

مقایسه همرفت دوپخشی ترکیبی در کاواک‌های مربعی با یک و دو دیواره‌ی متحرک

امید غفارپاسند^{۱*}، محسن محبی نژاد^۲

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در این پژوهش، پدیده‌ی همرفت دوپخشی ترکیبی ناپایا در کاواک‌های مربعی با یک و دو دیواره‌ی متحرک با کمک الگوریتم عددی سیمپل مطالعه و با هم مقایسه شدند. دماها و غلظت‌های جرمی یکنواخت اما متفاوت روی دیواره‌های افقی کاواک‌های یاد شده فرض شدند. شاره مورد نظر (هوا) تراکم‌ناپذیر و نیوتنی فرض شد. در گام اول روش عددی مورد استفاده با کمک نتایج عددی پژوهش‌های پیشین اعتبارآزمایی گردید. سپس شبیه‌سازی‌ها برای بازه‌ای تقریباً گسترده از عدد ریچاردسون اجرا شد تا مطالعه همه رژیم‌های همرفت ممکن باشد. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد انتقال گرما و جرم همرفتی با افزایش عدد ریچاردسون کاهش می‌یابد. همچنین مُد رسانشی انتقال گرما در سراسر کاواک با افزایش عدد ریچاردسون زیاد می‌شود به طوری که هردو کاواک در رژیم همرفت آزاد در حالتی شبه‌رسانشی قرار دارند. علاوه بر این مشاهده شد حرکت هم‌زمان اما در سوی مخالف دیواره‌ها سبب افزایش سهم نیروهای مکانیکی در کاواک‌های با دو دیواره‌ی متحرک و در پی آن افزایش گرمای همرفتی منتقل شده در ایشان نسبت به کاواک‌های با یک دیواره‌ی متحرک می‌شود. با مطالعه نمایه سرعت‌ها نیز معلوم شد که افزایش عدد ریچاردسون سبب افت شتاب‌گیری شاره به ویژه در نزدیکی دیواره‌ی افقی پایینی می‌گردد. مطالعه آنتروپی و انرژی هردو سامانه نشان داد که هردو ایشان با زیاد شدن عدد ریچاردسون کم می‌شوند و شاره در کاواک‌های با دو دیواره‌ی متحرک آنتروپی و انرژی بیشتری دارد.

PACS No. 40, 44, 89

کلیدواژه. همرفت دوپخشی، پخش، رسانش، انتقال گرما و جرم، آنتروپی.

The comparison of double-diffusive mixed convection in square driven cavities with one and two moving lids

Omid Ghaffarpassand^{1*}, Mohsen Mohebinejad²

¹ Department of Physics, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Faculty of New Science and Technology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

In this study, the unsteady double-diffusive mixed convection in the one and two-sided lid-driven cavities are studied and compared together using numerical SIMPLE algorithm. Uniform but different temperatures and mass concentrations are assumed at horizontal walls. The used fluid (pure air) was assumed incompressible and Newtonian. The used numerical method is firstly validated against previously published numerical results. Then, the numerical simulations were carried out for almost a wide range of Richardson number, whereby the study of various convection regimes would be possible. Results show that the convection heat and mass transfer are reduced with increasing Richardson number. The conductive mode of heat transfer is enhanced by increasing Ri value, so cavities are quasi-conductive domains when fluid flow was dominated by free convection. It was also observed that the heat and mass are better transferred in two-sided lid-driven cavities with respect to the other ones which was due to the extra mechanical forces imposed by the two-sided lids movement. The velocity profile variations demonstrate that the flow is decelerated with increasing Richardson number especially near the bottom horizontal wall. It has also been found that both of entropy generation and total kinetic energy reduce as either Richardson number enhances or two-sided lids movement reduces to one-sided lid movement.

Keywords: Double-diffusive convection, Diffusion, Conduction, Heat and mass transfer, Entropy.

* نویسنده مرجع. کدپستی: ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶ پست الکترونیکی: o.ghaffarpassand@gmail.com

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین روش‌های انتقال گرما همرفت است که معمولاً در سه رژیم گوناگون انجام می‌شود. این رژیم‌ها عبارتند از: (الف) رژیم همرفت آزاد^۱: رژیم انتقال گرما تنها به دلیل گرادیان گرمایی موجود در محیط را رژیم همرفت آزاد می‌خوانند. (ب) رژیم همرفت واداشته^۲: رژیم انتقال گرما به دلیل وجود نیروهای خارجی هم‌چون نیروهای وشکسانی را رژیم همرفت واداشته می‌نامند. (پ) رژیم همرفت آمیخته^۳: به انتقال گرما در حالت میانی دو حالت قبل رژیم همرفت ترکیبی می‌گویند. رژیم انتقال گرمای همرفتی با کمک عدد ریچاردسون^۴ (Ri) تعیین می‌گردد. این عدد عبارتست از:

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (1)$$

عدد گرافش^۵ Gr نشان دهنده اندازه‌ی نیروهای شناوری نسبت به نیروهای چسبندگی شماره و عدد رینولدز^۶ Re نشان‌دهنده اندازه‌ی نیروهای لختی نسبت به نیروهای چسبندگی شماره است. آلامیری^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که گرما در شماره در رژیم‌های همرفت آزاد، همرفت واداشته و همرفت ترکیبی منتقل می‌شود هرگاه به ترتیب $Ri \gg 1$ ، $Ri \approx 1$ و $Ri \ll 1$ باشد [۱]. جرم نیز می‌تواند به روش همرفت منتقل شود. انتقال همرفتی جرم در سامانه‌ی شارشی بر همرفت گرمایی تاثیرگذار است به طوری که حتی گرادیان جرم احتمالی موجود در سامانه‌ی شارشی می‌تواند روند انتقال گرما به روش همرفت را متحول سازد. به انتقال همرفتی هم‌زمان گرما و جرم همرفت دوپخشی^۸ می‌گویند [۲]. همرفت دوپخشی همانند همرفت معمولی در رژیم‌های گوناگونی گرما و جرم را منتقل می‌کند.

پدیده دو پخشی کاربردهای گسترده و متنوعی در علوم و مهندسی دارد که از آن جمله می‌توان به سردسازی سامانه‌های الکترونیکی [۳]، طراحی و نگهداری رآکتورهای هسته‌ای [۴]، لایه‌نشانی [۵]، رشد بلور [۶] و طراحی سلول‌های خورشیدی [۷] اشاره کرد. در این پدیده دو عدد گرافش جداگانه برای جرم و گرما در نظر گرفته و نسبت میان این دو عدد "نسبت شناوری"^۹ خوانده می‌شود. همچنین نیروهای شناوری نیز به دو دسته نیروهای ناشی از گرادیان گرما و نیروهای ناشی از گرادیان جرم تقسیم می‌شوند.

روش‌های عددی از بهترین شیوه‌های مطالعه و بررسی این پدیده هستند. این روش‌ها نتایج اعتبارآزموده‌ای نسبت به روش‌های آزمایشگاهی به دست می‌دهند. این پدیده معمولاً به دلیل پیچیدگی معادلات حاکم بر آن در هندسه‌های شارشی ساده بررسی می‌شود. یکی از بهترین هندسه‌هایی که می‌توان برای مطالعه عددی پدیده‌ی همرفت دوپخشی از آن استفاده کرد کاواک مربعی دو بعدی یا دیواره‌های متحرک است. این هندسه امکان مطالعه همه‌ی نیروهای مهم موجود هم‌چون نیروهای شناوری یا نیروهای

¹ Free convection

² Forced convection

³ Mixed convection

⁴ Richardson number

⁵ Grashof number

⁶ Reynolds number

⁷ Al-Amiri

⁸ Double-diffusive convection

⁹ Buoyancy ratio

مکانیکی را فراهم می‌آورد. کاواک‌های مربعی از مهم‌ترین هندسه‌های مورد استفاده در دینامیک شاره‌های محاسباتی هستند که به‌عنوان محلی مناسب برای مطالعه پدیده‌های فیزیکی موجود در دینامیک شاره‌ها به‌کار می‌روند. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد همرفت و همرفت دوپخشی در کاواک‌های معمولی یا هندسه‌های دیگر منتشر شده است.

در این میان ایواتسو^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۳ همرفت را در یک کاواک سه بعدی با گرادیان ثابت دمایی در دیواره‌های عمودی بررسی کردند [۸]. آن‌ها دریافتند که در اعداد ریچاردسون کوچک، افزایش عدد رینولدز انتقال گرمای همرفتی را افزایش می‌دهد. اوزتوپ^۲ و داگتکین^۳ در سال ۲۰۰۴ نشان دادند که با افزایش نیروهای مکانیکی موجود در کاواک با دیواره‌های متحرک، گرمای همرفتی بیشتری منتقل می‌شود [۹]. پژوهش آن‌ها نشان داد که افزایش عدد ریچاردسون، آهنگ کلی انتقال گرما را کاهش می‌دهد. آلامیری و همکاران در سال ۲۰۰۷ با کمک شبیه‌سازی‌های عددی، همرفت دوپخشی را در کاواک مربعی با یک دیواره متحرک (سرپوش) بررسی کردند [۱]. آن‌ها دریافتند که در همرفت واداشته ($Ri = 0.01$) نسبت شناوری با میزان انتقال گرما ارتباط مستقیم دارد به‌طوری‌که افزایش آن سبب افزایش میزان گرمای همرفتی منتقل شده می‌شود. آن‌ها همچنین پیشنهاد دادند که شبیه‌سازی‌های عددی برای دامنه‌ی گسترده‌تری از اعداد ریچاردسون صورت پذیرد. مایتی^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۸ همرفت دوپخشی در کاواک مربعی با سرپوش متحرک را با کمک شبیه‌سازی‌های عددی بررسی کردند [۱۰]. پژوهش آن‌ها نشان داد که در حالت پایا با افزایش عدد رینولدز آهنگ انتقال همرفتی گرما و جرم افزایش می‌یابد. قاسمی و امین‌الساداتی در سال ۲۰۰۸ انتقال گرمای همرفتی را در کاواک مربعی دو بعدی به‌صورت عددی مطالعه کردند [۱۱]. آن‌ها نشان دادند که در اعداد ریچاردسون پایین، میانگین آهنگ انتقال گرما در شرایطی که دیواره‌ها به‌صورت نوسانی حرکت کنند نسبت به حالتی که ساکن باشند کاهش می‌یابد. شی^۵ و وفایی در سال ۲۰۱۰ رژیم همرفت ترکیبی را در یک کاواک مستطیلی با دیواره‌های افقی گرم شده بررسی کردند [۱۲]. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نسبت طول به عرض مستطیل، میزان گرمای همرفتی منتقل شده کاهش می‌یابد.

رحمان و همکاران در سال ۲۰۱۲ پدیده‌ی همرفت دوپخشی ترکیبی را در یک جمع‌کننده خورشیدی مثلثی با روش‌های عددی بررسی کردند [۱۳]. آن‌ها در مورد تاثیر عدد رایلی^۶ و نرخ شناوری بر عملکرد جمع‌کننده‌های یاد شده بحث کردند. قاچم^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۲ تاثیر نرخ شناوری را بر الگوی شارش و انتقال گرما به‌صورت دقیق مطالعه کردند [۱۴]. خوارز^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۳ فرایند انتقال گرما و جرم را در پدیده‌ی همرفت دوپخشی در یک کاواک مربعی با شیوه‌های عددی مطالعه کردند [۱۵]. ایشان دریافتند انتقال گرما و جرم به میزان چشم‌گیری توسط متغیرهای همرفت دوپخشی متاثر می‌شود. تاثیر عدد لوویس^۹ بر همرفت دوپخشی ناپایا توسط ساها^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۴ مطالعه شد [۱۶]. نتایج ایشان نشان داد تغییر عدد

¹ Iwatsu

² Oztop

³ Dagtekin

⁴ Maiti

⁵ Shi

⁶ Rayleigh

⁷ Ghachem

⁸ Juarez

⁹ Lewis number

لوویس به میزان چشم‌گیری خطوط هم‌دما و هم‌غلظت را تغییر می‌دهد. چن^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۵ آنتروپی را در پدیده‌ی همرفت دوپخشی بررسی کردند [۱۷]. ایشان دریافتند نرخ شناوری تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان آنتروپی پدیده‌ی همرفت دوپخشی دارد. اُدین^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ پدیده همرفت دوپخشی را در یک کاواک ذوزنقه‌ای در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی بررسی کردند [۱۸]. آن‌ها مشاهده کردند که میدان مغناطیسی خارجی تاثیر زیادی بر میزان انتقال جرم و گرما دارد. قلی زاده و همکاران نیز در سال ۲۰۱۶ به بررسی پدیده‌ی یاد شده در کاواک ذوزنقه‌ای پرداختند [۱۹]. نتایج عددی ایشان نشان داد که میزان انرژی منتقل شده با عدد گراشف زیاد می‌شود. قاجم^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۶ پدیده‌ی همرفت دوپخشی را در یک کاواک سه بعدی شبیه‌سازی کردند [۲۰]. نتایج ایشان نشان دهنده تاثیر نرخ شناوری بر انتقال گرما و جرم بود.

بیشتر پژوهش‌های عددی و تحلیلی انجام شده در این زمینه در کاواک‌هایی با دیواره‌های ثابت صورت گرفته‌اند و از تاثیر نیروهای وشکسانی حاصل از حرکت دیواره (ها) چشم‌پوشی شده است. همچنین اغلب این پژوهش‌ها، بررسی‌های خود را در حالت پایا انجام داده‌اند (مستقل از زمان) و از تاثیر تحول زمانی در طول محاسبات صرف‌نظر کرده‌اند. تاکنون هیچ پژوهشی که همرفت دوپخشی را در کاواک‌هایی با یک و دو دیواره‌ی متحرک با هم مقایسه کند نیز منتشر نشده است. دیگر مواردی که تاکنون در کاواک‌هایی با یک و دو دیواره‌ی متحرک مقایسه نشده‌اند انرژی جنبشی کل و آنتروپی تولید شده در سامانه هستند. از سوی دیگر و با توجه به بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان، تاکنون هیچ پژوهش مناسبی در زمینه‌ی همرفت دوپخشی و حتی همرفت معمولی به زبان فارسی منتشر نشده است. از این‌رو هدف اصلی این پژوهش مطالعه و مقایسه انتقال گرما و جرم به روش همرفت وابسته به زمان یا همان همرفت دوپخشی ناپایا در کاواک‌هایی با یک و دو دیواره‌ی متحرک است. آنتروپی تولید شده و انرژی جنبشی کل سامانه‌ها نیز مقایسه و بررسی خواهند شد. همچنین سعی خواهد شد تا حد ممکن در مورد پدیده‌های فیزیکی موجود بحث شود.

۲- مدل‌سازی و معادلات حاکم بر مسئله

هندسه‌ی شارش و دستگاه مختصات مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است. این هندسه یک کاواک مربعی است که دیواره‌های بالا و پایین آن می‌توانند به سوی راست یا چپ با سرعت یکنواخت U_0 حرکت کنند. شاره‌ی موجود در کاواک نیوتنی و تراکم ناپذیر بوده و از همه اتلاف‌های انرژی ممکن همچون اتلاف ناشی از لزجت چشم‌پوشی می‌شود. همچنین رژیم حرکت شاره در این کاواک آرام است. در این کاواک که از هوا پر شده است ($Pr = 0.71$) دیواره‌های افقی بالا و پایین در دما و غلظت جرمی ثابت نگاه داشته شده‌اند به طوری که دما و غلظت ذرات در صفحه‌های بالا و پایین به ترتیب T_l, T_h, C_l و C_h هستند که، زیرنگاشت ۱ نشان دهنده واژه «کم» و زیرنگاشت h نشان دهنده واژه «زیاد» است. دیگر دیواره‌ها، صفحاتی نفوذناپذیر و عایق گرما و جرم فرض شده‌اند. همچنین فرض شده است همه ویژگی‌های شاره به‌جز چگالی در عبارت مربوط به نیروی شناوری

¹ Saha

² Chen

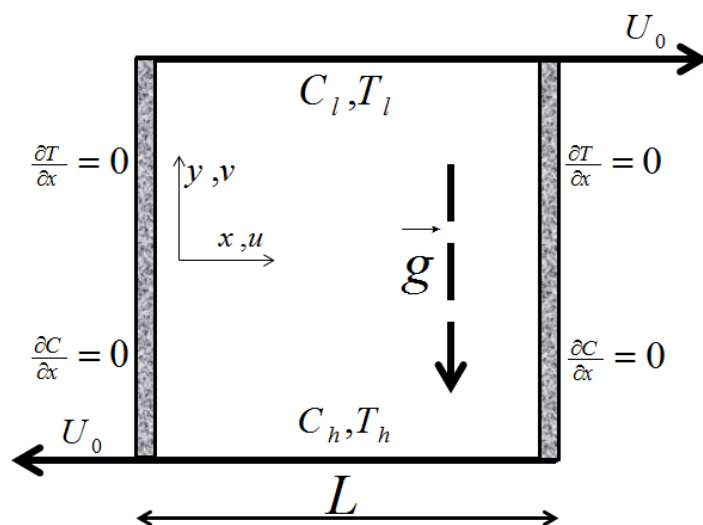
³ Uddin

⁴ Ghachem

⁵ Low

⁶ High

نسبت به تغییرات گرما و جرم ثابت هستند. این تقریب، تقریب بوسینسک¹ نامیده می‌شود و چگالی در این تقریب به شکل زیر تعریف می‌گردد [۱]:



شکل ۱. نمای هندسه شبیه‌سازی شده به همراه دستگاه مختصات.

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta_T (T - T_0) - \beta_C (C - C_0)) \quad (۲)$$

β_T ضریب انبساط گرمایی و β_C ضریب انبساط جرمی است به طوری که:

$$\beta_C = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{(T,p)} \text{ و } \beta_T = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial C} \right)_{(C,p)} \quad (۳)$$

گرادیان هم‌زمان جرمی و گرمایی در نظر گرفته شده در کاواک یادشده سبب پدید آمدن پدیده‌ی همرفت دوپخش می‌شود. معادلات اصلی حاکم بر همرفت دوپخش، معادله پیوستگی، معادلات ناویر-استوکس، و معادلات جرم و انرژی هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۴)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\rho}{\rho_0} g \quad (۵)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (۶)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_m \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۷)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D_m \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (۸)$$

در معادلات بالا ν ، g ، α_m و D_m ، به ترتیب گرانشی، شتاب گرانشی، ضریب پخش گرمایی و ضریب پخش جرمی هستند. معادلات بالا با اعمال متغیرهای بدون بعد زیر، بی‌بعد می‌شوند:

¹ Boussinesq approximation

$$(Y, X) = \frac{(y, x)}{L}, (U, V) = \frac{u, v}{U_0}, P = \frac{p}{p_0}, \tau = \frac{t}{t_0} \quad (9)$$

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_h - T_l}, \Phi = \frac{C - C_0}{C_h - C_l} \quad (10)$$

که در این معادلات، $t_0 = \frac{L}{U_0}$ شاخصه زمانی، $p_0 = \rho U_0^2$ شاخصه فشار، T_0 دمای مشخصه و C_0 غلظت جرمی مشخصه است. براساس پژوهش بارلتا^۱ و زانچینی^۲ [۲۱] دما و غلظت جرمی مشخصه به شکل زیر فرض می شوند:

$$C_0 = (C_h + C_l)/2 \text{ و } T_0 = (T_h + T_l)/2 \quad (11)$$

معادلات بی بعدسازی شده با کمک معادلات (۹) و (۱۰) به شکل زیراند:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{Gr}{Re^2} (\theta + B\Phi) \quad (13)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \psi \quad (14)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{PrRe} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \psi \quad (15)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Phi}{\partial X} + V \frac{\partial \Phi}{\partial Y} = \frac{1}{ReSc} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} \right) \psi \quad (16)$$

ضریب شناوری **B** در معادله بالا به صورت زیر تعریف می شود:

$$B = \frac{\beta_C (C_h - C_l)}{\beta_T (T_h - T_l)} \quad (17)$$

در معادلات اصلی Sc و Pr به ترتیب اعداد اشمیت^۳ و پرنتل^۴ هستند. شرایط مرزی بی بعدسازی شده نیز به شکل زیر فرض می شوند:

$$X = 0, 1: U = V = 0, \frac{\partial \theta}{\partial X} = \frac{\partial \Phi}{\partial X} = 0 \quad (18)$$

$$Y = 1: U = +1, V = 0, \theta = 0, \Phi = 0 \psi \quad (19)$$

$$Y = 0: U = -1, V = 0, \theta = 1, \Phi = 1 \psi \quad (20) \text{ برای کاواک با دو دیواره متحرک}$$

$$Y = 0: U = 0, V = 0, \theta = 1, \Phi = 1 \quad (21) \text{ برای کاواک با یک دیواره متحرک}$$

انتقال گرما و جرم به صورت کمی به ترتیب با کمک اعداد نازل^۵ (Nu) و شروود^۶ (Sh) مطالعه می شوند. این اعداد به ترتیب به صورت نسبت میان گرما و جرم منتقل شده توسط پدیده همرفت به گرما و جرم منتقل شده توسط پدیده رسانش تعریف می شوند. نحوه محاسبه این اعداد در مرجع [۱۷] آمده است. این اعداد عبارتند از:

¹ Barletta
² Zanchini
³ Schmidt
⁴ Prandtl
⁵ Nusselt
⁶ Sherwood

$$\text{Nu}(X) = -\frac{\partial \theta}{\partial Y} |_{Y=0,1}, \text{Sh}(X) = -\frac{\partial \Phi}{\partial Y} |_{Y=0,1} \quad (22)$$

بنا به قرار داد میانگین اعداد نازل و شروود روی دیواره‌هایی با بیشینه دما و غلظت، اندازه‌ای کمی از انتقال گرما و جرم همرفتی هستند [۱]. میانگین این اعداد روی دیواره‌های مورد نظر به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$\bar{\text{Nu}} = \int_0^1 \text{Nu}(X) dX, \bar{\text{Sh}} = \int_0^1 \text{Sh}(X) dX \quad (23)$$

در این پژوهش آنتروپی تولید شده در سامانه مورد مطالعه نیز حساب خواهد شد. آنتروپی تولید شده در پدیده‌ی همرفت دوپخشی از رابطه بی بعدسازی شده زیر که در مرجع [۲۲] به تفصیل بررسی شده است به دست می‌آید:

$$S = \chi_I \left[2 \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y} + \frac{\partial U}{\partial X} \right) \right] + \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right] + \left\{ \chi_{II} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right)^2 \right] + \chi_{III} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial X} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) \right] \right\} \quad (24)$$

همانند مرجع [۲۲] ثابت‌های χ_I ، χ_{II} و χ_{III} به ترتیب ۰،۰۱، ۰،۰۵ و ۰،۰۱ گرفته شد. در عبارت بالا اولین، دومین و سومین جمله سمت راست به ترتیب سهم اصطکاک شارشی^۱، انتقال گرما و انتقال جرم در برگشت‌ناپذیری شارشی^۲ سامانه یا همان آنتروپی تولید شده کل است. آنتروپی میانگین با انتگرال‌گیری رابطه فوق روی همه نقاط شبکه به شکل زیر گزارش شد.

$$\bar{S} = \iint_0^1 S dX dY \quad (25)$$

انرژی جنبشی کل نیز در این پژوهش برای دوکاواک مورد مطالعه محاسبه و گزارش شد. انرژی جنبشی کل با استفاده از رابطه‌ای که توسط چنگ [۲۳] پیشنهاد شده است محاسبه شد.

$$E = \sqrt{\sum_{i,j=1,1}^{n_x, n_y} [(U_{i,j}^2) + (V_{i,j}^2)]} \quad (26)$$

۳- روش عددی حل مسئله

در این پژوهش معادلات بی‌بعد حاکم بر مسئله (معادلات (۱۲)–(۱۶)) با اعمال شرایط مرزی در یک کاواک مربعی با یک و دو دیواره‌ی متحرک به صورت عددی حل شدند. در این راه معادلات ابتدا با کمک روش المان متناهی به شکل فضایی گسسته‌سازی گردیدند. سپس از روش کوئیک^۳ و دیفرانسیل مرکزی^۴ برای در نظر گرفتن جملات دوم طرف راست و طرف چپ استفاده شد. با کمک الگوریتم سیمپل^۵ جمله فشار در معادلات ناویر-استوکس منظور شد. این روش عددی به‌طور خلاصه الگوریتم سیمپل

¹ Fluid friction

² Fluid irreversibility

³ QUICK

⁴ Central difference

⁵ SIMPLE

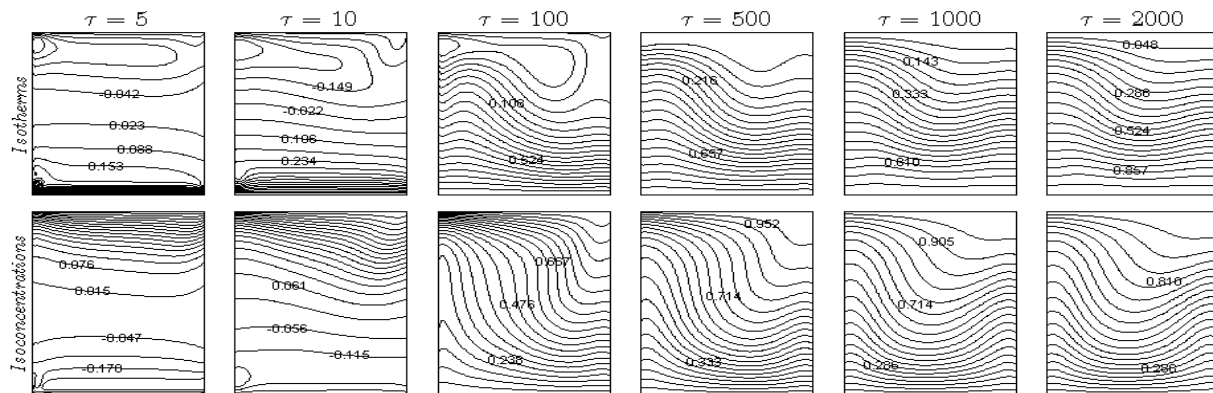
نامیده می‌شود که به تفصیل در مرجع [۲۴] تشریح شده است. همه معادلات با کمک یک روش کسر زمانی در زمان انتگرال‌گیری شدند. اعداد شروود و نازل میانگین نیز با روش انتگرال‌گیری سیمپسون^۱ محاسبه شدند.

۳-۱- معیار هم‌گرایی

گام زمانی مورد استفاده در این پژوهش همانند شبیه‌سازی‌های عددی اوورتاتانی^۲ (۲۰۰۹) انتخاب شد ($\Delta\tau = 0.005$) [۲۵]. همچنین آزمون همگرایی روش عددی مورد استفاده در هرگام زمانی شبیه‌سازی اجرا شد به طوری که در هرگام معیار همگرایی زیر آزموده شد:

$$\sum_{ij} |\Pi_{ij}^n - \Pi_{ij}^{n-1}| \leq 10^{-6} \quad (25)$$

در این معیار متغیر عمومی Π به مجموعه‌ای از کمیت‌های U, V, θ یا Φ اشاره دارد و بالانگاشت n مربوط به شماره گام زمانی است. زیرنگاشت‌های (i, j) نیز مختصات فضایی گره‌های شبکه را نشان می‌دهد. گفتنی است نتایج شبیه‌سازی‌ها در حالت پایا گزارش شده‌اند. به منظور اطمینان از حصول شرایط پایا، تحول زمانی خطوط هم‌دما و هم‌غلظت در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج پس از ۴۰۰۰ گام زمانی و حصول شرایط پایا گزارش شدند. همان‌گونه که دیده می‌شود نتایج شبیه‌سازی پس از ۲۰۰۰ گام زمانی به حالت پایا میل می‌کنند.



شکل ۲. تحول زمانی خطوط هم‌دما و هم‌غلظت برای کاواک با یک دیواره متحرک هنگامی که $Ri = 10$.

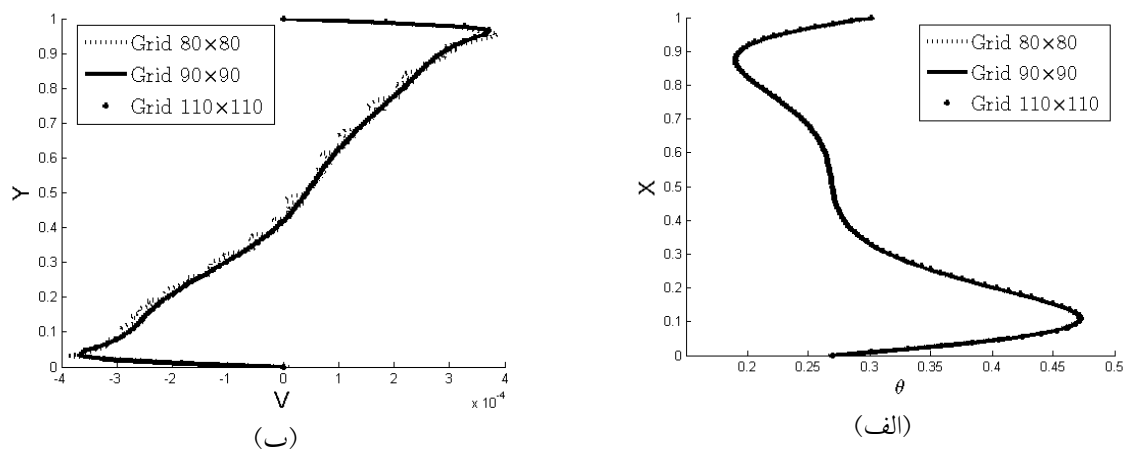
۳-۲- آزمون استقلال شبکه

آزمون استقلال شبکه برای حصول اطمینان از مناسب بودن تعداد گره‌های شبکه مورد استفاده نیز انجام شد. در این راه برای یک حالت ($Re = 100$ و $Gr = 100$) شبیه‌سازی‌های عددی در سه شبکه گوناگون (80×80 ، 90×90 و 110×110) انجام شدند که نتایج حاصله برای میانگین دما در صفحه افقی میانی و میانگین سرعت عمودی در صفحه عمودی میانی در شکل ۳ مقایسه شدند.

¹ Simpson's integration rule

² Ouertatani

اختلاف میان نتایج کمتر از ۰/۳٪ ارزیابی گردید. از این رو با توجه به زمان عملکرد بهینه پردازشگر^۱ از شبکه‌ی ۹۰×۹۰ در همه شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شد.



شکل ۳. مقایسه میانگین (الف) دما در صفحه افقی میانی کاواک و (ب) مولفه عمودی سرعت در صفحه عمودی کاواک برای سه شبکه گوناگون هنگامی که $Ri = 0.01$ است.

۳-۳- اعتبار‌آزمایی روش عددی مورد استفاده

روش عددی مورد استفاده در این پژوهش باید با کمک پژوهش‌های صورت گرفته پیشین اعتبار‌آزمایی گردد تا دقت و درستی نتایج به‌دست آمده قابل قبول باشند. از این رو روش عددی در دو مرحله اعتبار‌آزمایی گردید. در مرحله اول شبیه‌سازی عددی در یک کاواک مربعی که دیواره افقی بالایی آن با سرعت ثابت به سمت راست حرکت می‌کند و در حالتی که $Re = Gr = 100$ ، $Le = 10$ ، $Pr = 1$ اجرا شد. شرایط مرزی همان شرایط مرزی یاد شده در معادلات (۱۸) تا (۲۱) فرض شدند. خطوط جریان، خطوط هم‌دما^۲ و خطوط هم‌غلظت حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج به‌دست آمده توسط آلامیری و همکاران [۱] و تیماه^۳ و ال‌مقلانی^۴ [۲۶] در شکل ۴ مقایسه شده‌اند.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تشابه قابل قبولی میان نتایج وجود دارد. در مرحله دوم مقدار توابع جریان در صفحات میانی کاواک مربعی با سرپوش متحرک در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۴۰۰ محاسبه و در جدول ۱ با نتایج آلامیری و همکاران [۱] و اسکریبر^۵ و کلر^۶ [۲۷] مقایسه شدند. دوباره مشاهده می‌شود که انطباق قابل قبولی میان نتایج حاصل از این پژوهش و نتایج دیگران وجود دارد.

¹ CPU

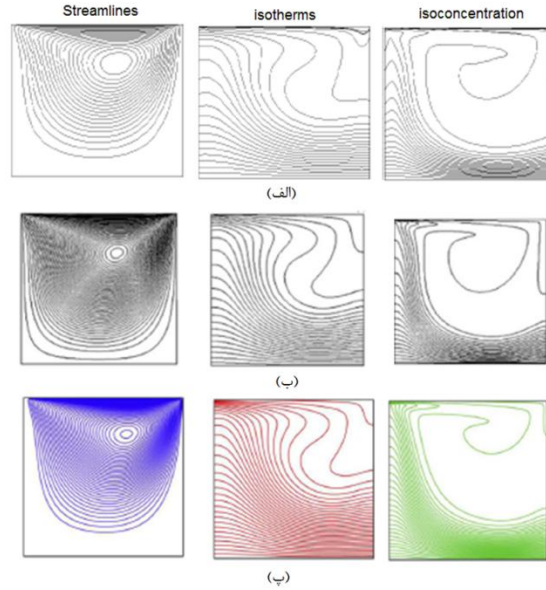
² isotherms

³ Teamah

⁴ El-Maghlany

⁵ Screiber

⁶ Keller



شکل ۴. خطوط جریان، هم‌دما و هم‌غلظت در حالت $Re = Gr = 100$ ، $Pr = 1$ و $Le = 10$ برای (الف) روش عددی مورد استفاده در این پژوهش، (ب) پژوهش تیماه و (پ) مقملانی [۲۶] و (پ) آلامیری و همکاران [۱].

جدول ۱: مقدار تابع جریان در مرکز کاواک مورد مطالعه، به دست آمده از روش مورد استفاده در این پژوهش و پژوهش‌های پیشین.

Re	نتایج استفاده از روش این پژوهش	الامیری و همکاران [۱]	اسکریر و کلر [۲۷]
۱۰۰	-۰/۱۰۳۱	-۰/۱۰۳۳	-۰/۱۰۳۳
۴۰۰	-۰/۱۱۳۲	-۰/۱۱۳۹	-۰/۱۱۳۸

۴- نتایج و بحث

به منظور مقایسه همرفت دوپخششی در کاواک‌های مربعی با یک و دو دیواره‌ی متحرک، شبیه‌سازی‌های عددی هنگامی که عدد گراشف ثابت ($Gr = 100$) و عدد رینولدز در بازه $3/16$ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند انجام شد. این تغییرات سبب شد تا همه رژیم‌های ممکن انتقال گرما و جرم به روش همرفت (واداشته، آمیخته و آزاد) در این پژوهش بررسی شوند به طوری که عدد ریچاردسون در بازه $0/01$ تا ۱۰ تغییر می‌کند. همچنین با فرض $B = 1$ و $Pr = Sc = 0.71$ پخش گرما و جرم مشابهی در سراسر کاواک برقرار است. خطوط جریان، خطوط هم‌دما و خطوط هم‌غلظت^۱ حاصل شده از شبیه‌سازی‌های عددی در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۵ (الف) دیده می‌شود نیروهای مکانیکی برآمده از حرکت دیواره‌ی بالایی در حالت همرفت واداشته ($Ri = 0.01$)، اولاً سبب پدید آمدن یک جریان ساعت‌گرد بزرگ در کاواک می‌شوند و دوماً سبب به هم ریختگی خطوط هم‌دما و هم‌غلظت به ویژه در نزدیکی دیواره‌ی متحرک می‌گردند. هرگاه خطوط هم‌دما خطوطی خمیده باشند که سراسر کاواک را فراگرفته‌اند گرما بیشتر به شیوه همرفت منتقل می‌شود در حالی که هرگاه این خطوط، خطوطی موازی باشند گرما بیشتر به شیوه

^۱ Isoconcentration

رسانش منتقل می‌شود [۲۳]. همان‌گونه که در شکل ۵(الف) دیده می‌شود در کاواکی با یک دیواره‌ی (سرپوش) متحرک و در حالت همرفت واداشته گرما بیشتر با مُد همرفت منتقل می‌شود. علاوه بر این، خطوط هم‌دما در لایه‌های مرزی نزدیک دیوار به هم نزدیک‌تر می‌شوند. این حالت به‌واسطه‌ی افزایش سهم مُد رسانش نسبت به مُد همرفت ایجاد می‌شود که به‌واسطه‌ی آن یک گرادیان دمایی با شیب تند در نواحی دیواره‌ی داغ (دیواره‌ی پایین) تشکیل می‌گردد.

به‌نظر می‌رسد در این حالت نیروهای شناوری گرمایی در برابر نیروهای مکانیکی برآمده از حرکت دیواره‌ی متحرک قابل چشم‌پوشی هستند. نیروهای مکانیکی در این حالت سبب شکل‌گیری لایه‌های متمرکز هم‌دما و هم‌غلظت در نزدیکی دیواره پایینی می‌شوند در حالی‌که نیروهای شناوری تمایل به برهم‌زدن این لایه‌ها دارند. افزایش انتقال گرمای همرفتی در این مورد، افزایش آهنگ انتقال جرم را نیز در پی دارد به‌طوری‌که لایه‌های مرزی به هم چسبیده‌ای در نزدیکی دیوار با غلظت بیشینه نیز مشاهده می‌شوند. در حالت همرفت کمتر واداشته ($Re = 0.1$) نیز انتقال گرمای همرفتی بیشتر با مُد همرفت انجام می‌شود. در این حالت حرکت دیواره‌ی بالایی که باعث اعمال همرفت واداشته می‌شود سبب افزایش سهم انتقال گرما به روش همرفت و به دنبال آن خمیده‌تر شدن خطوط هم‌دما شده است. با این حال سهم انتقال گرمای همرفتی نسبت به حالت قبل کاهش یافته به‌طوری‌که از تراکم خطوط هم‌دما و هم‌غلظت در نزدیکی دیواره پایینی به‌دلیل کم شدن سهم مُد همرفت در انتقال گرما کاسته می‌شود. این موضوع در انتقال گرما و جرم در سراسر کاواک بسیار مهم است و در ادامه بیشتر در مورد آن بحث خواهد شد.

این تغییرات با افزایش عدد ریچاردسون همچنان ادامه دارد. در حالتی‌که رژیم همرفت غالب در سامانه همرفت آزاد است ($Re = 10$) یک جریان گردابی ثانویه نیز در گوشه‌ی پایینی کاواک در سمت چپ علاوه بر جریان گردابی مرکزی تشکیل می‌شود. تشکیل گرداب پادساعتگرد ثانویه به‌دلیل افزایش سهم نیروهای شناوری گرمایی در این حالت و تقابل‌شان با نیروهای مکانیکی حاصل از حرکت دیواره‌ی بالایی است. در این حالت انتقال گرما بیشتر با مُد رسانش انجام می‌شود و سراسر کاواک در یک حالت شبه‌رسانشی قرار می‌گیرد. خطوط تقریباً موازی هم‌دما و هم‌غلظت بی‌هیچ‌گونه به‌هم‌ریختگی از این موضوع حکایت می‌کنند. از سوی دیگر در خطوط جریان شکل ۵(الف) می‌توان دید که با افزایش عدد ریچاردسون هسته گرداب به‌وجود آمده به سوی چپ و در خلاف جهت حرکت دیواره بالایی متمایل می‌گردد. همچنین مقدار تابع جریان در گرداب مرکزی با افزایش عدد ریچاردسون کاهش می‌یابد. همه‌ی این مشاهدات نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت نیروهای شناوری بر علیه نیروهای مکانیکی برآمده از حرکت دیواره بالایی با زیاد شدن عدد ریچاردسون است.

در حالت دوم و زمانی‌که دو دیواره‌ی کاواک (دیواره‌های افقی) حرکت می‌کنند (شکل ۵(ب))، در میزان انتقال گرمای همرفتی با مُد همرفت تغییرات چشم‌گیری مشاهده می‌شود. به‌طور کلی یک جریان گردابی با محور چرخشی در سراسر کاواک و برای همه حالت‌ها مشاهده می‌گردد. در رژیم همرفت واداشته حرکت در دوسوی مخالف دیواره‌های بالا و پایینی شکل گرداب مرکزی را تعیین می‌کنند. از این‌رو گردابی متقارن که نیمه بالایی و پایین آن نشان‌دهنده جهت حرکت دیواره‌ها بود مشاهده می‌شود. با افزایش عدد ریچاردسون و به دنبال آن افزایش سهم نیروهای شناوری گرمایی، شکل گرداب مرکزی نیز تغییر می‌کند به‌طوری‌که جریان گردابی مرکزی شروع به چرخش به سمت محور مرکزی کاواک از یک سو و دوپاره شدن از سوی دیگر می‌کند. مقدار تابع جریان نیز همانند حالت قبل با افزایش عدد ریچاردسون کاهش می‌یابد. علاوه بر این به‌خوبی مشاهده می‌شود که لایه‌های مرزی

هم‌دما و هم‌غلظت که در حالت قبل تنها در نزدیکی دیواره‌ی پایینی تشکیل شده بودند هم‌اکنون در مجاورت هردو دیوار متحرک افقی نیز تشکیل شده‌اند. تراکم این لایه‌ها دوباره با افزایش عدد ریچاردسون کاهش یافته است. از سوی دیگر در حالت قبل خطوط موازی هم‌دما و هم‌غلظت نشان دادند که در رژیم همرفت آزاد، هم انتقال گرما و هم انتقال جرم با مُد رسانش انجام می‌شوند. این در حالی است که خمیدگی‌های قابل مشاهده‌ای به‌ویژه برای خطوط هم‌غلظت در حالت همرفت آزاد کاواک با دودیاره‌ی متحرک دیده می‌شود. این مشاهده نشان می‌دهد مد رسانش در کاواک با دو دیواره‌ی متحرک نسبت به کاواک با یک دیواره‌ی متحرک ضعیف‌تر است.

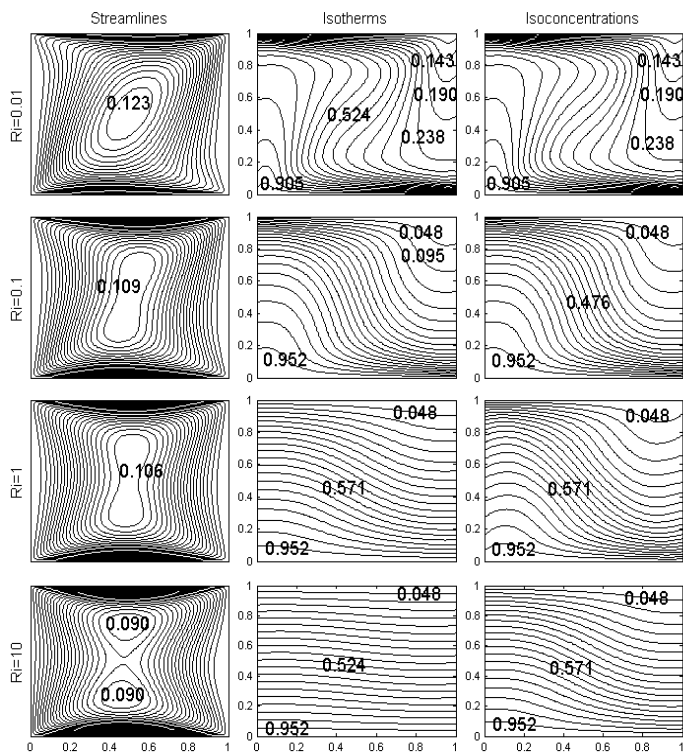
در ادامه برای مقایسه بهتر پدیده‌ی همرفت دوپخش‌ی تغییرات نمایه‌های سرعت نسبت به فاصله از دیوار برای دو حالت مورد نظر بررسی می‌شوند. تغییرات نمایه‌های سرعت افقی و عمودی برحسب فاصله از دیوار در شکل‌های ۶ (الف) تا (ت) نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌های ۶ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود، عدد ریچاردسون تأثیر چشم‌گیری بر نمایه‌ی مولفه‌های افقی سرعت ندارد و تنها به میزان بسیار کمی مولفه افقی سرعت با افزایش عدد ریچاردسون تغییر می‌کند. این در حالی است که نمایه‌های سرعت عمودی، شکل‌های ۶ (پ) و (ت)، به میزان چشم‌گیری با تغییر عدد ریچاردسون تغییر کرده‌اند. به‌نظر می‌رسد که با افزایش عدد ریچاردسون مولفه‌های عمودی سرعت در سراسر کاواک کاهش یافته‌اند. این واقعیت می‌تواند به‌دلیل کاهش تأثیر نیروهای مکانیکی ناشی از حرکت دیوار در اثر افزایش عدد ریچاردسون باشد که خود باعث افت شتاب‌گیری شاره شده است. اُفت شتاب‌گیری شاره در نزدیکی دیواره پایینی محسوس‌تر است.

دلیل دیگر این ادعا وجود انحراف مشخص نمایه سرعت در نزدیکی دیواره‌ی متحرک بالایی در حالت $Ri = 0.01$ به‌سمت راست است (شکل ۶(پ)) که با افزایش عدد ریچاردسون در حالت $Ri = 10$ به‌سمت چپ در نزدیکی دیواره داغ منحرف می‌گردد. این ناشی از افزایش نیروهای شناوری گرمایی در حالت همرفت آزاد نسبت به نیروهای مکانیکی به‌ویژه در نزدیکی دیواره داغ‌تر است. در کاواکی با دو دیواره‌ی متحرک داستان کمی متفاوت است. همان‌گونه که دیده می‌شود حرکت دو دیواره افقی سبب ایجاد انحراف معینی در شکل نمایه سرعت گردیده که با افزایش عدد ریچاردسون تقریباً خنثی شده است.

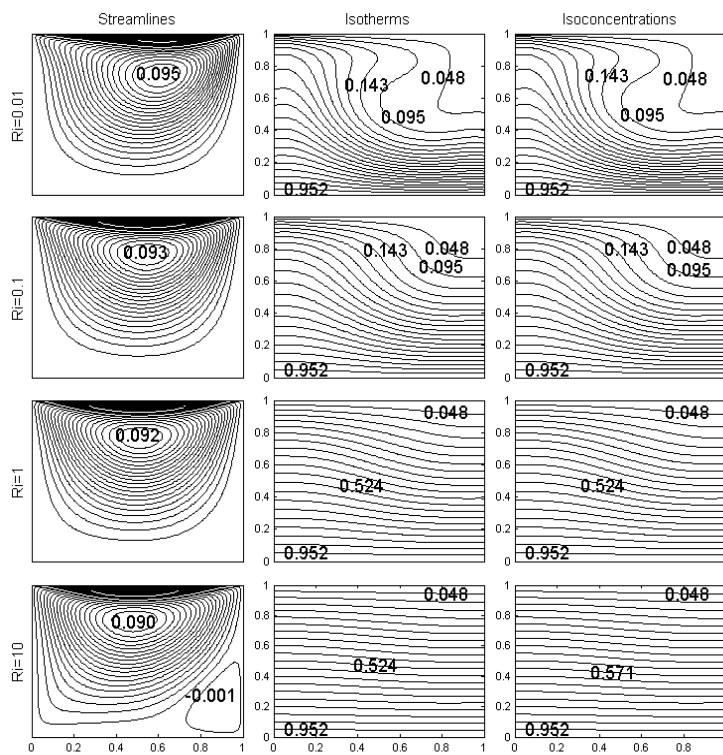
گرما در محیط‌های مادی معمولاً به دو شیوه همرفت و رسانش منتقل می‌شود. چنگ در سال ۲۰۱۱ با ارائه تعریف جدیدی از عدد نازل، میزان انتقال گرما به کمک این دو مُد را به‌شکل زیر تخمین زد [۲۳]:

$$Nu = \frac{\partial \theta}{\partial Y} - Pr \cdot Re \cdot V \cdot \theta \quad (26)$$

در این رابطه جمله اول نشان‌دهنده سهم مُد رسانش در انتقال گرما و جمله دوم نشان‌دهنده سهم مُد همرفت در انتقال گرما است. چنگ با محاسبه این عبارت در صفحه عمودی میانی کاواک اندازه‌ای از میزان هریک از مُدهای یاد شده در انتقال گرمای کل کاواک را تخمین زد. وی دریافت که در رژیم همرفت واداشته، مُد رسانش در میان کاواک با یک دیواره‌ی متحرک ناچیز بوده ($\frac{\partial \theta}{\partial Y} \rightarrow 0$) و در نزدیکی دیوار تغییر محسوسی را احساس می‌کند. انتقال گرما به شیوه‌ی همرفت در کاواک‌های مورد بررسی پیشتر بحث و بررسی شد. تغییرات مد رسانش بر اساس پژوهش چنگ [۲۳] در کاواک‌های مورد بررسی در این پژوهش در شکل ۷ مقایسه شده‌اند.

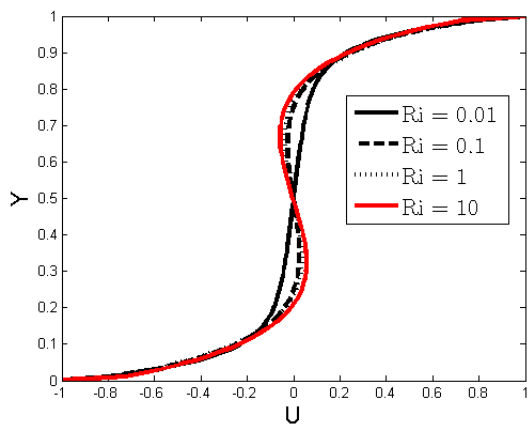


(ب)

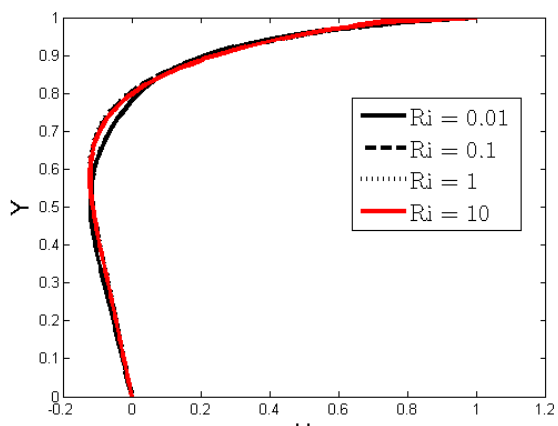


(الف)

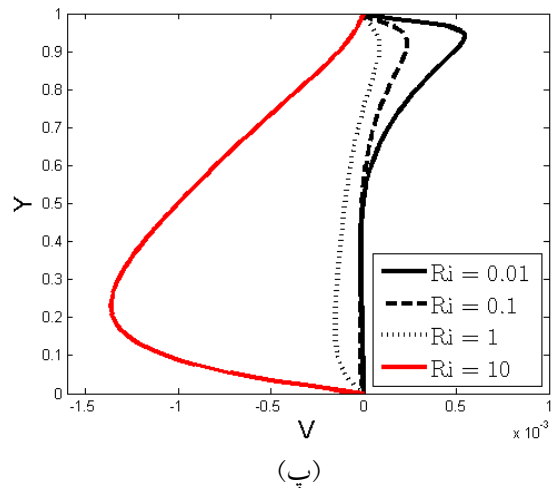
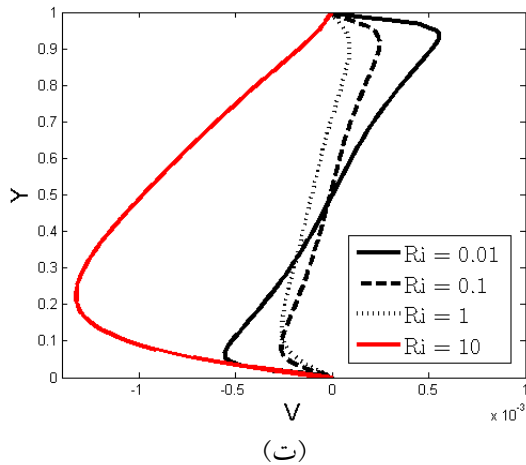
شکل 5. خطوط جریان، خطوط هم‌دما و خطوط هم‌غلظت برای (الف) کاواک مربعی با یک دیواره‌ی متحرک (دیواره‌ی بالا) و (ب) کاواک مربعی با دو دیواره‌ی متحرک (دیواره‌های افقی).



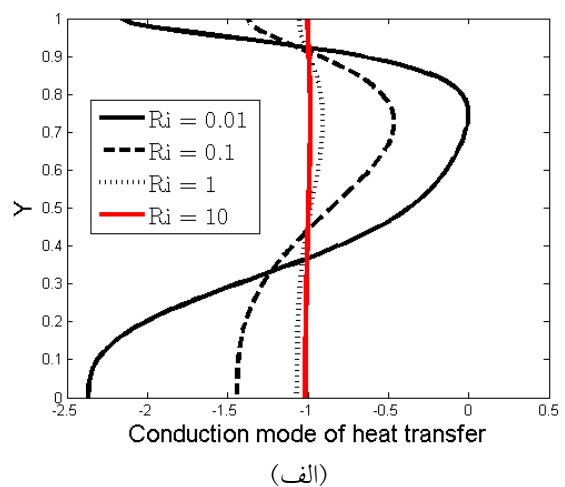
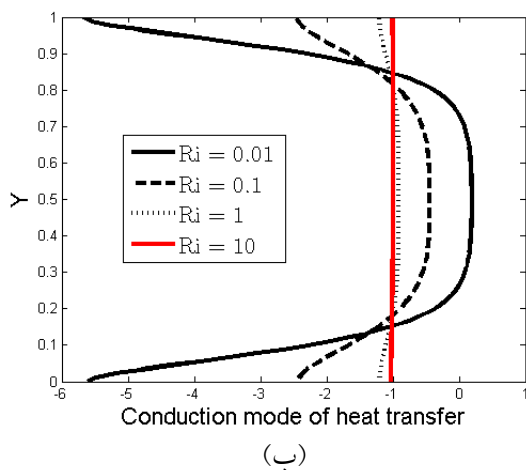
(ب)



(الف)



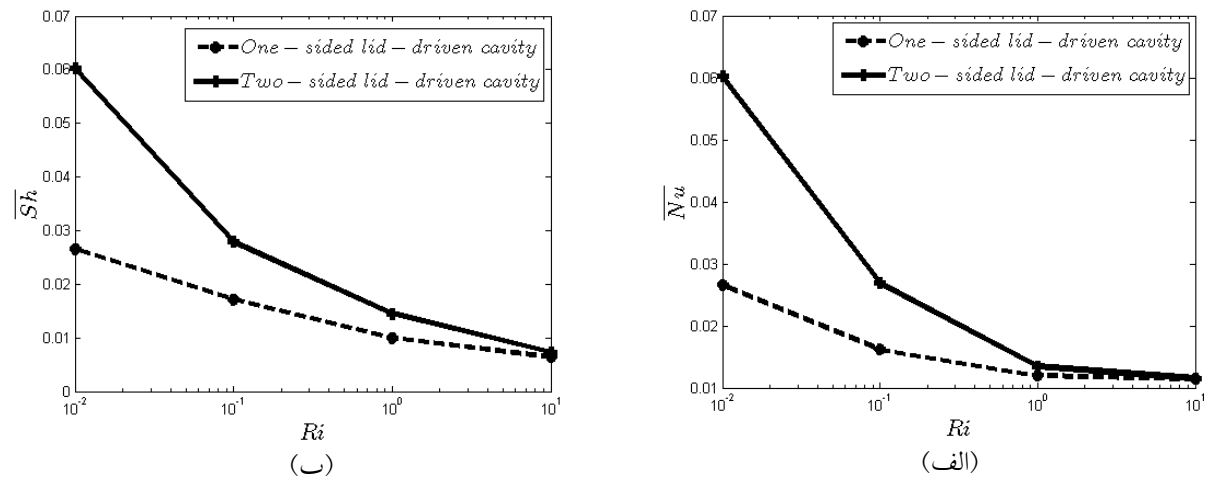
شکل ۶. نمایه سرعت افقی بر حسب فاصله از دیوار برای (الف) کاواک مربعی با یک دیواره‌ی متحرک (دیواره بالا) و (ب) کاواک مربعی با دو دیواره‌ی متحرک (دیواره‌های افقی) و نمایه سرعت عمودی بر حسب فاصله از دیوار برای (پ) کاواک مربعی با یک دیواره متحرک و (ت) کاواک مربعی با دو دیواره متحرک.



شکل ۷. تغییرات سهم مد رسانش انتقال گرما برای (الف) کاواک مربعی با یک دیواره‌ی متحرک (دیواره بالا) و (ب) کاواک مربعی با دو دیواره‌ی متحرک (دیواره‌های افقی).

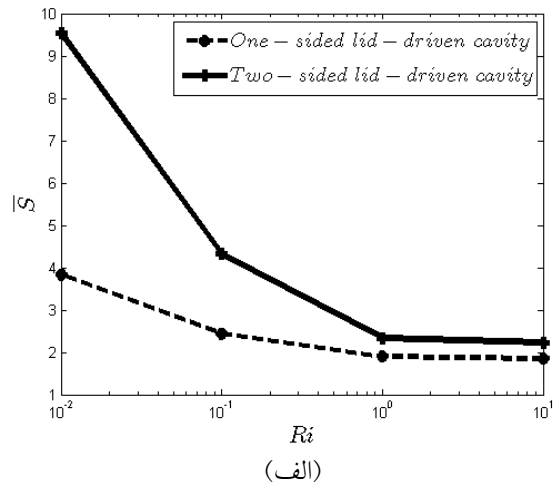
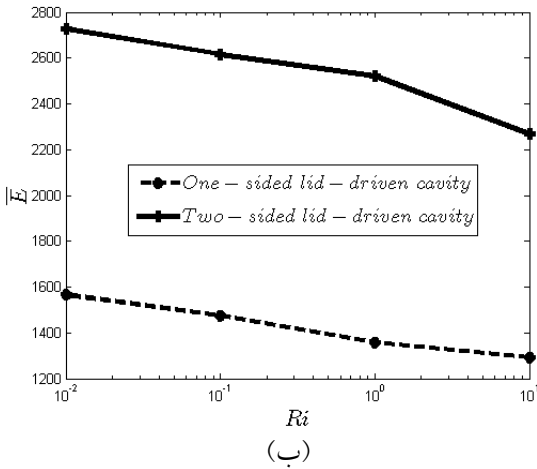
همان‌گونه که در هر دو شکل مشاهده می‌شود مقدار مد رسانش در نزدیکی دیواره‌ی داغ پایینی در رژیم همرفت واداشته $(Ri = 0.01)$ کمترین مقدار را دارد. همچنین با افزایش عدد ریچاردسون مقدار مد رسانش در نزدیکی دیواره‌ی داغ افزایش می‌یابد. تشکیل لایه‌های هم‌دما در نزدیکی این دیواره که در رژیم واداشته به خوبی مشاهده شد و با افزایش عدد ریچاردسون از تراکم‌شان کاسته شد از این واقعیت ناشی می‌شود. از سوی دیگر مشاهده می‌شود مد رسانش در اعداد ریچاردسون بالاتر تقریباً بدون تغییر از یک خط عمودی تشکیل شده است. این واقعیت صورت دیگر خطوط هم‌دمای موازی در اعداد ریچاردسون بالاست. یکی دیگر از نتایج مهم برآمده از مقایسه شکل‌های ۷ (الف) و (ب) کمتر بودن مد رسانش درست روی دیواره پایینی در کاواک با دو دیواره متحرک نسبت به کاواک با یک دیواره متحرک است. با این حال مشاهده می‌شود مقدار مد رسانش در مرکز کاواک در کاواک با یک دیواره متحرک نسبت به کاواک دیگر بسیار کمتر است.

این واقعیت در شکل ۸، جایی که تغییرات مقدار گرما و جرم همرفتی منتقل شده (اعداد نازل و شروود میانگین) در دو کاواک مورد نظر مقایسه شده‌اند دوباره مشاهده می‌شود. از مقیاس لگاریتمی برای مطالعه بهتر و دقیق‌تر استفاده شده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌گردد مقدار گرما و جرم همرفتی منتقل شده با افزایش عدد ریچاردسون کاهش می‌یابد. این تغییرات به دلیل افزایش رسانش گرما از یک سو و کاهش همرفت گرما از سوی دیگر است که پیشتر اشاره و بحث شد. از سوی دیگر میزان گرما و جرم منتقل شده در کاواک با یک دیواره متحرک از میزان گرما و جرم منتقل شده در کاواک دیگر کمتر است. اعمال دو نیروی مکانیکی در دیواره‌های بالایی و پایینی مهم‌ترین دلیل تقویت انتقال گرما و جرم همرفتی در کاواکی با دو دیواره‌ی متحرک است.



شکل ۸ منحنی تغییرات (الف) عدد نازل میانگین و (ب) عدد شروود میانگین در امتداد دیواره افقی پایینی کاواک بر حسب عدد ریچاردسون. از مقیاس لگاریتمی برای تفکیک پذیری بهتر استفاده شده است.

در ادامه به مطالعه تغییرات آنتروپی تولید شده و انرژی جنبشی میانگین کل سامانه‌های مورد مطالعه بر حسب عدد ریچاردسون می‌پردازیم. تغییرات آنتروپی تولید شده و انرژی جنبشی کل بر حسب عدد ریچاردسون در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود آنتروپی تولید شده و انرژی میانگین کل با افزایش عدد ریچاردسون در هر دو حالت کم می‌شوند. افزایش مقاومت نیروهای شناوری بر علیه نیروهای مکانیکی با افزایش عدد ریچاردسون سبب کاهش شدت شارش در سطح کاواک می‌گردد. این کاهش پیشتر در شکل ۵ و در تغییرات اندازه‌ی تابع جریان مشاهده شد. به هرسوی با کاهش شدت جریان و با توجه به معادلات (۲۴) و (۲۵)، هم آنتروپی و هم انرژی کل کاهش می‌یابند. در همین راستا و با توجه به قوت بیشتر نیروهای مکانیکی در کاواک‌هایی با دو دیواره‌ی متحرک، شارش در این کاواک‌ها هم انرژی و هم آنتروپی بیشتری نسبت به شارش در کاواک‌هایی با یک دیواره متحرک دارد.



شکل ۹. منحنی تغییرات (الف) آنتروپی تولید شده میانگین و (ب) انرژی جنبشی کل میانگین بر حسب عدد ریچاردسون. از مقیاس لگاریتمی برای تفکیک پذیری بهتر استفاده شده است.

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش با کمک الگوریتم عددی سیمپل رژیم‌های گوناگون همرفت دوپخشی در کاواک‌های مربعی با یک و دو دیواره‌ی متحرک شبیه‌سازی و مقایسه شدند. درحالی‌که دیواره‌های افقی بالایی و پایینی کاواک‌ها می‌توانستند در سوهای مخالف حرکت کنند دیگر دیواره‌ها ساکن و عایق گرما و جرم فرض شدند. از سوی دیگر دما و غلظت جرمی یکنواخت اما متفاوت روی دیواره‌های افقی در نظر گرفته شد. همچنین روش عددی به‌کاررفته در این پژوهش با کمک نتایج منتشر شده برخی از پژوهشگران پیشین اعتبارآزمایی شد. نتایج اصلی به‌دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

۱- با افزایش عدد ریچاردسون تاثیر نیروهای مکانیکی ناشی از حرکت دیواره‌ها در مقابل نیروهای شناوری کاهش می‌یابد. این امر سبب کاهش انتقال گرما و جرم همرفتی در همرفت دوپخشی در سراسر کاواک‌های مربعی می‌شود.

۲- تراکم لایه‌های مرزی هم‌دما و هم‌غلظت در نزدیکی دیواره‌ی داغ پایینی کاواک مربعی با دو دیواره‌ی متحرک از کاواک دیگر بیشتر است. حرکت سوی مخالف دیواره پایینی در کاواک دوم و قوت گرفتن نیروهای مکانیکی در این کاواک‌ها عامل این تفاوت شناخته شد.

۳- در کاواک مربعی با دو دیواره‌ی متحرک، چرخش گرداب مرکزی با زیاد شدن عدد ریچاردسون کند شده و به دو بخش می‌شکند. افزایش سهم نیروهای شناوری به دلیل افزایش عدد ریچاردسون دلیل این رویداد است.

۴- عدد ریچاردسون تاثیر چشم‌گیری بر نمایه مولفه‌های افقی سرعت‌ها ندارد و تنها به‌میزان بسیار کمی مولفه افقی سرعت با افزایش عدد ریچاردسون تغییر می‌کند. این در حالی است که نمایه‌های سرعت عمودی به‌میزان قابل ملاحظه‌ای با تغییر عدد ریچاردسون تغییر کرده‌اند. به‌نظر می‌رسد با افزایش عدد ریچاردسون از شتاب‌گیری شاره به دلیل کم شدن سهم نیروهای مکانیکی کاسته شده است.

۵- با افزایش عدد ریچاردسون بیشتر گرما و جرم در سراسر کاواک به روش رسانش منتقل می‌شود به طوری که کاواک‌ها در اعداد ریچاردسون بزرگ در یک حالت شبه‌رسانشی قرار دارند.

۶- آنتروپی و انرژی جنبشی کل در کاواک‌های با دو دیواره‌ی متحرک از کاواک‌های دیگر بزرگ‌ترند. قوت گرفتن نیروهای مکانیکی در کاواک‌های یاد شده عامل این تفاوت است.

مراجع

1. Al-Amiri A, Khanafer K, Bull J, Pop I. Effect of sinusoidal wavy bottom surface on mixed convection heat transfer in a lid-driven cavity. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007; 50(9): 1771-80.
2. Khanafer K, Vafai K. Double-diffusive mixed convection in a lid-driven enclosure filled with a fluid-saturated porous medium. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*. 2002; 42(5): 465-86.
3. Florio L, Harnoy A. Combination technique for improving natural convection cooling in electronics. *International journal of thermal sciences*. 2007; 46(1): 76-92.
4. Cha C, Jaluria Y. Recirculating mixed convection flow for energy extraction. *International journal of heat and mass transfer*. 1984; 27(10): 1801-12.
5. Iwanik PO, Chiu WK. Temperature distribution of an optical fiber traversing through a chemical vapor deposition reactor. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*. 2003; 43(3): 221-37.
6. Hasan M, Mujumdar A. Simultaneous mass and heat transfer under mixed convection along a vertical cone. *International journal of energy research*. 1985; 9(2): 129-40.
7. Singh S, Sharif M. Mixed convective cooling of a rectangular cavity with inlet and exit openings on differentially heated side walls. *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*. 2003; 44(3): 233-53.
8. Iwatsu R, Hyun JM. Three-dimensional driven-cavity flows with a vertical temperature gradient. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1995; 38(18): 3319-28.
9. Oztop HF, Dagtekin I. Mixed convection in two-sided lid-driven differentially heated square cavity. *International journal of heat and mass transfer*. 2004; 47(8): 1761-9.
10. Maiti D, Gupta A, Bhattacharyya S. Stable/unstable stratification in thermosolutal convection in a square cavity. *Journal of Heat Transfer*. 2008; 130(12): 122001.
11. Ghasemi B, Aminossadati S. Comparison of mixed convection in a square cavity with an oscillating versus a constant velocity wall. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2008; 54(7): 726-43.
12. Shi W, Vafai K. Mixed convection in an obstructed open-ended cavity. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2010; 57(10): 709-29.
13. Rahman MM, Oztop HF, Ahsan A, Kalame MA, Varolb Y. Double-diffusive natural convection in a triangular solar collector. *International Communication in Heat and Mass Transfer*. 2012; 39: 264-269.
14. Ghachem K, Kolsi L, Maatki C, Hussein AK, Borjini MN. Numerical simulation of three-dimensional double diffusive free convection flow and irreversibility studies in a solar distiller. *International Communication in Heat and Mass Transfer*. 2012; 39: 869-876.
15. Juarez, RA, Alvarez G, Xaman J, Hernandez-Lopez I. Numerical study of conjugate heat and mass transfer in a solar still device. *Desalination*. 2013; 325: 84-94.
16. Saha S, Mojumder S, Rahman MM, Mamun MAH, Mekhilef S, Saidur R. Effect of lewis number on unsteady double-diffusive induced flow in a triangular solar collector with corrugated wall. *Proceeding in Engineering*. 2014; 90: 418-424.
17. Chen Sh, Yang B, Xiao X, Zheng Ch. Analysis of entropy generation in double-diffusive natural convection of nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015; 87: 447-463.
18. Uddin, MB, Rahman MM, Khan MAH, Saidur, R, Ibrahim, TA. Hydromagnetic double-diffusive mixed convection in trapezoidal enclosure due to uniform and nonuniform heating at the bottom side: Effect of Lewis number. *Alexandria Engineering Journal*. 2016; 55(2): 1165-1176.

19. Gholizadeh MM, Nikbakhti R, Khodakhah J, Ghasemi A. Numerical study of double diffusive buoyancy forces induced natural convection in a trapezoidal enclosure partially heated from the right sidewall. *Alexandria Engineering Journal*. 2016; 55(2): 779-795.
20. Ghachem K, Kolsi L, Maatki Ch, Alghamdi A., Oztop HF, Borjini MN, Aissia HB, Al-Salem Kh. Numerical simulation of three-dimensional double diffusive convection in a lid-driven cavity. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016; 110: 241-250.
21. Barletta A, Zanchini E. On the choice of the reference temperature for fully-developed mixed convection in a vertical channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1999; 42(16): 3169-3181
22. Kefayati Gh. Simulation of double diffusive natural convection and entropy generation of power-law fluids in an inclined porous cavity with Soret and Dufour effects (Part II. Entropy generation). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016; 94: 582-624.
23. Cheng T. Characteristics of mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity with various Richardson and Prandtl numbers. *International Journal of Thermal Sciences*. 2011; 50(2): 197-205.
24. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, Washington, DC, 1980.
25. Ouertatani N, Cheikh NB, Beya BB, Lili T, Campo A. Mixed convection in a double lid-driven cubic cavity. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009; 48(7): 1265-72.
26. Teamah MA, El-Maghlany WM. Numerical simulation of double-diffusive mixed convective flow in rectangular enclosure with insulated moving lid. *International Journal of Thermal Sciences*. 2010; 49(9): 1625-1638.
27. Schreiber R, Keller H. Driven cavity flows by efficient numerical techniques. *Journal of Computational Physics*. 1983; 49(2): 310-333.