

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

امید غفارپسند^۱ و محسن محبی نژاد^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان

۲. دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: o.ghaffarpasand@sci.ui.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۱۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶)

چکیده

در این پژوهش، پدیده همرفت دوپخشی ترکیبی ناپایا در کاواک‌های مربعی با یک و دو دیواره 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) تراکم ناپذیر 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 مد رسانشی انتقال گرما در سراسر کاواک با افزایش عدد ریچاردسون زیاد می‌شود به طوری که هردو کاواک در رژیم همرفت آزاد در حالتی شبه رسانشی قرار دارند. علاوه بر این مشاهده شد حرکت هم‌زمان اما در سوی مخالف دیواره‌ها سبب افزایش سهم نیروهای مکانیکی در کاواک‌های با دو دیواره متحرک و در پی آن افزایش گرمای همرفتی منتقل شده در ایشان نسبت به کاواک‌های با یک دیواره متحرک می‌شود. با مطالعه نمایه سرعت‌ها نیز معلوم شد که افزایش عدد ریچاردسون سبب افت شتاب‌گیری شاره به ویژه در نزدیکی دیواره افقی پایینی می‌گردد. مطالعه آنتروپی و انرژی هردو سامانه نشان داد که هردوی ایشان با زیاد شدن عدد ریچاردسون کم می‌شوند و شاره در کاواک‌های با دو دیواره متحرک آنتروپی و انرژی بیشتری دارد.

واژه‌های کلیدی: همرفت دوپخشی، پخش، رسانش، انتقال گرما و جرم، آنتروپی

۱. مقدمه

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

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

۲. Forced convection

۳. Mixed convection

۱. Free convection

ساده بررسی می‌شود. یکی از بهترین هندسه‌هایی که می‌توان برای مطالعه عددی پدیده همرفت دوپخشی از آن استفاده کرد کاواک مربعی دوبعدی با دیواره‌های متحرک است. این هندسه امکان مطالعه همه نیروهای مهم موجود همچون نیروهای شناوری یا نیروهای مکانیکی را فراهم می‌آورد. کاواک‌های مربعی از مهم‌ترین هندسه‌های مورد استفاده در دینامیک شاره‌های محاسباتی هستند که به عنوان محلی مناسب برای مطالعه پدیده‌های فیزیکی موجود در دینامیک شاره‌ها به کار می‌روند. تاکنون پژوهش‌های گسترده‌ای در مورد همرفت و همرفت دوپخشی در کاواک‌های معمولی یا هندسه‌های دیگر منتشر شده است.

در این میان ایواتسو^۷ و همکاران در سال ۲۰۰۳ همرفت را در یک کاواک سه‌بعدی 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^۸ و داگتکین^۹ 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. آمیری 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 به طوری که افزایش آن سبب افزایش میزان گرمای همرفتی منتقل شده می‌شود. آنها همچنین پیشنهاد دادند که شبیه‌سازی‌های عددی برای دامنه گسترده‌تری از اعداد ریچاردسون صورت پذیرد. مایتی^{۱۰} 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

ریچاردسون^۱ (Ri) تعیین می‌شود. این عدد عبارتست از:

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

عدد گراشف^۲ Gr نشان دهنده اندازه نیروهای شناوری نسبت به نیروهای چسبندگی شاره و عدد رینولدز^۳ Re نشان دهنده اندازه نیروهای لختی نسبت به نیروهای چسبندگی شاره است. الامیری^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۷ نشان دادند که گرما در شاره در رژیم‌های همرفت آزاد، همرفت واداشته و همرفت ترکیبی منتقل می‌شود، هرگاه به ترتیب $Ri \gg 1$ ، $Ri \ll 1$ و $Ri \approx 1$ باشد [۱]. جرم نیز می‌تواند به روش همرفت منتقل شود. انتقال همرفتی جرم در سامانه شارشی بر همرفت گرمایی تأثیرگذار است به طوری که حتی گرادیان جرم احتمالی موجود در سامانه شارشی می‌تواند روند انتقال گرما به روش همرفت را متحول سازد. به انتقال همرفتی هم‌زمان گرما و جرم همرفت دوپخشی^۵ می‌گویند [۲]. همرفت دوپخشی همانند همرفت معمولی در رژیم‌های گوناگونی گرما و جرم را منتقل می‌کند.

پدیده دوپخشی 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 گراشف جداگانه برای جرم و گرما در نظر گرفته و نسبت میان این دو عدد نسبت شناوری^۶ 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

۱. Richardson number

۲. Grashof number

۳. Reynolds number

۴. Al-Amiri

۵. Double-diffusive convection

۶. Buoyancy ratio

۷. Iwatsu

۸. Oztop

۹. Dagtekin

۱۰. Maiti

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 تأثیر زیادی بر میزان انتقال جرم و گرما دارد. قلی‌زاده و همکاران نیز در سال ۲۰۱۶ به بررسی پدیده یاد شده در کاواک ذوزنقه‌ای پرداختند [۱۹]. نتایج عددی ایشان نشان داد که میزان انرژی منتقل شده با عدد گراشف زیاد می‌شود. قاچم^۹ و همکاران در سال ۲۰۱۶ پدیده همرفت دوپخشی را در یک کاواک سه‌بعدی شبیه‌سازی کردند [۲۰]. نتایج ایشان نشان‌دهنده تأثیر 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 تأثیر 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 تأثیر تحول زمانی در طول محاسبات صرف نظر کرده‌اند. تاکنون هیچ پژوهشی که همرفت دوپخشی را در کاواک‌هایی با یک و دو دیواره متحرک با هم مقایسه کند نیز منتشر نشده است. دیگر مواردی که تاکنون در کاواک‌هایی با یک و دو دیواره 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 زمینه 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 دیواره 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

هندسه شارش و دستگاه مختصات مورد استفاده در شکل ۱

عدد رینولدز آهنگ انتقال همرفتی گرما و جرم افزایش می‌یابد. قاسمی و امین‌الساداتی در سال ۲۰۰۸ انتقال گرمای همرفتی را در کاواک مربعی دوبعدی به صورت عددی مطالعه کردند [۱۱]. آنها نشان دادند که در اعداد ریچاردسون پایین، میانگین آهنگ انتقال گرما در شرایطی که دیواره‌ها به صورت نوسانی حرکت کنند نسبت به حالتی که ساکن باشند کاهش می‌یابد. شی^۱ 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 پدیده همرفت دوپخشی ترکیبی را در یک جمع‌کننده خورشیدی مثلثی با روش‌های عددی بررسی کردند [۱۳]. آنها در مورد تأثیر عدد رایلی^۲ و نرخ شناوری بر عملکرد جمع‌کننده‌های یاد شده بحث کردند. قاچم^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۲ تأثیر نرخ شناوری را بر الگوی شارش و انتقال گرما به صورت دقیق مطالعه کردند [۱۴]. خوارز^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۳ فرایند انتقال گرما و جرم را در پدیده همرفت دوپخشی در یک کاواک مربعی با شیوه‌های عددی مطالعه کردند [۱۵]. ایشان دریافته‌اند انتقال گرما و جرم به میزان چشمگیری توسط متغیرهای همرفت دوپخشی متأثر می‌شود. تأثیر عدد لوویس^۵ بر همرفت دوپخشی ناپایا توسط ساه^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۴ مطالعه شد [۱۶]. نتایج ایشان نشان داد تغییر عدد لوویس به میزان چشمگیری خطوط هم‌دما و هم‌غلظت را تغییر می‌دهد. چن^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۵ آنتروپی را در پدیده همرفت دوپخشی بررسی کردند [۱۷]. ایشان دریافته‌اند نرخ شناوری تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر میزان آنتروپی پدیده همرفت دوپخشی دارد. اُدین^۸ و همکاران در

۱. Shi

۲. Rayleigh

۳. Ghachem

۴. Juarez

۵. Lewis number

۶. Saha

۷. Chen

۸. Uddin

۹. Ghachem

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

$$\beta_C = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{(T,p)}$$

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

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

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

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

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

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

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

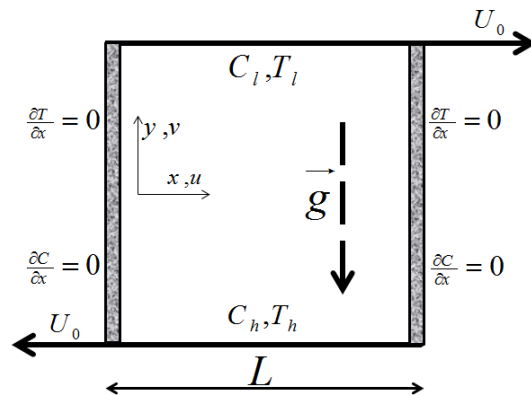
$$(Y, X) = \frac{(y, x)}{L}, (U, V) = \frac{(u, v)}{U_0}, P = \frac{p}{p_0}, \tau = \frac{t}{t_0}. \quad (۹)$$

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_h - T_l}, \Phi = \frac{C - C_0}{C_h - C_l} \quad (۱۰)$$

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 می‌شوند:

$$T_0 = \frac{(T_h + T_l)}{2}, \quad C_0 = \frac{(C_h + C_l)}{2}. \quad (۱۱)$$

معادلات بی‌بعد سازی شده با کمک معادلات (۹) و (۱۰) به شکل زیراند:



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

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. شاره موجود در کاواک نیوتنی و تراکم ناپذیر بوده و از همه اتلاف‌های انرژی ممکن همچون اتلاف ناشی از لزجت چشم پوشی 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 و C_l ، C_h هستند که، زیرنگاشت l نشان‌دهنده واژه «کم»^۱ و زیرنگاشت h نشان‌دهنده واژه «زیاد»^۲ است. دیگر دیواره‌ها، صفحاتی نفوذناپذیر و عایق گرما و جرم فرض شده‌اند. همچنین فرض شده است همه ویژگی‌های شاره به جز چگالی در عبارت مربوط به نیروی شناوری نسبت به تغییرات گرما و جرم ثابت هستند. این تقریب، تقریب بوسینسک^۳ نامیده می‌شود و چگالی در این تقریب به شکل زیر تعریف می‌گردد [۱]:

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

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

۱. Low

۲. High

۳. Boussinesq approximation

۱. Barletta

۲. Zanchini

نظر به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

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

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

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

همانند مرجع [۲۲] ثابت‌های χ_I و χ_{II} و χ_{III} به ترتیب 0.5 ، 0.01 و 0.01 گرفته شد. در عبارت بالا اولین، دومین و سومین جمله سمت راست به ترتیب سهم اصطکاک شارشی^۷، انتقال گرما و انتقال جرم در برگشت ناپذیری شارشی^۸ سامانه یا همان آنتروپی تولید شده کل است. آنتروپی میانگین با انتگرال‌گیری رابطه فوق روی همه نقاط شبکه به شکل زیر گزارش شد

$$\overline{S} = \int_0^1 S dXdY \quad (25)$$

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

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

۳. روش عددی حل مسئله

در این پژوهش معادلات بی‌بعد حاکم بر مسئله (معادلات (۱۲) تا (۱۶)) با اعمال شرایط مرزی در یک کاواک مربعی با یک و دو دیواره متحرک به صورت عددی حل شدند. در این راه معادلات ابتدا با کمک روش المان متناهی به شکل فضایی

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

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X}, \quad (13)$$

$$+ \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{Gr}{Re^2} (\theta + B\Phi),$$

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

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

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

ضریب شناوری B در معادله بالا به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

در معادلات اصلی Pr و Sc به ترتیب اعداد اشمیت^۳ و پرنتل^۴ هستند. شرایط مرزی بی‌بعد سازی شده نیز به شکل زیر فرض می‌شوند:

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

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

$$Y = 0: U = -1, \quad V = 0, \quad \theta = 1, \quad \Phi = 1 \quad (20)$$

برای کاواک با دو دیواره متحرک

$$Y = 0: U = 0, \quad V = 0, \quad \theta = 1, \quad \Phi = 1 \quad (21)$$

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 می‌شوند. 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 می‌شوند. نحوه محاسبه این اعداد در مرجع [۱۷] آمده است. این اعداد عبارتند از:

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

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

۳. Schmidt

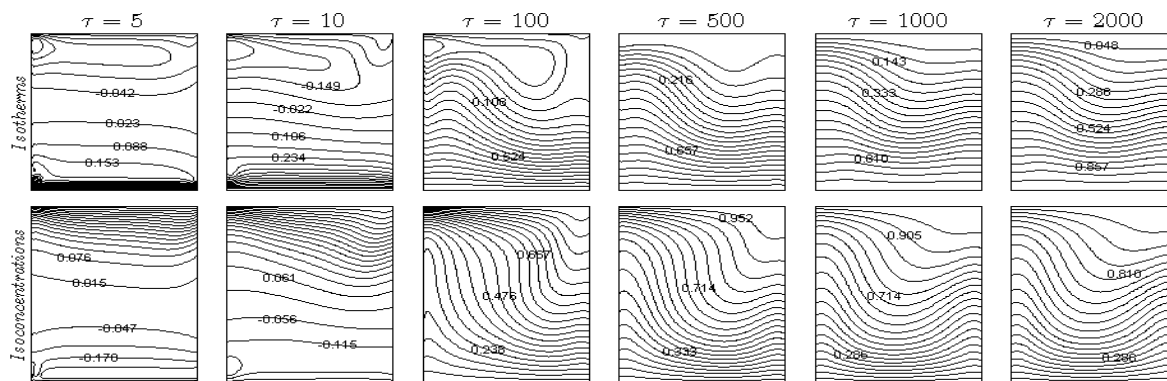
۴. Prandtl

۵. Nusselt

۶. Sherwood

۷. Fluid friction

۸. Fluid irreversibility



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

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. همان گونه که دیده می‌شود نتایج شبیه‌سازی پس از ۲۰۰۰ گام زمانی به حالت پایا میل می‌کنند.

۲.۳. 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 $Gr = 100$ و $Re = 100$ 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. اختلاف میان نتایج کمتر از ۰.۳٪ ارزیابی گردید. از این رو با توجه به زمان عملکرد بهینه پردازشگر از شبکه 90×90 در همه شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شد.

۳.۳. اعتبار آزمایی روش عددی مورد استفاده

روش عددی مورد استفاده در این پژوهش باید با کمک پژوهش‌های صورت گرفته پیشین اعتبار آزمایی گردد تا دقت و درستی نتایج به دست آمده قابل قبول باشند. از این رو روش

گسسته‌سازی گردیدند. سپس از روش کوئیک^۱ و دیفرانسیل مرکزی^۲ برای در نظر گرفتن جملات دوم طرف راست و طرف چپ استفاده شد. با کمک الگوریتم سیمپل^۳ جمله فشار در معادلات ناویر-استوکس منظور شد. این روش عددی به طور خلاصه الگوریتم سیمپل 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^۴ محاسبه شدند.

۱.۳. معیار هم‌گرایی

گام زمانی مورد استفاده در این پژوهش همانند شبیه‌سازی‌های عددی اوورتاتانی^۵ (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:

$$\sum_{i,j} |\Pi_{i,j}^n - \Pi_{i,j}^{n-1}| \leq 10^{-6} \quad (27)$$

در این معیار متغیر عمومی Π به مجموعه‌ای از کمیت‌های U, V, θ یا Φ اشاره دارد و بالانگاشت n مربوط به شماره گام

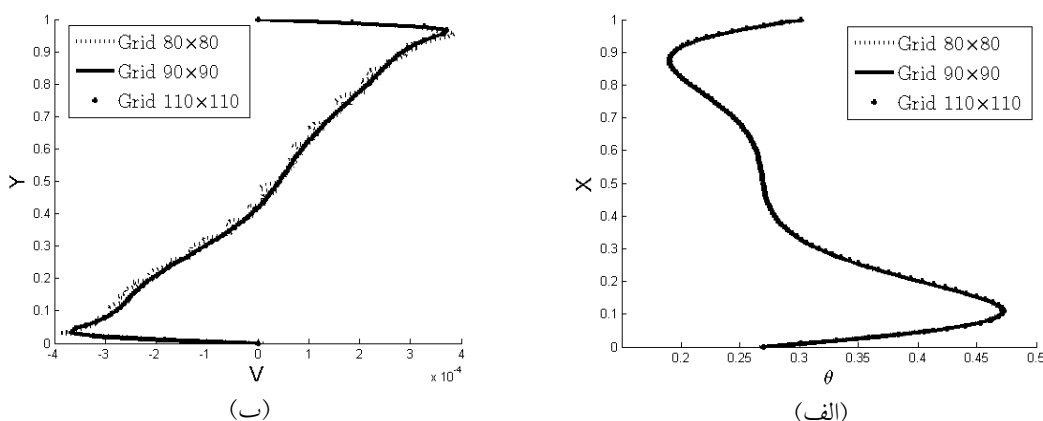
۱. QUICK

۲. Central difference

۳. SIMPLE

۴. Simpson's integration rule

۵. Ouertatani



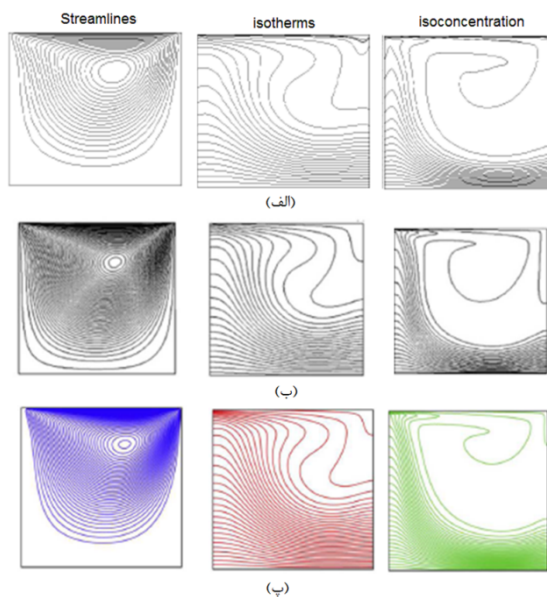
شکل ۳. مقایسه میانگین (الف) دما در صفحه افقی میانی کاواک و (ب) مؤلفه عمودی سرعت در صفحه عمودی کاواک برای سه شبکه گوناگون هنگامی که $Ri = 0.01$ است.

خطوط جریان، خطوط هم‌دما^۱ و خطوط هم‌غلظت حاصل از این شبیه‌سازی با نتایج به دست آمده توسط الامیری و همکاران [۱] و تیماه^۲ و ال‌مقلانی^۳ [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 الامیری و همکاران [۱] و اسکریبر^۴ و کلر^۵ [۲۷] مقایسه شدند. دوباره مشاهده می‌شود که انطباق قابل قبولی میان نتایج حاصل از این پژوهش و نتایج دیگران وجود دارد.

۴. نتایج و بحث

به منظور مقایسه همرفت دوپخشی در کاواک‌های مربعی با یک و دو دیواره متحرک، شبیه‌سازی‌های عددی هنگامی که عدد گراش ثابت ($Gr = 100$) و عدد رینولدز در بازه ۳٫۱۶ 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



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

عدد در دو مرحله اعتبار آزمایی 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 $Pr = 1$ ، $Le = 10$ ، $Re = Gr = 100$ اجرا شد. شرایط مرزی همان شرایط مرزی یاد شده در معادلات (۱۸) تا (۲۱) فرض شدند.

۱. isotherms

۲. Teamah

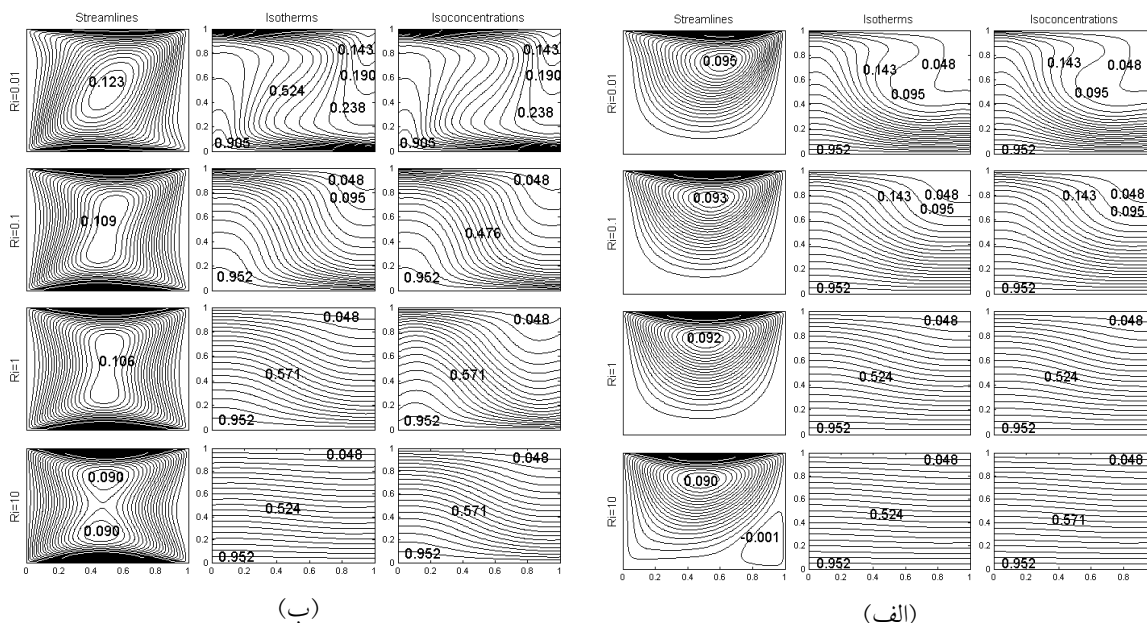
۳. El-Maghlany

۴. Screiber

۵. Keller

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

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



شکل ۵. خطوط جریان، خطوط هم‌دما و خطوط هم‌غلظت برای (الف) کاواک مربعی با یک دیواره متحرک (دیواره بالا) و (ب) کاواک مربعی با دو دیواره متحرک (دیواره‌های افقی).

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

به نظر می‌رسد در این حالت نیروهای شناوری گرمایی در برابر نیروهای مکانیکی برآمده از حرکت دیوارهٔ متحرک قابل چشم‌پوشی هستند. نیروهای مکانیکی در این حالت سبب شکل‌گیری لایه‌های متمرکز هم‌دما و هم‌غلظت در نزدیکی دیوارهٔ پایینی می‌شوند در حالی که نیروهای شناوری تمایل به برهم زدن این لایه‌ها دارند. افزایش انتقال گرمای همرفتی در

ریچاردسون در بازهٔ ۰٫۱ تا ۱۰ تغییر می‌کند. همچنین با فرض $B=1$ و $Pr=Sc=۰٫۷۱$ 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.

همان گونه که در شکل ۵ (الف) دیده می‌شود نیروهای مکانیکی برآمده از حرکت دیوارهٔ بالایی در حالت همرفت واداشته ($Ri=۰٫۰۱$)، اولاً سبب پدید آمدن یک جریان ساعت‌گرد بزرگ در کاواک می‌شوند و ثانیاً سبب به هم ریختگی خطوط هم‌دما و هم‌غلظت به ویژه در نزدیکی دیوارهٔ متحرک می‌گردند. هرگاه خطوط هم‌دما خطوطی خمیده باشند، که سراسر کاواک را فراگرفته‌اند، گرما بیشتر به شیوهٔ همرفت منتقل می‌شود، در حالی که هرگاه این خطوط، خطوطی موازی باشند

۱. Isoconcentration

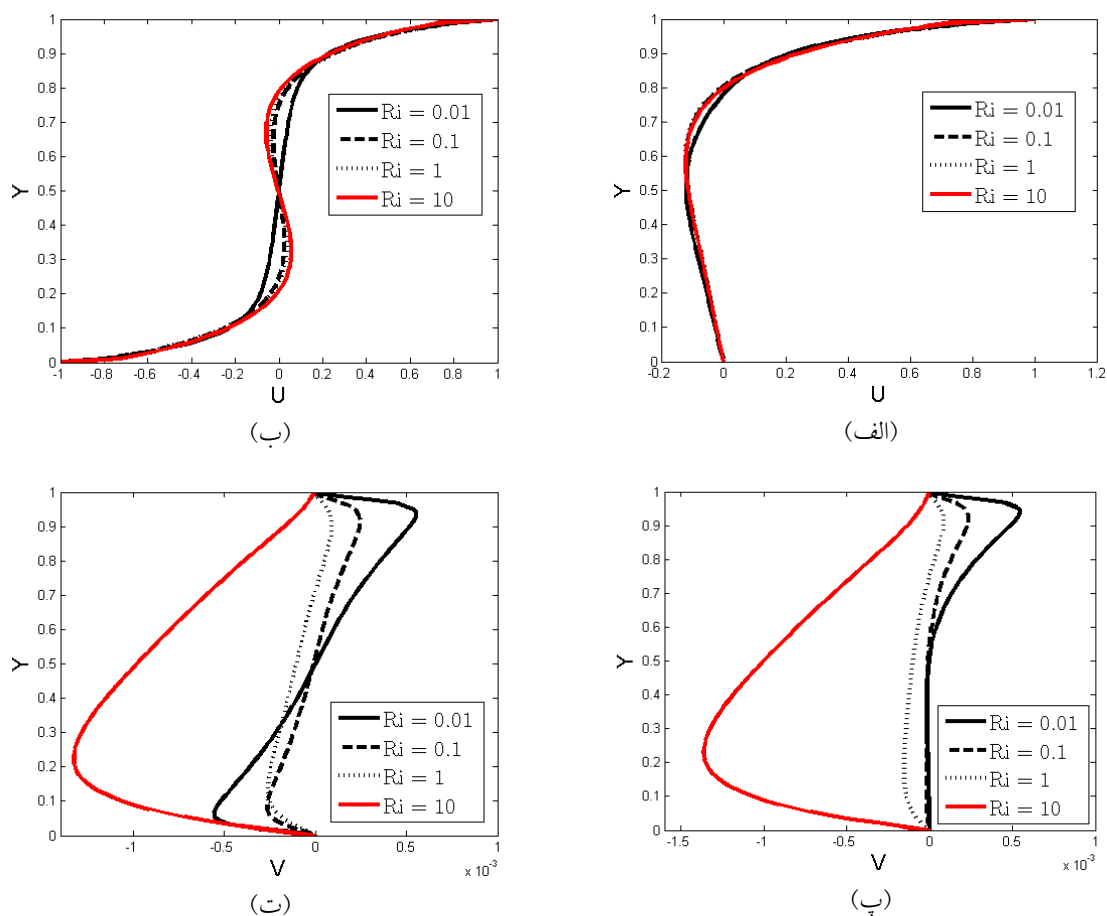
همرفتی با مد همرفت تغییرات چشمگیری مشاهده می‌شود. به طور کلی یک جریان گردابی با محور چرخشی در سراسر کاواک و برای همه حالت‌ها مشاهده می‌گردد. در رژیم همرفت واداشته حرکت در دوسوی مخالف دیواره‌های بالایی و پایینی شکل گرداب مرکزی را تعیین می‌کنند. از این‌رو گردابی متقارن که نیمه بالایی و پایین آن نشان دهنده 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 به طوری که جریان گردابی مرکزی شروع به چرخش به سمت محور مرکزی کاواک از یک سو و دویاره شدن از سوی دیگر می‌کند. مقدار تابع جریان نیز همانند حالت قبل با افزایش عدد ریچاردسون کاهش می‌یابد. علاوه بر این به خوبی مشاهده می‌شود که لایه‌های مرزی هم‌دما و هم‌غلظت که در حالت قبل تنها در نزدیکی دیواره پایینی تشکیل شده بودند، هم‌اکنون در مجاورت هر دو دیواره 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 مد رسانش انجام می‌شوند. این در حالی است که خمیدگی‌های قابل مشاهده‌ای به ویژه برای خطوط هم‌غلظت در حالت همرفت آزاد کاواک با دویواره متحرک دیده می‌شود. این مشاهده نشان می‌دهد که مد رسانش در کاواک با دو دیواره متحرک نسبت به کاواک با یک دیواره متحرک ضعیف‌تر است.

در ادامه برای مقایسه بهتر پدیده همرفت دوپخشی تغییرات نمایه‌های سرعت نسبت به فاصله از دیواره برای دو حالت مورد نظر بررسی می‌شوند. تغییرات نمایه‌های سرعت افقی و عمودی بر حسب فاصله از دیواره در شکل‌های ۶ (الف) تا (ت) نمایش داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل‌های ۶ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود، عدد ریچاردسون تأثیر چشمگیری بر نمایه مؤلفه‌های افقی سرعت ندارد و تنها به میزان بسیار کمی مؤلفه افقی سرعت با افزایش عدد ریچاردسون تغییر می‌کند. این در حالی است که نمایه‌های سرعت عمودی، شکل‌های ۶ (پ) و

این مورد، افزایش آهنگ انتقال جرم را نیز در پی دارد به طوری که لایه‌های مرزی به هم چسبیده‌ای در نزدیکی دیواره با غلظت بیشینه نیز مشاهده می‌شوند. در حالت همرفت کمتر واداشته ($Ri = 0.1$) نیز انتقال گرمای همرفتی بیشتر با مد همرفت انجام می‌شود. در این حالت حرکت دیواره 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 به طوری که از تراکم خطوط هم‌دما و هم‌غلظت در نزدیکی دیواره پایینی به دلیل کم شدن سهم مد 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 حالتی که رژیم همرفت غالب در سامانه همرفت آزاد است ($Ri = 10$) یک جریان گردابی ثانویه نیز در گوشه پایینی کاواک در سمت چپ علاوه بر جریان گردابی مرکزی تشکیل می‌شود. تشکیل گرداب پادساعتگرد ثانویه به دلیل افزایش سهم نیروهای شناوری گرمایی در این حالت و تقابل‌شان با نیروهای مکانیکی حاصل از حرکت دیواره بالایی است. در این حالت انتقال گرما بیشتر با مد رسانش انجام می‌شود و سراسر کاواک در یک حالت شبه‌رسانشی قرار می‌گیرد. خطوط تقریباً موازی هم‌دما و هم‌غلظت بی‌هیچ‌گونه به هم‌ریختگی از این موضوع حکایت می‌کنند. از سوی دیگر در خطوط جریان شکل ۵ (الف) می‌توان دید که با افزایش عدد ریچاردسون هسته گرداب به وجود 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. همه این مشاهدات نشان دهنده افزایش مقاومت نیروهای شناوری بر علیه نیروهای مکانیکی برآمده از حرکت دیواره بالایی با زیاد شدن عدد ریچاردسون است.

در حالت دوم و زمانی که دو دیواره کاواک (دیواره‌های افقی) حرکت می‌کنند شکل ۵ (ب)، در میزان انتقال گرمای



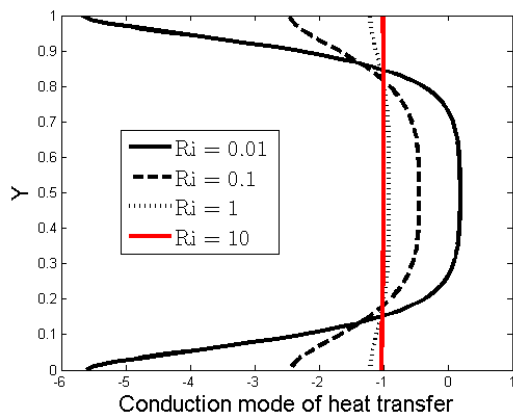
شکل ۶. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نمایه سرعت افقی بر حسب فاصله از دیوار برای (الف) کاواک مربعی با یک دیواره متحرک (دیواره بالا) و (ب) کاواک مربعی با دو دیواره متحرک (دیواره‌های افقی) و نمایه سرعت عمودی بر حسب فاصله از دیوار برای (پ) کاواک مربعی با یک دیواره متحرک و (ت) کاواک مربعی با دو دیواره متحرک.

می‌گردد. این ناشی از افزایش نیروهای شناوری گرمایی در حالت همرفت آزاد نسبت به نیروهای مکانیکی به ویژه در نزدیکی دیواره داغ‌تر است. در کاواکی با دو دیواره متحرک داستان کمی متفاوت است. همان‌گونه که دیده می‌شود حرکت دو دیواره افقی سبب ایجاد انحراف معینی در شکل نمایه سرعت شده که با افزایش عدد ریچاردسون تقریباً خنثی شده است.

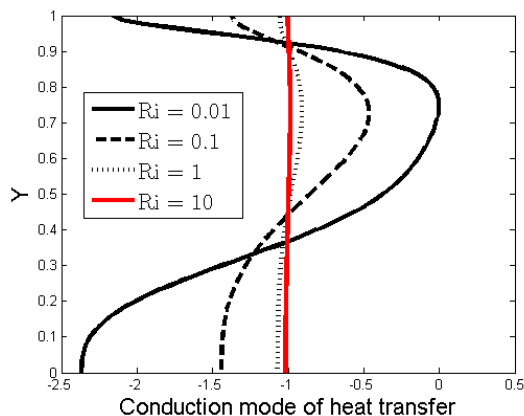
گرما در محیط‌های مادی معمولاً به دو شیوه همرفت و رسانش منتقل می‌شود. چنگ در سال ۲۰۱۱ با ارائه تعریف جدیدی از عدد نازل، میزان انتقال گرما به کمک این دو مد را به شکل زیر تخمین زد [۲۳]:

(ت)، به میزان چشمگیری با تغییر عدد ریچاردسون تغییر کرده‌اند. به نظر می‌رسد که با افزایش عدد ریچاردسون مؤلفه‌های عمودی سرعت در سراسر کاواک کاهش یافته‌اند. این واقعیت می‌تواند به دلیل کاهش تأثیر نیروهای مکانیکی ناشی از حرکت دیوار در اثر افزایش عدد ریچاردسون باشد که خود باعث افت شتاب‌گیری شاره شده است. آفت شتاب‌گیری شاره در نزدیکی دیواره پایینی محسوس‌تر است.

دلیل دیگر این ادعا وجود انحراف مشخص نمایه سرعت در نزدیکی دیواره متحرک بالایی در حالت $Ri = 0.01$ به سمت راست است شکل ۶ (پ) که با افزایش عدد ریچاردسون در حالت $Ri = 10$ به سمت چپ در نزدیکی دیواره داغ منحرف



(ب)



(الف)

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

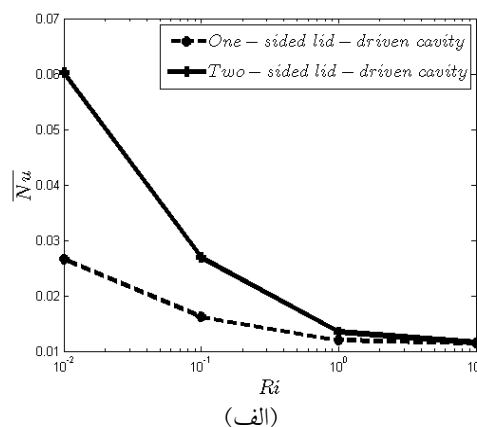
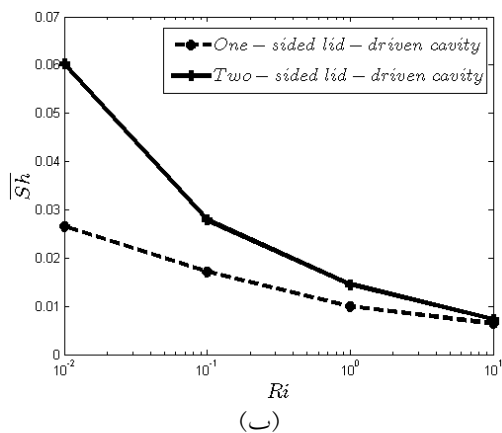
ریچاردسون بالاتر تقریباً بدون تغییر از یک خط عمودی تشکیل شده است. این واقعیت صورت دیگر خطوط هم‌دمای موازی در اعداد ریچاردسون بالاست. یکی دیگر از نتایج مهم برآمده از مقایسه شکل‌های ۷ (الف) و (ب) کمتر بودن مد رسانش درست روی دیواره پایینی در کاواک با دو دیواره متحرک نسبت به کاواک با یک دیواره متحرک است. 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. همان گونه 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 دیواره متحرک است.

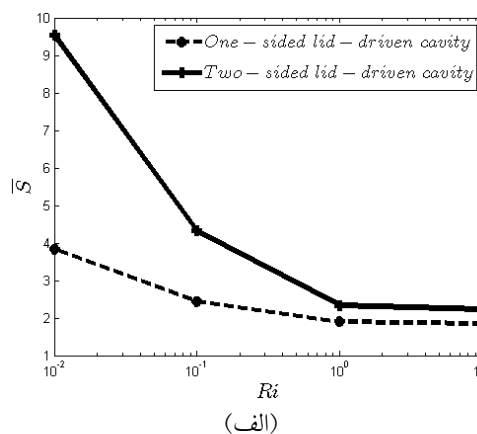
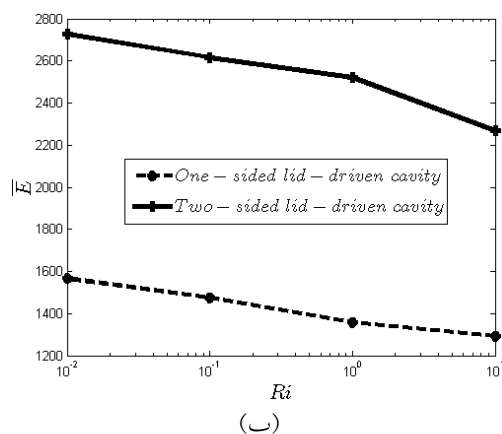
$$Nu = \frac{\partial \theta}{\partial Y} - Pr.Re.V.\theta \quad (28)$$

در این رابطه جمله اول نشان‌دهنده سهم مد رسانش در انتقال گرما و جمله دوم نشان‌دهنده سهم مد همرفت در انتقال گرما است. چنگ با محاسبه این عبارت در صفحه عمودی میانی کاواک اندازه‌ای از میزان هریک از مدهای یاد شده در انتقال گرمای کل کاواک را تخمین زد. وی دریافت که در رژیم همرفت واداشته، مد رسانش در میان کاواک با یک دیواره متحرک ناچیز بوده ($\frac{\partial \theta}{\partial Y} \rightarrow 0$) و در نزدیکی دیوار تغییر محسوسی را احساس می‌کند. انتقال گرما به شیوه 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.

همان گونه که در هر دو شکل مشاهده می‌شود مقدار مد رسانش در نزدیکی دیواره داغ پایینی در رژیم همرفت واداشته $Ri = 0.1$ کمترین مقدار را دارد. همچنین با افزایش عدد ریچاردسون مقدار مد رسانش در نزدیکی دیواره داغ افزایش می‌یابد. تشکیل لایه‌های هم‌دمای 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



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



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

شدت جریان و با توجه به معادلات (۲۴) و (۲۵)، هم آنژیتهی و هم آنژیتهی کل کاهش می‌یابند. در همین راستا و با توجه به قوت بیشتر نیروهای مکانیکی در کاواک‌هایی با دو دیواره متحرک، شارش در این کاواک‌ها هم آنژیتهی و هم آنژیتهی بیشتری نسبت به شارش در کاواک‌هایی با یک دیواره متحرک دارد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با کمک الگوریتم عددی سیمپل رژیم‌های گوناگون همرفت دوپنشی در کاواک‌های مربعی با یک و دو دیواره متحرک شبیه‌سازی و مقایسه شدند. در حالی که

در ادامه به مطالعه تغییرات آنژیتهی تولید شده و آنژیتهی جنبشی میانگین کل سامانه‌های مورد مطالعه بر حسب عدد ریچاردسون می‌پردازیم. تغییرات آنژیتهی تولید شده و آنژیتهی جنبشی کل بر حسب عدد ریچاردسون در شکل ۹ نمایش داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود آنژیتهی تولید شده و آنژیتهی 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 بیشتر در شکل ۵ و در تغییرات اندازه تابع جریان مشاهده شد. به هرسوی با کاهش

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 تأثیر چشمگیری بر نمایه مؤلفه‌های افقی سرعت‌ها ندارد و تنها به میزان بسیار کمی مؤلفه افقی سرعت با افزایش عدد ریچاردسون تغییر می‌کند. این در حالی است که نمایه‌های سرعت عمودی به میزان قابل ملاحظه‌ای با تغییر عدد ریچاردسون تغییر کرده‌اند. به نظر 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 شبه رسانشی قرار دارند.

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

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 به کار رفته در این پژوهش با کمک نتایج منتشر شده برخی از پژوهشگران پیشین اعتبارآزمایی شد. نتایج اصلی به دست آمده در این پژوهش عبارتند از:

۱. با افزایش عدد ریچاردسون تأثیر نیروهای مکانیکی ناشی از حرکت دیواره‌ها در مقابل نیروهای شناوری کاهش می‌یابد. این امر سبب کاهش انتقال گرما و جرم همرفتی در همرفت دوپخش در سراسر کاواک‌های مربعی می‌شود.
۲. تراکم لایه‌های مرزی هم‌دما و هم‌غلظت در نزدیکی دیواره داغ پایینی کاواک مربعی با دو دیواره 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 دیواره متحرک، چرخش گرداب

مراجع

1. A Al-Amiri, K Khanafer, J Bull, and I Pop, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **50**, 9 (2007) 1771.
2. K Khanafer and K Vafai, *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications* **42**, 5 (2002) 465.
3. L Florio and A Harnoy, *International Journal of Thermal Sciences* **46**, 1 (2007) 76.
4. C Cha and Y Jaluria, *International Journal of Heat And Mass Transfer* **27**, 10 (1984) 1801.
5. P O Iwanik and W K Chiu, *Numerical Heat Transfer A: Applications* **43**, 3 (2003) 221.
6. M Hasan and A Mujumdar, *International Journal of Energy Research* **9**, 2 (1985) 129.
7. S Singh and M Sharif, *Numerical Heat Transfer A: Applications* **44**, 3 (2003) 233.
8. R Iwatsu and J M Hyun, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **38**, 18 (1995) 3319.
9. HF Oztop and I Dagtekin, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **47**, 8 (2004) 1761.
10. D Maiti, A Gupta, and S Bhattacharyya, *Journal of Heat Transfer* **130**, 12 (2008) 122001.
11. B Ghasemi and S Aminossadati, *Numerical Heat Transfer A: Applications* **54**, 7 (2008) 726.
12. W Shi and K Vafai, *Numerical Heat Transfer A: Applications* **57**, 10 (2010) 709.
13. M M Rahman, H F Oztop, A Ahsan, M A Kalame, and Y Varolb, *International Communication in Heat and Mass Transfer* **39** (2012) 264.
14. K Ghachem, L Kolsi, C Maatki, A K Hussein, and M N Borjini, *International Communication in Heat and Mass Transfer* **39** (2012) 869.
15. R Alvarado-Juárez, G Álvarez, J Xamán, and I Hernández-López, *Numerical study of Conjugate Heat and Mass Transfer in a Solar Still Device. Desalination* **325** (2013) 84.
16. S Saha, S Mojumder, MM Rahman, MAH Mamun, S Mekhilef, and R Saidur, "Effect of Lewis Number on Unsteady Double-Diffusive Induced Flow in a Triangular Solar Collector With Corrugated Wall", *Proceeding in Engineering* **90** (2014) 418.
17. Sh Chen, B Yang, X Xiao, and C Zheng, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **87** (2015) 447.
18. M B Uddin, M M Rahman, M A H Khan, R Saidur, and T A Ibrahim, *Alexandria Engineering Journal* **55**, 2 (2016) 1165.
19. MM Gholizadeh, R Nikbakhti, J Khodakhah, and A Ghasemi, *Alexandria Engineering Journal*. **55**, 2 (2016) 779.
20. K Ghachem, L Kolsi, C Maatki, A Alghamdi, H F

24. S Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington DC (1980).
25. N Ouertatani, N B Cheikh, B B Beya, T Lili, and A Campo, *International Journal of Thermal Sciences* **48**, 7 (2009) 1265.
26. M A Teamah and W M El-Maghlany, *International Journal of Thermal Sciences* **49**, 9 (2010) 1625.
27. R Schreiber and H Keller, *Journal of Computational Physics* **49**, 2 (1983) 310.
- Oztop, M N Borjini, H B Aissia, and Al-Salem K *International Journal of Thermal Sciences* **110** (2016) 241.
21. A Barletta and E Zanchini, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **42**, 16 (1999) 3169.
22. G h Kefayati, *International Journal of Heat and Mass Transfer* **94** (2016) 582.
23. T Cheng, *International Journal of Thermal Sciences* **50**, 2 (2011) 197.