بررسی آنها در دمای گرم و دیواره های جانبی در دمای سرد نگه داشته شد. نتایج آنها نشان داد میزان انتقال گرما از سطح گرم با افزایش کسر حجمی جامد، افزایش می یابد. نوایی و همکاران [۲۱] مطالعه عددی در زمینه تاثیر پارامترهای هندسی مختلف یک کانال چین دار تحت شار گرمایی یکسان انجام دادند. نتایج آنها که در اعداد رینولدز متفاوتی انجام گرفت، نشان داد که چین های شبه دایروی بیشترین تاثیر در افزایش عدد ناسلت را دارد. حسین [۲۲] به بررسی جابجایی طبیعی هیدرومغناطیسی داخل حفره سینوسی کج شده پرداخت. سیال داخل محفظه مورد بررسی وی تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار گرفته بود. نتایج وی که در عدد پرانتل 0.024 انجام شده بود نشان داد که میزان عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد لوییس افزایش می یابد. میلانی شیروان و همکاران [۲۳] به بررسی تاثیر پارامترهای سطح موجی شکل بر میزان آهنگ انتقال گرمای در محفظه مربعی موجی شکل پر شده با نانوسیال پرداختند. همانگونه که مشاهده می شود، در اکثر مطالعات گذشته تاثیر چین خوردگی در حفره یا کانال بررسی شده و هیچ گونه نتایجی در ارتباط با مقایسه بین چین خوردگی های مختلف بر روی میدان جریان و دما داخل کانال انجام نشده است. لذا در این مقاله برای اولین بار تاثیر چین خوردگی های مستطیلی، دوزنقه ای، مثلثی و سینوسی در دامنه متفاوت بلوک، دامنه تناوب و اعداد رایلی مختلف در دیواره پایینی یک حفره مستطیلی حاوی هوا بر آهنگ انتقال گرمای، در نرم افزار کومسول^۱ بررسی شده است.

۲- فرمول بندی ریاضی

۲-۱- هندسه مورد بررسی

در این مطالعه دوبعدی، سیال نیوتنی در محفظه مربعی با دیواره پایینی چین خورده در حالت های مختلف چین خوردگی مستطیلی، دوزنقه ای، مثلثی و سینوسی مطابق شکل ۱ بررسی شده است. در شکل نشان داده شده $H=W=1$ طول حفره مربعی، a دامنه بلوک ها و L دامنه تناوب بلوک ها از یکدیگر می باشد. که مقدار L ، 1 ، $1/5$ و $2/1$ mm و مقدار a ، 0.15 ، 0.225 و 0.315 mm تغییر می یابد. دیواره AB در دمای $T_H=1$ ، دیواره CD در دمای $T_C=0$ ، دیواره های AD و BC آدیاباتیک هستند. سیال داخل محفظه هوا بوده و چگالی طبق تعریف بوزینسک تغییر کرده و ساختار جریان نیز لایه ای فرض شده است. آهنگ انتقال گرمای داخل حفره در اعداد رایلی متعدد 10^2 تا 10^6 با محاسبه عدد ناسلت میانگین بیان شده است.

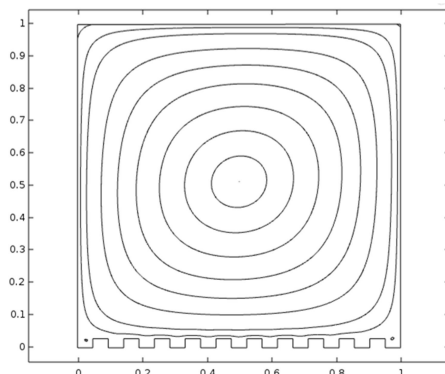
¹ Comsol

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط در شبکه بندی های مختلف

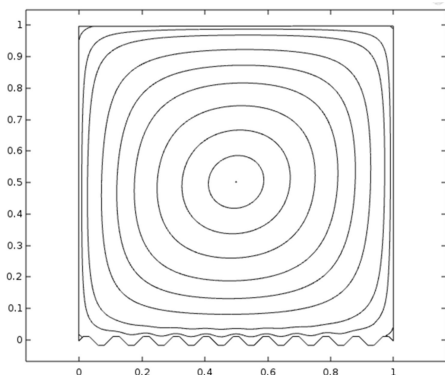
درصد خطا	Nu	تعداد المان ها
$100 \times \frac{ Nu_{new} - Nu_{old} }{Nu_{new}}$		
-	۸/۷۶۵۲	۲۳۷۷
۱/۴۴۷	۸/۸۹۲۱	۶۹۵۶
۳/۸۱۹	۹/۲۴۵۲	۲۷۴۶۰
۰/۲۱۱۵	۹/۲۶۴۸	۱۲۴۷۴۶

۳-۲- خطوط جریان و خطوط هم دما

به منظور بررسی تاثیر المانهای زبری بر خطوط جریان داخل حفره، نتایج به ازای حالت های مختلف حفره با دیواره های مستطیلی، دوزنقه ای، مثلثی و سینوسی به ازای $a = 1 \text{ mm}$ و $a = 0.15 \text{ mm}$ و در اعداد رایلی 10^3 و 10^6 به ترتیب در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در عدد رایلی پایین یک گردابه کلی در داخل حفره شکل می گیرد اما 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.



مستطیلی



دوزنقه ای

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 سینماتیکی است.

شرایط مرزی بی بعد نیز به صورت رابطه (۷) تعریف می شوند:

$$U = V = 0, \theta = 1 \quad \text{برای دیوار سمت چپ} \quad (۷)$$

$$U = V = 0, \theta = 0 \quad \text{برای دیوار سمت راست}$$

$$U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{برای دیوار بالا و پایین}$$

عدد ناسلت محلی و متوسط نیز در دیواره سمت چپ با استفاده از

روابط (۸) و (۹) در جهت عمود بر سطح (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

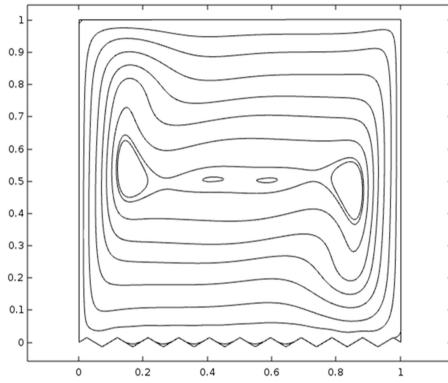
۳-۱- اعتبارسنجی

در این تحقیق، به منظور بررسی دقت روش مورد استفاده، 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.

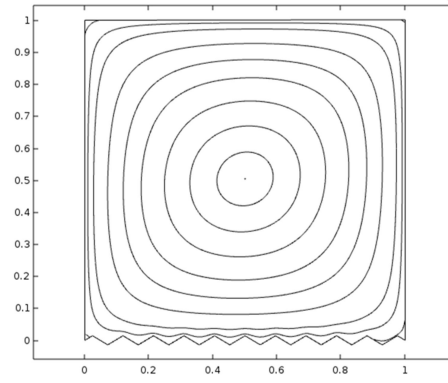
به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد و اندازه مش، سه نوع شبکه بندی با تعداد المانهای مختلف تولید شد. میزان عدد ناسلت متوسط برای حالت المان مستطیلی، L برابر ۰/۱ و a برابر ۰/۱۵ و عدد رایلی 10^6 در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق این جدول، اختلاف بین تعداد المان های ۲۷۴۶۰ و ۱۲۴۷۴۶ کمتر از یک درصد است اما مدت زمان لازم جهت رسیدن به همگرایی در تعداد المان ۱۲۴۷۴۶ تقریباً ۴ برابر مدت زمان سپری شده در تعداد المان ۲۷۴۶۰ می باشد. لذا تعداد المان ۲۷۴۶۰ 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

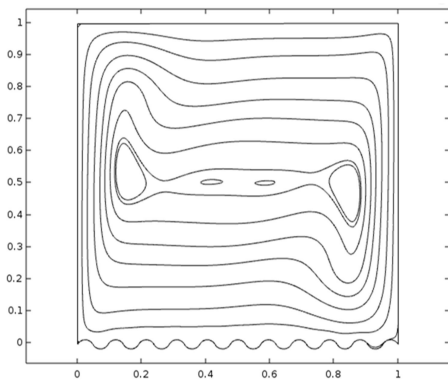
تحقیق حاضر	مزرهاب و همکاران [۲۲]	یان و همکاران [۲۳]	عدد رایلی
۱/۱۱۳	۱/۱۱۲	۱/۱۱۵	10^3
۲/۳۴۲	۲/۳۴۱	۲/۳۴۷	10^4
۴/۵۲۳	۴/۵۱۹	۴/۵۴۴	10^5
۸/۸۲۱	۸/۸۱۷	۸/۸۱۳	10^6



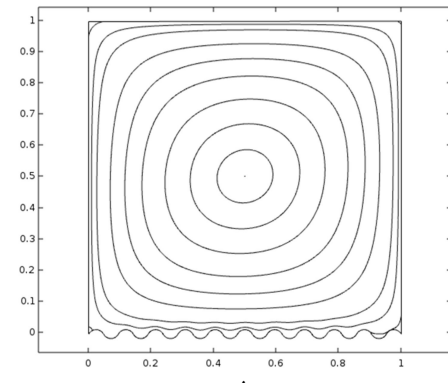
مثلی



مثلی



سینوسی

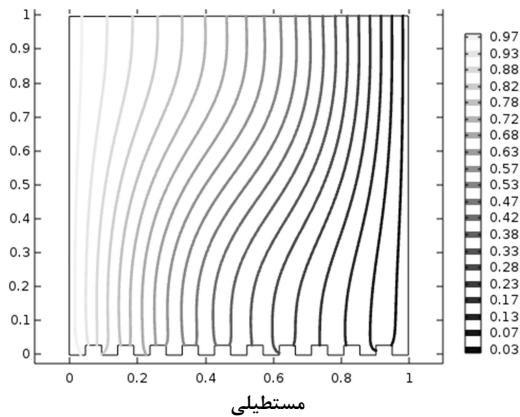


سینوسی

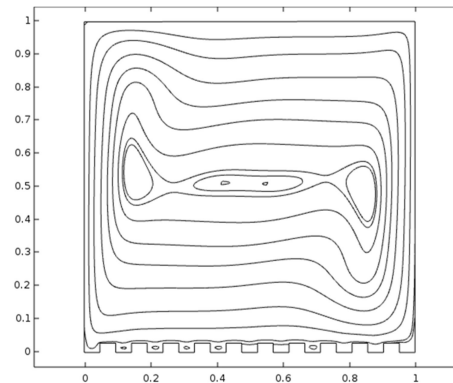
شکل ۳- خطوط جریان داخل حفره های مختلف در رایلی 10^6 و 10^3 و $L = 1 \text{ mm}$ و $a = 0.15$

شکل ۲- خطوط جریان داخل حفره های مختلف در رایلی 10^3 و 10^6 و $L = 1 \text{ mm}$ و $a = 0.15$

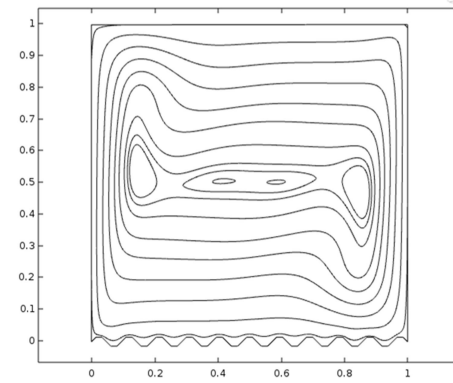
در شکل های ۴ و ۵ نیز خطوط هم دما داخل حفره های مختلف و به ازای $a = 1 \text{ mm}$ و $a = 0.15 \text{ mm}$ و در اعداد رایلی 10^6 و 10^3 نشان داده شده است. همان گونه که انتظار می رود در عدد رایلی پایین مکانیزم غالب رسانش بوده و خطوط منظم هستند. با افزایش عدد رایلی و تغییر مکانیزم غالب به جابجایی، خطوط هم دما با دیواره های سرد و گرم موازی می شوند و گرادیان دما افزایش می یابد.



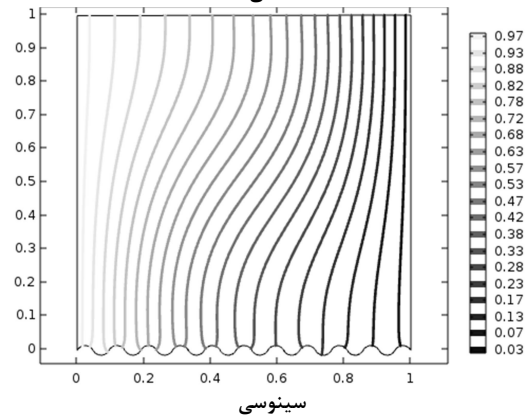
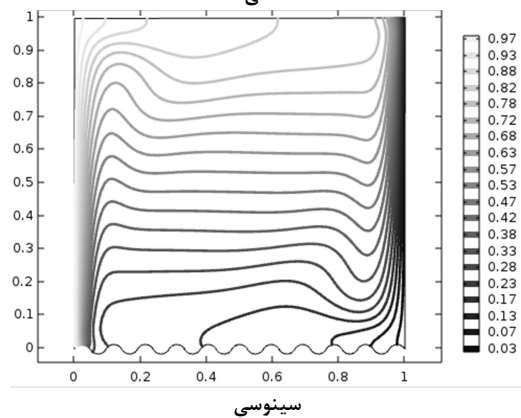
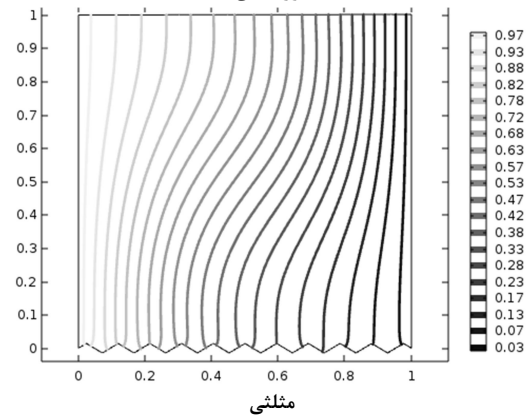
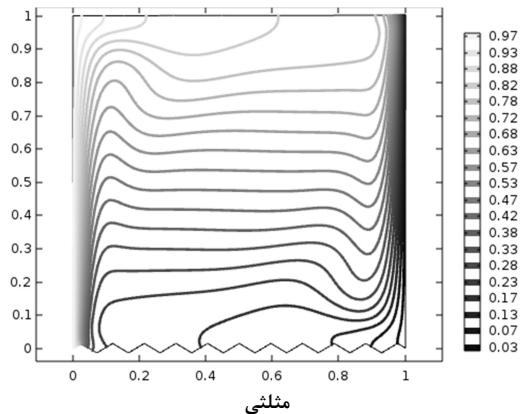
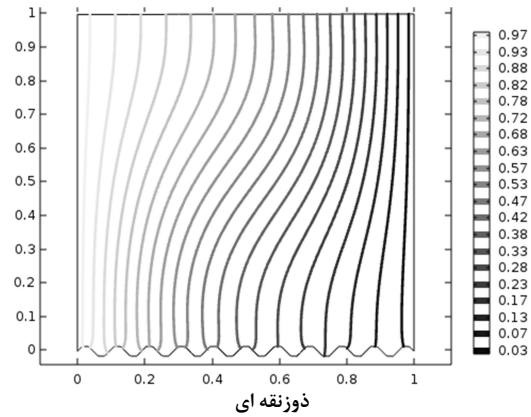
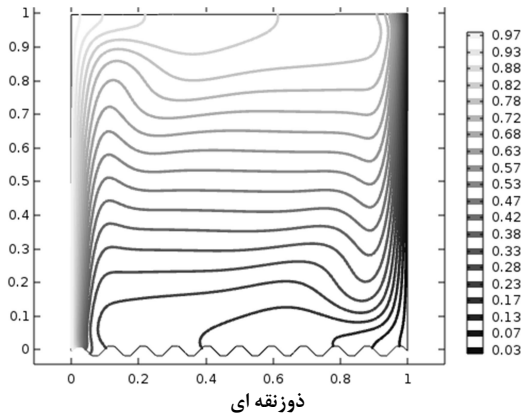
مستطیلی



مستطیلی



دوزنقه ای



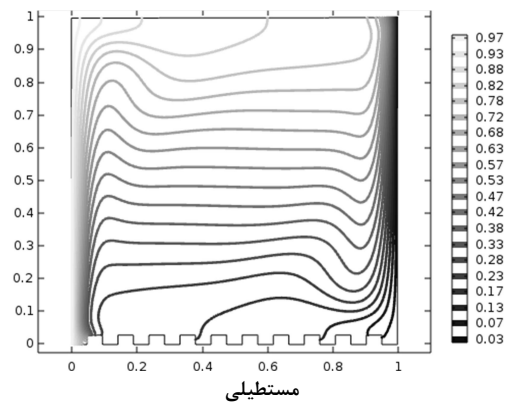
شکل ۴- خطوط هم دمای داخل حفره های مختلف در رایلی 10^3 و

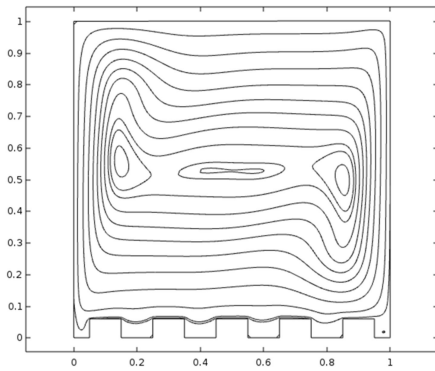
$$L = 1 \text{ mm} \text{ و } a = 0.15 \text{ mm}$$

شکل ۵- خطوط هم دمای داخل حفره های مختلف در رایلی 10^6 و

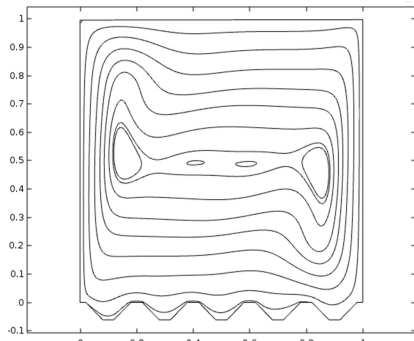
$$L = 1 \text{ mm} \text{ و } a = 0.15 \text{ mm}$$

به منظور بررسی تاثیر افزایش نسبت های a و L بر خطوط جریان، شکل های ۶ و ۷ در عدد رایلی 10^6 در حفره های مختلف و به ترتیب برای $a = 0.225 \text{ mm}$ ، $a = 0.15 \text{ mm}$ و $L = 1/5 \text{ mm}$ و $L = 2/1 \text{ mm}$ ترسیم گردید. آشکار است که با افزایش نسبت دامنه بلوک ها و دامنه تناوب آنها، خطوط جریان تحت تاثیر شکل حفره می شود.

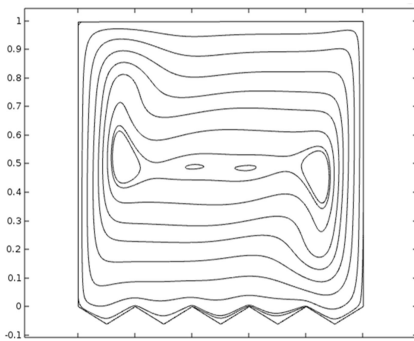




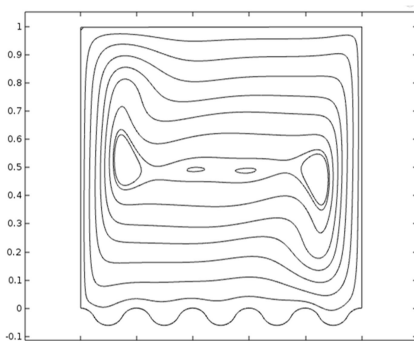
مستطیلی



دوزنقه ای



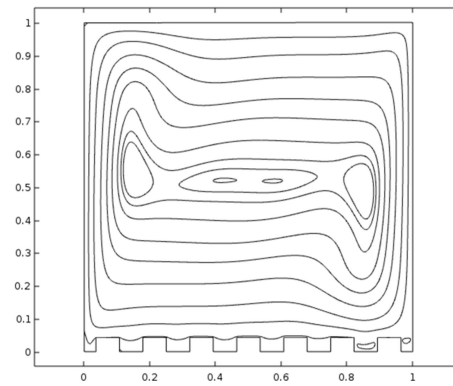
مثلثی



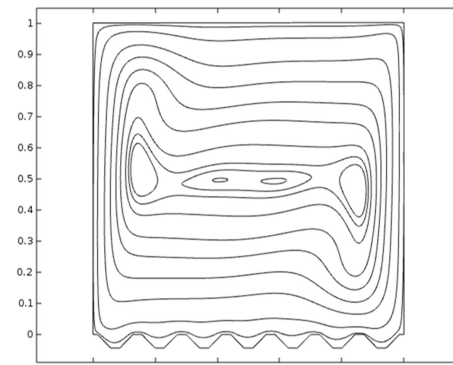
سینوسی

شکل ۷- خطوط جریان داخل حفره های مختلف در رایلی 10^6 و mm $L = 2/1$ و $a = 0/315$

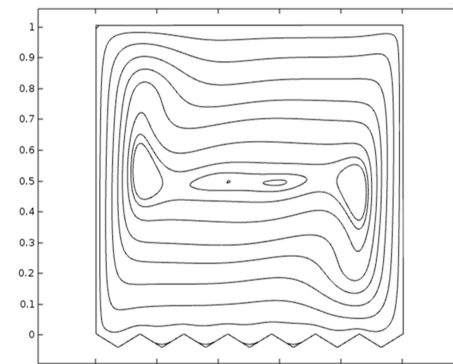
خطوط هم دمای مرتبط با افزایش نسبت های a و L نیز در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. مطابق این شکل ها نیز افزایش



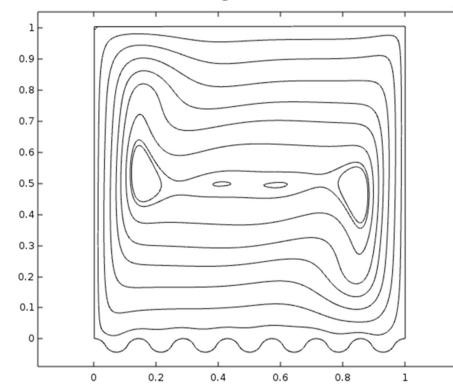
مستطیلی



دوزنقه ای



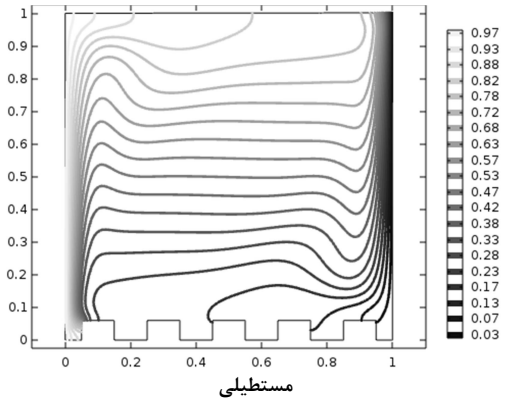
مثلثی



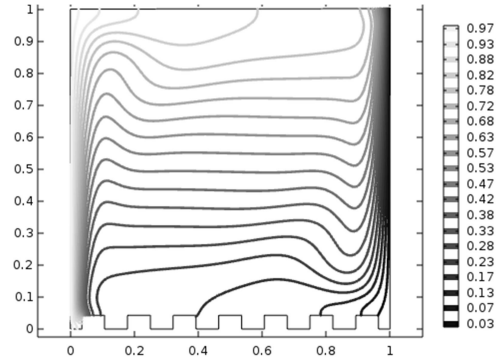
سینوسی

شکل ۶- خطوط جریان داخل حفره های مختلف در رایلی 10^6 و mm $L = 1/5$ و $a = 0/225$

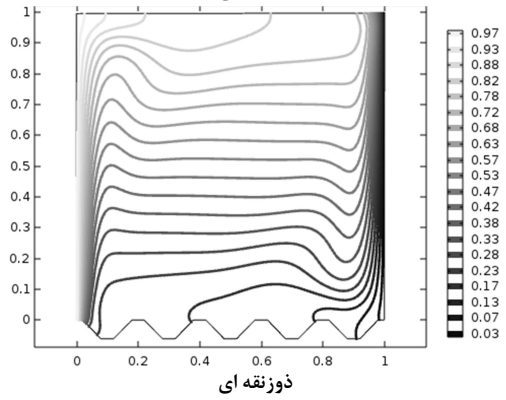
نسبت های ذکر شده بر خطوط هم دما تاثیر گذاشته و اندکی دچار تغییر می دهد.



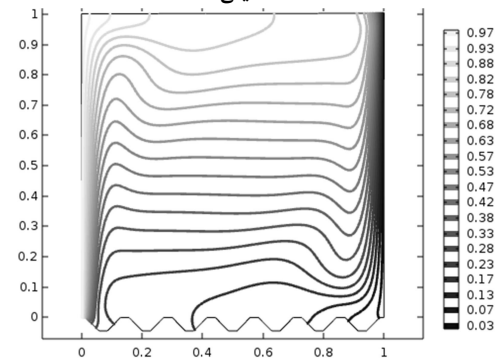
مستطیلی



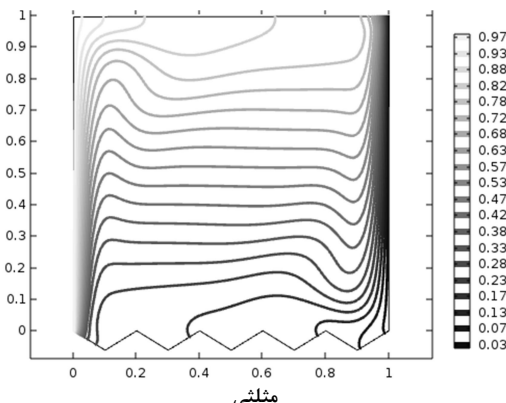
مستطیلی



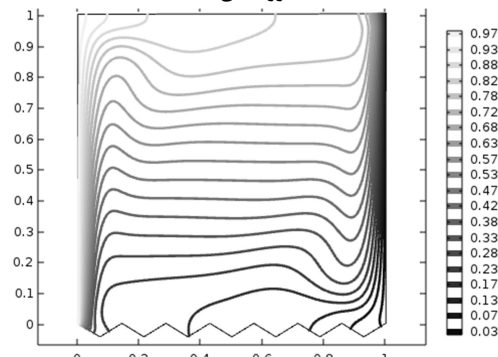
دوزنقه ای



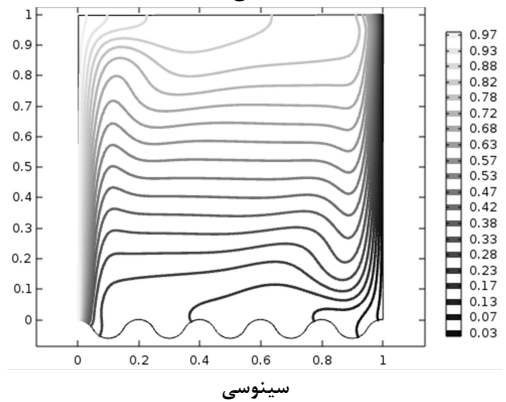
دوزنقه ای



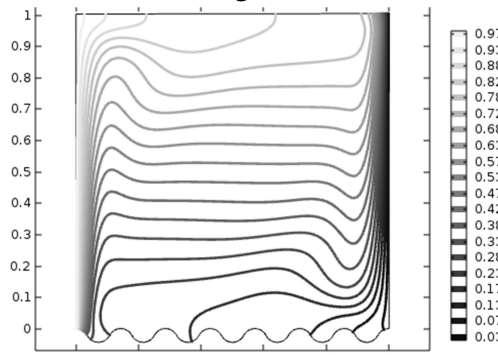
مثلثی



مثلثی



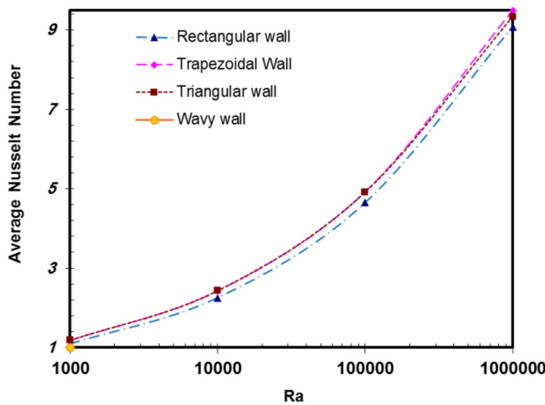
سینوسی



سینوسی

شکل ۹- خطوط هم دمای داخل حفره های مختلف در رایلی 10^6 و $L = 2/1 \text{ mm}$ و $a = 0/315 \text{ mm}$

شکل ۸- خطوط هم دمای داخل حفره های مختلف در رایلی 10^6 و $L = 1/5 \text{ mm}$ و $a = 0/225 \text{ mm}$



شکل ۱۲- عدد ناسلت متوسط برای حفره های مختلف بر حسب عدد رایلی به ازای $a=0.315 \text{ mm}$ و $L=2/1 \text{ mm}$

قابل ذکر است که بیشترین افزایش در آهنگ انتقال گرمای حفره سینوسی به مستطیلی برابر ۵/۴۴٪ در عدد رایلی 10^3 و ۸/۶۴٪ در عدد رایلی 10^4 به ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ به دست آمد.

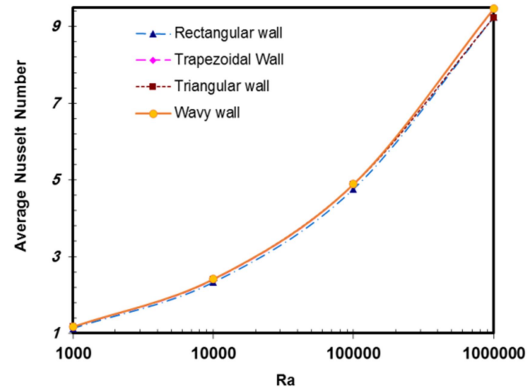
۴- نتیجه گیری

در این مقاله، الگوی جریان و انتقال گرمای درون حفره با دیواره پایینی مختلف مستطیلی، ذورنقه ای، مثلثی و سینوسی شکل با استفاده از روش المان محدود در نرم افزار کمول برسی گردید و تاثیر پارامترهای عدد رایلی، نسبت های دامنه بلوک ها و دامنه تناوب آنها مورد مطالعه قرار گرفت. خطوط جریان و دما در حالت های مختلف و به ازای اعداد رایلی متعدد برسی گردید. بیشترین افزایش در آهنگ انتقال گرمای در حالت حفره سینوسی شکل و کمترین حالت برای حفره مستطیلی گزارش شد. افزایش مقادیر دامنه بلوک ها و دامنه تناوب آنها ابتدا باعث افزایش شده ولی افزایش بیشتر این مقادیر منجر به کاهش آهنگ انتقال گرمای گردید.

۵- مراجع

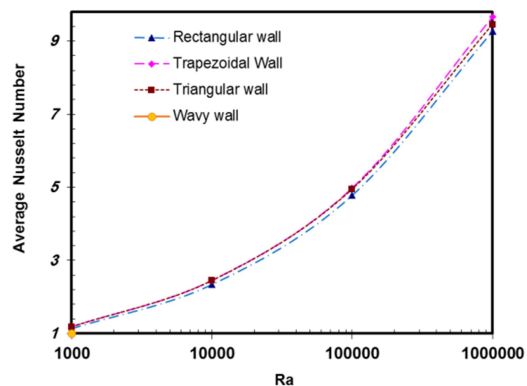
- [1] de Vahl Davis, G., Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution, International Journal of Numerical Methods of Fluids, 3, pp.249-264. 1983.
- [2] Gebhart B., Jaluria Y., Mahajan R. L., Sammakia B., Buoyancy induced flows and transport. Hemisphere, 1988.
- [3] Ostrach S., Natural Convection in Enclosures, ASME J Heat Trans, 110, pp. 1175-1190. 1988.
- [4] Bhavnani S., Bergles A., Natural convection heat transfer from sinusoidal wavy surfaces, Wrmе-und Stoffübertragung, 26, pp. 341-349, 1991.
- [5] 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.
- [6] Bejan A., Convection Heat Transfer. Second ed, Wiley & Sons, 1995.
- [7] 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.

به منظور بررسی میزان انتقال گرما، عدد ناسلت متوسط در دیواره سمت چپ حفره محاسبه گردید. در شکل ۱۰ نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد رایلی در حفره های مختلف به ازای $a=0.15 \text{ mm}$ و $L=1 \text{ mm}$ ترسیم گردیده است.



شکل ۱۰- عدد ناسلت متوسط برای حفره های مختلف بر حسب عدد رایلی به ازای $a=0.15 \text{ mm}$ و $L=1 \text{ mm}$

مطابق این شکل، در تمامی حالت ها با افزایش عدد رایلی میزان آهنگ انتقال گرمای افزایش می یابد. حفره با دیواره سینوسی شکل بیشترین تاثیر در آهنگ انتقال گرمای را نسبت به سایر دیواره ها دارد. بدترین حالت نیز مربوط به حفره مستطیلی می باشد. بیشترین افزایش در آهنگ انتقال گرمای حفره سینوسی به مستطیلی برابر ۳/۷۲٪ در عدد رایلی 10^3 می باشد. در شکل های ۱۱ و ۱۲ تاثیر افزایش مقادیر a و L بر تغییرات عدد ناسلت متوسط نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۱، آشکار است که با افزایش نسبت های ذکر شده، میزان آهنگ انتقال گرمای افزایش یافته اما در شکل ۱۲ آهنگ انتقال گرمای نسبت به شکل ۱۱ کاهش می یابد. لذا می توان یک مقدار بهینه ای را در نظر گرفت که پس از آن افزایش بیشتر نسبت های دامنه بلوک ها و دامنه تناوب آنها باعث کاهش آهنگ انتقال گرمای می شود.



شکل ۱۱- عدد ناسلت متوسط برای حفره های مختلف بر حسب عدد رایلی به ازای $a=0.225 \text{ mm}$ و $L=1/5 \text{ mm}$

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Heidari H., Mohebbi R., Safarzade A., Parameter estimation in fractional convection-diffusion equation, *PONTE International Scientific Research Journal* 72 (2), 2016.
- [13] Rathish Kumar B. and Shalini., Free convection in a non-Darcian wavy porous Enclosure, *Int J Eng Sci*, Vol. 41, pp. 1827-1848, 2003.
- [14] Huang PC and Yang CF and Hwang J.J. and Chiu M.T., Enhancement of forced-convection cooling of multiple heated blocks in a channel using porous covers, *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 647-664, 2005.
- [15] Varol Y. and Oztop H. and Varol A., Natural convection in porous triangular enclosures with a solid adiabatic fin attached to the horizontal wall, *Int Commun Heat Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 19-27, 2007.
- [16] Aounallah M. and Addad Y., Benhamadouche S., Imine O., Adjlout L. and Laurence D., Numerical investigation of turbulent natural convection in an inclined square cavity with a hot wavy wall, *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 1683-1693, 2007.
- [17] Khanafer K. Al-Azmi B., Marafie, A. and Pop, I., Non-Darcian effects on natural convection heat transfer in a wavy porous enclosure, *Int J Heat Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 1887-1896, 2009.
- [18] Heidary H. and Kermani M., Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel, *Int Commun Heat Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1520-1527, 2010.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Navaeia A.S., Mohammedb H.A., Munisamya K.M., Yarmandc 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.
- [22] 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.
- [23] 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 Heat and Mass Transfer*, Vol. 107, . pp1110-1118, 2017.