

بررسی عددی انتقال گرمای ترکیبی رسانش، همرفت طبیعی و تابش در یک بلوک جامد شامل حفره‌های پرشده با گاز

اشکان مجیدی دهکردی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،
ashkanmajidi66@gmail.com

افراسیاب رئیسی*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،
raisi@eng.sku.ac.ir

بهزاد قاسمی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران،
behzadgh@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش بررسی انتقال گرمای ترکیبی همرفت طبیعی، رسانش و تابش در یک بلوک جامد شامل دو حفره پرشده با گاز هوا مطالعه می‌شود. دیواره‌ی سمت چپ بلوک دارای دمای T_h ، دیواره سمت راست بلوک دارای دمای T_c و دیواره‌های بالا و پایین عایق گرمایی هستند. بلوک شامل دو حفره است که سطوح داخلی آن از نظر تابشی، پخشنده خاکستری بوده و گاز داخل حفره از نظر تابشی غیرفعال است. این پژوهش توسط روش المان محدود و نرم‌افزار Comsol Multiphysics نسخه ۶/۱ انجام می‌شود. مطالعه عددی برای اعداد رایلی در محدوده $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ ، ضریب صدور سطوح حفره در محدوده $0 \leq \varepsilon \leq 1$ و مقادیر مختلف نسبت رسانایی گرمایی k^* انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی، عدد ناسلت همرفت افزایش و ناسلت تابشی کاهش می‌یابد. افزایش ضریب صدور تأثیر منفی روی شار گرمایی دارد به طوری که ناسلت همرفت کاهش و ناسلت تابشی افزایش می‌یابد. افزایش رسانایی گرمایی نیز باعث تقویت همرفت طبیعی می‌شود چرا که با افزایش رسانایی گرمایی، شار گرمایی سریع‌تر از بلوک جامد عبور می‌کند و به سیال درون حفره می‌رسد. **واژه‌های کلیدی:** انتقال گرمای مزدوج، همرفت طبیعی، تابش سطحی، رسانش، محفظه، بلوک جامد.

Numerical investigation of combined conduction, natural convection, and radiation heat transfer in a solid block including gas-filled cavities

A. Majidi Dehkordi

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

A. Raisi

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

B. Ghasemi

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Abstract

In this research, the combined heat transfer of natural convection, conduction, and radiation has been investigated in a solid block including two cavities filled with gas (air), where the left wall of the block has a temperature of T_h , the right wall of the block has a temperature of T_c . The upper and bottom walls of the block are thermally insulated. The block contains two cavities, whose internal surfaces are diffuse gray in terms of radiation, and the gas inside the cavity is a nonparticipating medium. The research is carried out by the finite element method and Comsol Multiphysics software version 6.1. The results show that with the increase of the Rayleigh number, the convective Nusselt number increases while the radiative Nusselt number decreases. But due to the low contribution of surface radiation in the heat transfer rate, the total heat transfer rate increases with increasing Rayleigh number. Increasing emissivity reduces the convective Nusselt number and increases the radiative Nusselt number so that it decreases the total heat transfer rate. Increasing the thermal conductivity coefficient ratio also strengthens the natural convection while it deteriorates the radiation exchange.

Keywords: Conjugate heat transfer, Natural convection, Radiation, Conduction, Enclosure, Cavity, Solid block.

۱- مقدمه

طراحی گرمایی ساختمان‌ها، تهویه هوا در محیط‌های بسته، خنک‌کاری تجهیزات الکترونیکی، هوانوردی، کاربردهای شیمیایی، و ساخت نیمه‌هادی‌ها است.

تاکنون مطالعات عددی و تجربی بسیاری در مورد جنبه‌های مختلف کاربرد انتقال گرمای همرفت آزاد در محفظه‌ها صورت گرفته است. همچنین محققان زیادی به افزایش آهنگ انتقال گرمای همرفت آزاد در محفظه‌ها باوجود چشمه‌های گرمایی مجزا روی دیواره‌های آن توجه نموده‌اند. مروری بر مطالعات انجام‌شده پیرامون این موضوع نشان می‌دهد که اندازه و محل قرارگیری اجزای گرمایی، هر دو بر آهنگ انتقال گرما تأثیرگذار هستند.

امین‌السلطانی و قاسمی [۱]، مسئله‌ی همرفت آزاد در یک

هرگاه بین سطح و سیال مجاور اختلاف دما وجود داشته باشد انتقال گرمای همرفتی اتفاق می‌افتد. همرفت آزاد و تابش در سالهای اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است و این توجه به دلیل وجود این نوع انتقال گرما در طبیعت و نیز کاربردهای آن در مهندسی هست. همچنین این انتقال گرما در جریان‌ات اقیانوسی و همچنین شکل‌گیری بادهای اقیانوسی دیده می‌شود. سالهاست که جابجایی آزاد در محفظه‌های مستطیلی گرم شده، به‌طور چشمگیری مورد توجه محققین واقع شده است. این توجه به دلیل کاربردهای فراوان جابجایی آزاد در زمینه‌های مختلف مهندسی همچون گردآورهای خورشیدی، عایق‌های گرمایی، راکتورهای هسته‌ای، سیستم‌های بهبود گرما،

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: raisi@sku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲

محفظه‌ی مربعی با دیواره‌های افقی عایق، دیواره چپ سرد و یک‌المان گرمایی با شار نوسانی روی دیواره راست را به روش عددی بررسی کردند. آن‌ها ضمن مشاهده میدان جریان و دمای نوسانی درون محفظه، دریافتند که مکان بهینه‌ی المان گرمایی تابعی از عدد رایلی است.

اوکاروچ و همکاران [۲]، بررسی عددی سه‌بعدی انتقال گرمای رسانشی، همرفت آزاد و تابش داخل حفره‌های دیواره‌های ساختمان را انجام دادند. آن‌ها نشان دادند زمانی که تبادل تابش در نظر گرفته شود انتقال گرما از طریق ساختارهای حفره‌دار به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین تجزیه و تحلیل انتقال گرما از طریق ساختار متشکل از یک قسمت عمودی رسانای گرمایی و دو حفره نشان می‌دهد که تبادل گرمای رسانشی بیش از نیمی از کل شار گرمایی می‌باشد.

کاری و همکاران [۳]، مطالعه اثر موانع آدیاباتیک مربعی شکل را بر روی همرفت آزاد در یک حفره مربعی در اعداد رایلی مختلف انجام دادند. آن‌ها با بررسی اثر اندازه مانع عایق به این نتیجه رسیدند که اندازه مانع در رابطه با آهنگ انتقال گرما دارای یک مقدار بهینه است.

خاتمی‌فر و همکاران [۴]، بررسی انتقال گرمای ترکیبی همرفت آزاد و رسانش را درون یک محفظه که توسط یک قسمت هادی گرما به دو قسمت تقسیم شده بود انجام دادند. آن‌ها با روش حجم محدود برای اعداد رایلی مختلف به این نتیجه رسیدند که میانگین عدد ناسلت، با افزایش عدد رایلی، افزایش می‌یابد اما با افزایش ضخامت قسمت‌ها کاهش می‌یابد.

داس و همکاران [۵]، مطالعه روی انتقال گرمای همرفت آزاد در محفظه‌های با شکل دلخواه را انجام دادند. در این بررسی برای مثال برای محفظه مثلثی بیشترین انتقال گرما از طریق رسانش در اعداد پرناتل و رایلی پایین اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر، در اعداد رایلی بالا، همرفت تأثیر بیشتری دارد.

ساراووان و سیواراج [۶]، بررسی انتقال گرمای ترکیبی همرفت طبیعی و تابش را در یک حفره مربعی با یک صفحه گرم شده غیر یکنواخت در مرکز آن را انجام دادند. آن‌ها با روش عددی حجم محدود مسئله را بررسی کرده و به این نتیجه رسیدند که انتشار پذیری و طول صفحه، انتقال گرمای کلی در حفره را افزایش می‌دهد.

فروزان نیا و همکاران [۷]، انتقال گرمای ترکیبی تابش و همرفت آزاد را درون یک محفظه با یک بلوک توخالی دارای تولید انرژی، مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تأثیر وجود تابش باعث کاهش جریان همرفت داخل و خارج محفظه می‌گردد و باعث خنک‌سازی یکنواخت دیواره‌های سرد حفره می‌شود. همچنین استفاده از سطح دارای تابش بالاتر منجر به دمای بیشینه کمتری می‌شود و زودتر حالت پایدار حاصل می‌شود و میزان خنک‌سازی را تا ۵۰٪ افزایش می‌یابد.

میروشنیچنکو و شرمث [۸]، انتقال گرمای همرفت طبیعی مغشوش را درون یک محفظه مستطیلی با استفاده از روش‌های عددی و تجربی مطالعه کردند. در یک بررسی کلی از انتقال گرمای همرفت آزاد در محفظه‌های مستطیلی، انواع حالات مختلف این محفظه‌ها را به‌صورت دوبعدی و با روش‌های اختلاف محدود، روش کنترل حجم، روش شبکه بولتزمن و تکنیک‌های مختلف تجربی بررسی کرده و مطالعه تابش سطحی و شرایط مرزی مختلف را روی انواع این حالات

انجام دادند.

مارتیوشف و شرمث [۹]، انتقال گرمای ترکیبی همرفت آزاد و تابش سطحی را در حفره‌ی پر از هوا به همراه منبع گرمایی به روش اختلاف محدود بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که عدد ناسلت همرفت، با نسبت رسانایی گرمایی و عدد رایلی افزایش می‌یابد و با تابش سطحی کاهش می‌یابد.

مهریان و همکاران [۱۰]، برهم‌کنش سیال و جامد را درون یک محفظه دوزنقه‌ای شکل که توسط یک قسمت انعطاف‌پذیر به دو قسمت تقسیم‌شده بود با استفاده از روش عددی المان محدود بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که افزایش عدد رایلی از 10^4 به 10^7 ، باعث افزایش آهنگ انتقال گرما در محفظه تا ۸ برابر می‌گردد.

یانگ و وو [۱۱]، اثرات همرفت طبیعی، رسانش در دیواره‌ها و تابش را بر روی یکنواختی انتقال گرما در یک صفحه گرم شده و قرار گرفته در کف یک محفظه مستطیلی سه‌بعدی بررسی کردند. آن‌ها مسئله را به ازای مقادیر مختلف عدد رایلی، ضریب صدور سطح و رسانایی گرمایی دیواره‌ها حل کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش تابش، همرفت طبیعی را مهار می‌کند اما باعث افزایش انتقال گرمای کلی و یکنواختی آن می‌شود.

وانگ و همکاران [۱۲]، بررسی عددی تأثیر انتقال گرمای ترکیبی همرفت آزاد و تابش سطحی در یک حفره نیم‌کره‌ای باز و تخمین زمان خنک‌سازی آن را با استفاده از ANSYS-Fluent 15.0 و نیز بررسی اثر پارامترهایی نظیر عدد رایلی، دمای سطح و شعاع انحنا انجام دادند. برای همه موارد، تأثیر آهنگ انتقال گرمای تابشی بیشتر از آهنگ انتقال گرمای همرفتی در یک شرایط مشخص است. آن‌ها مشاهده کردند که زمان خنک‌سازی تخمین زده شده با تابش بسیار کمتر از زمان بدون تابش (فقط همرفت) است. این نشان می‌دهد که اثر تابش باید برای مسائل مشابه در نظر گرفته شود.

رنجان و همکاران [۱۳]، بررسی یک مطالعه عددی از همرفت طبیعی و تابش سطحی در یک حفره‌ی استوانه‌ای با صفحه گرم قرار داده شده در داخل آن با استفاده از نرم افزار OpenFOAM را انجام دادند. اثرات عدد رایلی، زاویه انحراف، و ضریب انتشار سطح روی مولفه‌های سرعت، میدان دما و عدد ناسلت با جزئیات بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که عدد رایلی تأثیر بیشتری بر انتقال گرمای تابشی نسبت به همرفت طبیعی دارد. همچنین انتقال گرمای تابشی با افزایش گسیل سطح به طور یکنواخت افزایش می‌یابد و سهم آن می‌تواند بیش از ۵۰ درصد از کل آهنگ انتقال گرما باشد.

با توجه به بررسی پژوهش‌های پیشین و با توجه به اهمیت انتقال گرمای ترکیبی همرفت طبیعی، رسانش و تابش، اخیراً محققان مسائلی از این دست را مورد توجه قرار داده‌اند، اما با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق برای حفره‌های پر شده با گازهای مختلف، دیواره‌ها با رسانایی گرمایی مختلف و همچنین تغییر ابعاد حفره‌ها، یک مطالعه کلی صورت می‌گیرد و اثر پارامترهای مختلف بر روی رسانایی گرمایی معادل بررسی می‌شود. همچنین در پژوهش‌های بررسی شده مشخص شد که با هر سه مکانیزم انتقال گرما به‌صورت هم‌زمان مورد تحلیل انجام نگرفته است و یا بررسی همزمان پارامترهای رسانش و تابش صورت نگرفته است. همچنین بررسی محفظه دارای دو حفره‌ی مجزا در این پژوهش‌ها انجام نشده است که در پژوهش حاضر به این موارد

عدد ناسلت جایجایی به صورت رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$Nu_{conv} = \frac{hl}{k} \quad (22)$$

در رابطه (۲۲)، h ضریب انتقال گرمای همرفتی است که با استفاده از رابطه (۲۳) بدست می‌آید.

$$h = \frac{-\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_{n=n_c}}{T_h - T_c} \quad (23)$$

در رابطه (۲۳)، n مختصه عمود بر سطوح داخلی حفره است که برای دیوارهای عمودی برابر x و برای دیوارهای افقی برابر y می‌شود و n_c مقدار این پارامتر بر روی دیوارهای داخلی حفره است. با جای‌گذاری رابطه (۲۳) در رابطه (۲۲) و استفاده از پارامترهای بی‌بعد، روابط (۲۴) و (۲۵) برای عدد ناسلت همرفت موضعی بدست می‌آیند.

$$Nu_{conv} = -\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=X_c} \quad \text{برای دیوارهای عمودی} \quad (24)$$

$$Nu_{conv} = -\left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)_{Y=Y_c} \quad \text{برای دیوارهای افقی} \quad (25)$$

با انتگرال‌گیری از عدد ناسلت موضعی روی سطوح دیوارهای داخلی، عدد ناسلت متوسط همرفت به ترتیب برای دیوارهای عمودی و افقی مطابق روابط (۲۶) و (۲۷) بدست می‌آید.

$$\overline{Nu}_{conv} = -\frac{1}{B} \int_0^B \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=X_c} dY \quad (26)$$

$$\overline{Nu}_{conv} = -\frac{1}{A} \int_0^A \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)_{Y=Y_c} dX \quad (27)$$

عدد ناسلت تابشی بیانگر نسبت انتقال گرمای تابشی به انتقال گرمای رسانشی در عرض محفظه است و توسط رابطه (۲۸) بیان می‌شود.

$$Nu_{rad} = \frac{q_{rad}}{k_f \frac{T_h - T_c}{l}} = N_r Q_{rad} \quad (28)$$

با انتگرال‌گیری از عدد ناسلت موضعی روی سطوح داخلی حفره‌ها، عدد ناسلت متوسط تابشی به ترتیب برای دیوارهای عمودی و افقی توسط روابط (۲۹) و (۳۰) بدست می‌آید.

$$\overline{Nu}_{rad} = -\frac{N_r}{B} \int_0^B Q_{rad} dY \quad (29)$$

$$\overline{Nu}_{rad} = -\frac{N_r}{A} \int_0^A Q_{rad} dX \quad (30)$$

۳-۲- روش حل

به‌منظور حل معادلات اساسی حاکم بر مسئله با استفاده از نرم‌افزار Comsol و استفاده از روش باقی‌مانده‌های وزنی گالرکین بر اساس المان محدود که یکی از رایج‌ترین روش‌های عددی برای حل مسائل مهندسی و مدل‌های ریاضی است استفاده گردیده است. توابع وزنی به‌صورت زیر جهت حداقل نمودن باقی‌مانده‌های متغیرهای میدانی به‌کار گرفته شده‌اند:

$$\int_{\Omega} wf(x) R.d\omega = \int_C of(x) Res.d \in \quad (31)$$

که در آن C , wf , Res , $\in \Omega$ به ترتیب متغیر مکانی، باقیمانده، تابع

$$\begin{aligned} X &= \frac{x}{l}; Y = \frac{y}{l}; Y1 = \frac{y1}{l}; X2 = \frac{x2}{l}; Y2 = \frac{y2}{l}; \\ H &= \frac{h}{l}; L = \frac{l}{l}; U = \frac{ul}{\alpha}; V = \frac{vl}{\alpha}; P = \frac{pl^2}{\rho \alpha^2}; \\ \theta &= \frac{T - T_c}{T_h - T_c}; AR = \frac{a}{b}; \Theta = \frac{T_k}{T_h}; \Psi = \frac{\psi}{\alpha}; \\ Q_{rad} &= \frac{q_{rad}}{\sigma T_h^4}; N_r = \frac{\sigma T_h^4 l}{k_f (T_h - T_c)}; R_k = \frac{q_{ok}}{\sigma T_h^4}; I_k = \frac{q_{ik}}{\sigma T_h^4} \end{aligned} \quad (11)$$

که پارامترهای Q_{rad} , θ , Ψ , P , V , U به ترتیب نشان‌دهنده‌ی بی‌بعد پارامترهای سرعت، تابع جریان، فشار، دما و شار تابشی، پارامترهای X و Y نشان‌دهنده مختصات بی‌بعد مربوط به هندسه مسئله، N_r عددی موسوم به عدد تابشی، R_k شار تابشی بی‌بعد خروجی از سطح، I_k شار تابشی بی‌بعد ورودی به سطح و θ دمای بی‌بعد تابشی می‌باشد.

با استفاده از موارد بالا، معادلات بی‌بعد به‌صورت زیر خواهند شد:

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

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + Pr \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (13)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Pr \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + RaPr\theta \quad (14)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} = 0 \quad (16)$$

$$Q_{rad,k} = R_k - I_k \quad k = 1, \dots, N \quad (17)$$

$$I_k = \sum_{j=1}^N F_{kj} R_j \quad k = 1, \dots, N \quad (18)$$

$$R_k - (1 - \epsilon_k) \sum_{j=1}^N F_{kj} R_j = \epsilon_k \Theta_k^4 \quad k = 1, \dots, N \quad (19)$$

با توجه به پارامترهای بی‌بعد گفته شده، شرایط مرزی به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

الف) شرایط مرزی جداره بیرونی محفظه:

- 1) at $X = 0$ & $0 \leq Y \leq H$; $\theta = 1$; $U = V = 0$
- 2) at $X = 1$ & $0 \leq Y \leq H$; $\theta = 0$; $U = V = 0$
- 3) at $0 \leq X \leq 1$ & $Y = 0$; $\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$; $U = V = 0$
- 4) at $0 \leq X \leq 1$ & $Y = H$; $\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$; $U = V = 0$

ب) شرایط مرزی داخل حفره‌ها:

$$k \frac{\partial \theta_s}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} - N_r Q_{rad} \quad (21)$$

که در این مورد نیز پایین نویس s نمایانگر بلوک جامد و k^* نسبت رسانایی گرمایی در بلوک جامد به رسانایی گرمایی سیال می‌باشد. پس از حل عددی معادلات حاکم، عدد ناسلت به عنوان معیاری از آهنگ انتقال گرما به شرح زیر قابل محاسبه است. در مسئله حاضر به دلیل اینکه درون حفره‌ها هم انتقال گرمای همرفتی و هم انتقال گرمای تابشی وجود دارد، عدد ناسلت برای انتقال گرمای همرفتی و تابشی به صورت جداگانه تعریف می‌شود و با استفاده از آن‌ها عدد ناسلت کلی بدست می‌آید.

این زمینه استفاده شده است.

الف) بررسی مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی کار حاضر با نتایج ارائه شده توسط مرجع [۱۴]، که بررسی انتقال گرمای همرفت طبیعی در داخل یک حفره مربعی حاوی سیال و یک پره روی دیواره ی گرم می باشد، انجام شده است و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- بررسی استقلال حل از شبکه

تعداد شبکه	ناسلت همرفت میانگین	خطای نسبی	بیشینه تابع جریان (Ψ_{max})	خطای نسبی
۱۳۷۸	۱/۳۵۳۰۴	-	۱/۸۶۰۳	-
۳۰۲۶	۱/۳۵۴۴۵	۰/۱۱	۱/۸۷۰۲۴	۰/۵۳
۵۹۲۲	۱/۳۵۷۷۲	۰/۲۶	۱/۸۸۱۵۵	۰/۶
۱۶۳۷۸	۱/۳۵۹۱۰	۰/۱۱	۱/۸۸۷۴۶	۰/۳۱
۲۰۷۲۴	۱/۳۵۹۴	۰/۲۴	۱/۸۸۹۲۷	۰/۰۹۶

جدول ۲- اعداد ناسلت کار حاضر و پژوهش [۱۴]

عدد رایلی	ناسلت متوسط پژوهش حاضر	ناسلت متوسط پژوهش [۱۴]	درصد خطا
10^4	۲/۳۴۸	۲/۲۴۵	۰/۱
10^5	۴/۵۳۱	۴/۵۲۱	۰/۳
10^6	۸/۸۳۹	۹/۸۰۰	۰/۴

با توجه به نتایج، بیشینه خطا، ۰/۴ درصد می باشد و نتایج کار حاضر با نتایج ارائه شده در مرجع [۱۴] تطابق قابل قبولی دارند. (ب) بررسی و مقایسه نتایج کار حاضر با مقاله ارائه شده توسط مرجع [۱۵] که انتقال گرمای همرفتی و رسانی در یک محفظه شامل حفره حاوی سیال می باشد. به همین منظور نتایج در جدول ۳ آورده شده است. نکته قابل ذکر اینکه این نتایج برای $k = 10$ و رایلی های مختلف انجام گرفته است.

جدول ۳- اعداد ناسلت میانگین کار حاضر و پژوهش [۱۵]

عدد رایلی	ناسلت متوسط پژوهش حاضر	ناسلت متوسط [۱۵]	درصد خطا
1.667×10^4	1.326187	1.338039	0.8
1.667×10^5	2.221899	2.258457	1.6
1.667×10^6	3.752324	3.753999	0.04

(ج) بررسی و مقایسه نتایج کار حاضر با پژوهش ارائه شده توسط مرجع [۱۶] که انتقال گرمای همرفتی، رسانی و تابشی درون یک محفظه را نشان می دهد و نتایج مربوط به عدد ناسلت میانگین در جدول ۴ آورده شده است. نتایج انجام شده برای $Pr = 0.71$ ، $\varepsilon = 1$ و $k^* = 10$ و برای رایلی های مختلف انجام شده است.

جدول ۴- اعداد ناسلت میانگین کار حاضر و پژوهش [۱۶]

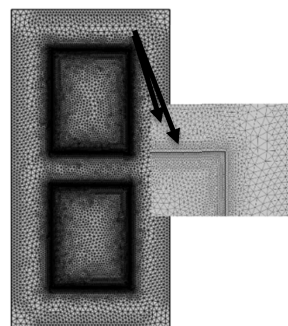
عدد رایلی	ناسلت متوسط دیواره گرم پژوهش [۱۶]	ناسلت متوسط دیواره گرم	درصد خطا
10^4	1.112	1.0879	2.1
10^5	1.382	1.4009	1.3
10^6	3.210	3.2040	0.19

وزنی و کل دامنه می باشد. تبدیل مشتقات جزئی به معادلات انتگرالی با استفاده از روش باقیمانده انجام گرفته و روش تکراری نیوتن-رافسون جهت حل این معادلات استفاده شده است. برای تمامی شبیه سازی های انجام شده، خطای عددی برای هر متغیر میدانی بایستی شرط زیر را ارضاء نماید:

$$\sum_{i,j} |\phi_{i,j}^m - \phi_{i,j}^{m-1}| \quad (32)$$

$$\sum_{i,j} |\phi_{i,j}^m|$$

که در اینجا ϕ نشانگر سرعت یا دما (u, v, T) ، m نشانگر تعداد تکرار و i, j نشانگر مختصات برداری در راستای x, y می باشد. گسسته سازی های متغیرهای سرعت و فشار با استفاده از المان محدود لاگرانژی به روش P2-P1 انجام گرفته است. حل عددی معادلات فوق به روش گالریکین با استفاده از نرم افزار 6.1 Comsol Multiphysics انجام گرفته است. شبکه بندی نامنظم مثلثی، برای دامنه ی محاسباتی در شکل ۳ نشان داده شده است. این شبکه در نزدیکی دیواره ها به منظور محاسبه ی گرادین های شدیدتر، دارای تراکم بیشتری می باشد.



شکل ۳- شبکه بندی دامنه محاسباتی بر روی محفظه شامل دو حفره

۳- اعتبار سنجی

۳-۱- بررسی استقلال حل از شبکه

گام نخست در حل عددی هر مسئله، شبکه بندی آن مسئله می باشد. شبکه بندی از این لحاظ اهمیت دارد که هم به طور مستقیم بر روی دقت و صحت حل عددی تأثیر می گذارد و هم بر روی هزینه های محاسباتی تأثیر می گذارد. بنابراین در این پژوهش به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، برای حالت $k^* = 50$ ، $\varepsilon = 0.7$ و $Ra = 10^4$ ، شش شبکه مختلف مورد بررسی قرار گرفته است و برای هر شبکه بیشینه تابع جریان و مقدار ناسلت همرفت متوسط روی دیوارهای داخلی حفره ها محاسبه شده است و درصد تغییرات نسبت به حالت قبل برای هر یک آورده شده است. نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به جدول ۱ می توان دریافت که برای شبکه با ۱۶۳۷۸ المان، حل مستقل از شبکه شده است. لذا این شبکه برای ادامه پژوهش انتخاب می شود.

۳-۲- اعتبار سنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل ارائه شده، از پژوهش های انجام شده در

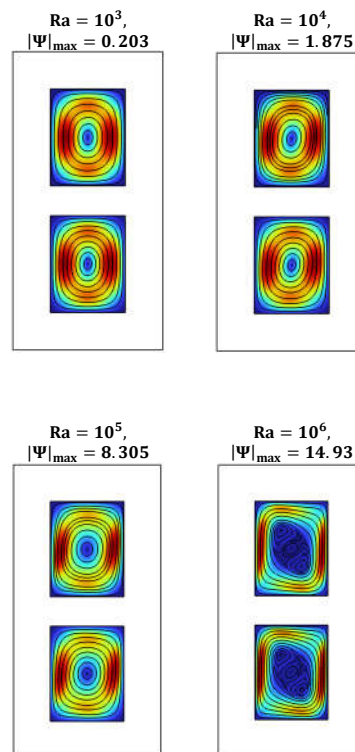
۴- نتایج

پس از بررسی استقلال حل از شبکه و اعتبارسنجی روش حل، نتایج در چهار بخش ارائه می‌شود. نتایج این بخش با نسبت ابعاد $L = \frac{1}{1} = 1$ و $H = \frac{2}{1} = 2$ و $\frac{a}{1} = 0.5$ و $\frac{b}{1} = 0.65$ و $\frac{a}{b} = 0.77$ و اعداد رایلی، ضرایب صدور و ضرایب رسانش مختلف بررسی شده است.

۴-۱- بررسی اثر عدد رایلی

در این بخش با تغییر عدد رایلی در محدوده $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ و $k^* = 50$ و $\varepsilon = 0.6$ ، اثر عدد رایلی بر روی میدان‌های جریان و دما و آهنگ انتقال گرما بررسی می‌شود.

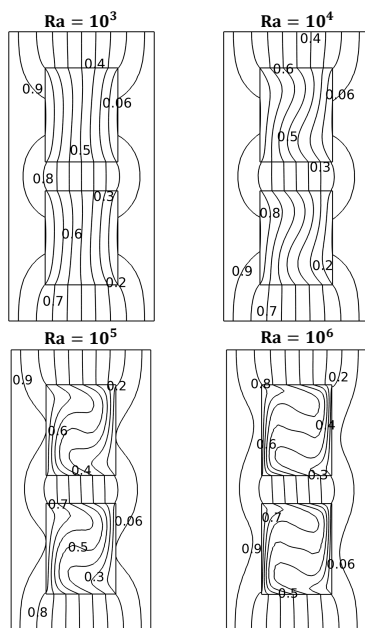
در شکل ۴ خطوط جریان برای مقادیر مختلف عدد رایلی نشان داده شده است. برای تمام مقادیر عدد رایلی یک گردابه ساعت‌گرد درون حفره‌ها تشکیل شده است. با افزایش عدد رایلی قدرت گردابه‌های تشکیل شده افزایش می‌یابد. افزایش قدرت گردابه‌ها سبب افزایش سرعت جریان در مجاور دیوارهای حفره‌ها می‌شود و تراکم خطوط جریان در کنار دیوارها افزایش می‌یابد.



شکل ۴- خطوط جریان برای مقادیر مختلف عدد رایلی ($k^* = 50, \varepsilon = 0.6$)

در شکل ۵ خطوط هم‌دما برای مقادیر مختلف عدد رایلی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، دیده می‌شود که خطوط هم‌دما بر مرزهای افقی بلوک جامد عمود هستند که به دلیل عایق بودن این سطوح است. در قسمت‌های جامد بلوک که انتقال گرما به صورت رسانشی انجام می‌شود، خطوط هم‌دما خیلی تحت تأثیر تغییرات عدد رایلی قرار نمی‌گیرد. خطوط هم‌دما در درون حفره برای $Ra = 10^3$ تقریباً به موازات دیوارهای عمودی حفره هستند. به عبارت دیگر برای

این عدد رایلی انتقال گرما درون حفره نیز به صورت رسانشی انجام می‌گیرد. با افزایش عدد رایلی الگوی خطوط هم‌دما درون حفره‌ها تغییر می‌کند و انتقال گرمای همرفت طبیعی درون حفره‌ها حاکم می‌شود. همچنین با افزایش عدد رایلی گرادیان دما در مجاورت دیوارهای عمودی حفره‌ها افزایش می‌یابد که نشان از تقویت همرفت طبیعی دارد.



شکل ۵- خطوط هم‌دما برای مقادیر مختلف عدد رایلی ($k^* = 50, \varepsilon = 0.6$)

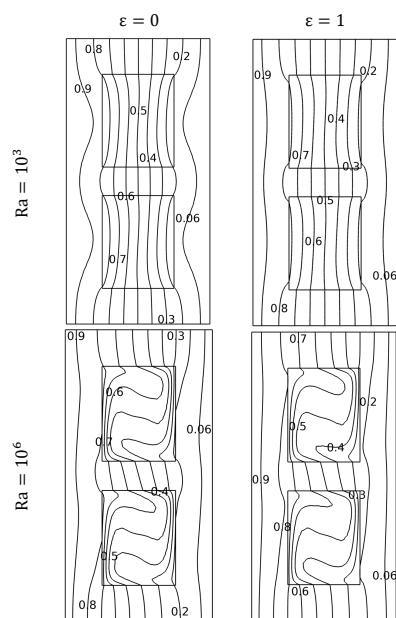
در شکل ۶ عدد ناسلت موضعی همرفت روی دیوار سمت چپ حفره بالایی نشان داده شده است. البته به دلیل تقارن نتایج برای حفره پایینی نیز مشابه هستند. با توجه به این شکل دیده می‌شود که با افزایش عدد رایلی به دلیل افزایش نیروی شناوری عدد ناسلت موضعی روی دیوار سمت چپ افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که بر روی دیوار سمت چپ با حرکت به سمت بالای حفره (با افزایش Y)، عدد ناسلت موضعی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این رفتار عدد ناسلت موضعی ناشی از دو علت است. اول آن که گردابه تشکیل شده در داخل حفره به خوبی به داخل گوشه‌های حفره نفوذ نمی‌کند و تبادل گرما بین سیال در حال جریان و سطوح حفره در این نواحی کاهش می‌یابد و دوم اینکه انتقال گرمای رسانشی در دیوارهای افقی بلوک جامد سبب می‌شود که دمای سطوح عمودی حفره در نزدیکی گوشه‌های بالایی و پایینی کاهش یابد و اختلاف دمای کم بین این قسمت از سطوح و سیال مجاور سبب کاهش انتقال گرمای همرفت و عدد ناسلت موضعی می‌شود.

در شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت موضعی تابشی روی دیوار سمت چپ حفره بالایی برای اعداد رایلی مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل ۷ در کل تغییرات عدد ناسلت تابشی در مقایسه با عدد ناسلت همرفت ناچیز است. به عبارت دیگر انتقال گرمای تابشی در میزان کل انتقال گرما سهم به‌سزایی ندارد. با این حال تغییرات عدد

۲-۴- بررسی اثر ضریب صدور سطوح حفره

در این بخش ضریب صدور سطوح داخلی حفره دارای مقادیر $0 \leq \varepsilon \leq 1$ می‌باشد و نتایج برای دو مقدار مختلف عدد رایلی $10^3, 10^6$ و $k^* = 10$ ارائه می‌شوند.

در شکل ۸ خطوط هم‌دما داخل بلوک جامد و درون حفره‌ها برای مقادیر ضریب صدور صفر و یک و دو مقدار مختلف عدد رایلی نشان داده شده است. در نظر گرفتن انتقال گرمای تابشی بین سطوح داخلی حفره‌ها باعث می‌شود که اختلاف دمای سطوح کمتر شود. از این‌رو با افزایش ضریب صدور سطوح، گرادیان دما در مجاورت سطوح اندکی کاهش می‌یابد. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش ضریب صدور، آهنگ انتقال گرمای همرفتی کاهش یابد.



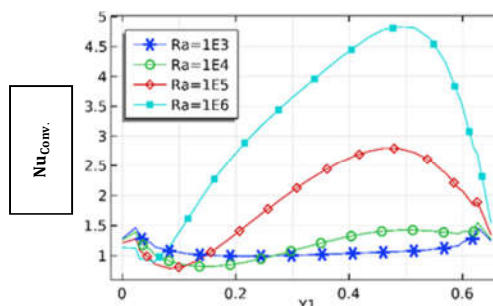
شکل ۸- خطوط هم‌دما برای مقادیر مختلف عدد رایلی و ضریب صدور سطوح حفره ($k^* = 10$)

در جدول ۶ بیشینه مقدار تابع جریان در دو مقدار مختلف عدد رایلی و مقادیر مختلف ضریب صدور ارائه شده است. با توجه به اینکه با افزایش ضریب صدور اختلاف دمای سطوح و نیروی شناوری کاهش می‌یابد، بنابراین افزایش ضریب صدور، همرفت طبیعی را در داخل حفره‌ها کاهش می‌دهد و قدرت گردابه‌های تشکیل شده را تضعیف می‌کند. البته تضعیف همرفت طبیعی ناشی از افزایش ضریب صدور، قابل ملاحظه نیست.

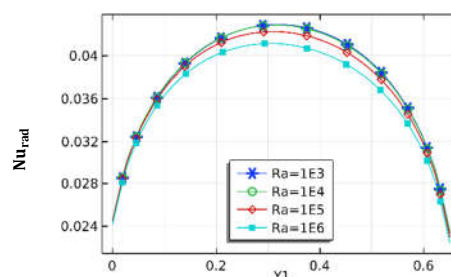
جدول ۶- مقدار بیشینه تابع جریان برای مقادیر مختلف عدد رایلی و ضریب صدور سطوح حفره ($k^* = 10$)

ε	Ra	$ \psi _{max}$		
		۰	۰/۴	۰/۶
10^3		۰/۱۹۴۵	۰/۱۸۴۳	۰/۱۷۷۸
10^6		۱۳/۰۵۷	۱۳/۰۱۹	۱۲/۹۸۱

ناسلت تابشی به گونه‌ای است که در قسمت‌های فوقانی و پایینی سمت چپ حفره مقدار آن کم است و در قسمت میانی سطح بیشترین مقدار را دارد. در قسمت میانی سطح دمای سطح نسبت به قسمت‌های پایینی و بالای آن بیشتر است و همچنین قسمت میانی سطح نسبت به سطوح دیگر حفره، ضریب شکل بزرگتری می‌بیند و تبادل تابش با سطوح دیگر بهتر صورت می‌گیرد. همچنین شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش عدد رایلی عدد ناسلت تابشی کاهش می‌یابد. افزایش عدد رایلی سبب تقویت همرفت طبیعی و کاهش اختلاف دمای سطوح حفره می‌شود، بنابراین عدد ناسلت تابشی را کاهش می‌دهد.



شکل ۶- تغییرات ناسلت همرفت موضعی بر روی سطح سمت چپ حفره بالایی برای اعداد رایلی مختلف ($k^* = 50, \varepsilon = 0.6$)



شکل ۷- تغییرات ناسلت موضعی تابشی بر روی دیوار سمت چپ حفره بالایی برای مقادیر مختلف عدد رایلی ($k^* = 50, \varepsilon = 0.6$)

در جدول ۵ عدد ناسلت میانگین روی سطوح سمت چپ و راست حفره و روی همه سطوح برای اعداد رایلی مختلف نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارائه شده دیده می‌شود که با افزایش عدد رایلی، عدد ناسلت متوسط روی همه سطوح افزایش می‌یابد. عدد ناسلت میانگین دیوار سمت راست اندکی بیشتر از عدد ناسلت میانگین برای دیوار سمت چپ است و دلیل آن اختلاف در عدد ناسلت تابشی این سطوح است.

جدول ۵- عدد ناسلت میانگین برای اعداد رایلی مختلف

($k^* = 50, \varepsilon = 0.6$)

عدد رایلی	ناسلت میانگین همه سطوح	ناسلت میانگین سطح سرد	ناسلت میانگین سطح گرم
10^3	۱/۲۰۷۴	۱/۰۹۱۷	۱/۰۸۹۷
10^4	۱/۲۵۶۶	۱/۱۸۶۵	۱/۱۷۱۱
10^5	۱/۶۶۶۱	۱/۹۳۶۸	۱/۸۸۶۰
10^6	۲/۴۱۵۸	۳/۳۰۵۲	۳/۱۹۹۷

جدول ۷- اعداد ناسلت همرفت میانگین بر روی هر چهار سطح حفره

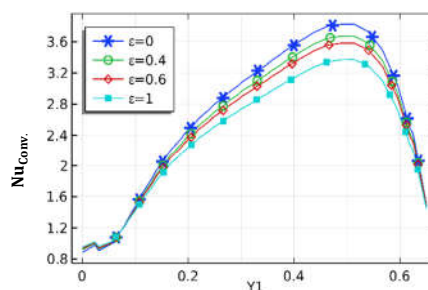
در $k^* = 10$					
عدد رایلی	ضریب صدور	ناسلت همرفت	عدد رایلی	ضریب صدور	ناسلت همرفت
10^3	۰	۱/۱۸۴۲	10^6	۰	۲/۱۱۹۵
	۰/۴	۱/۱۶۱۸		۰/۴	۲/۰۴۴۹
	۰/۶	۱/۱۴۹۸		۰/۶	۲/۰۰۳۸
	۱	۱/۱۲۲۸		۱	۱/۹۱

۴-۳- بررسی اثر نسبت رسانایی گرمایی، k^*

با توجه به آنچه گفته شد برای بررسی اثر رسانایی گرمایی، نمی‌توان فقط به ضرایب رسانش بلوک جامد اکتفا کرد چرا که در روابط موجود برای حل مسئله، در معادله رسانش بلوک جامد، رسانایی گرمایی ظاهر نمی‌گردد و حذف می‌شود و بنابراین باید به شرایط مرزی رجوع کرد که با توجه به شرط مرزی در مرز جامد، دیواره داخل حفره (دیواره سمت چپ یا دیواره‌ی داغ)، می‌توان دریافت که هر دو رسانایی گرمایی جامد و سیال ظاهر می‌گردند (شکل ۳) بنابراین در معادلات بی‌بعد شده می‌توان از نسبت رسانایی گرمایی جامد به سیال تحت عنوان k^* استفاده کرد. لذا در اینجا نیز اثر تغییرات این نسبت بررسی گردیده است. در این بخش ضریب صدور ثابت در نظر گرفته می‌شود ($\varepsilon = 0.6$) و نتایج برای دو مقدار مختلف عدد رایلی ($Ra = 10^3, 10^6$) و مقادیر مختلف نسبت رسانایی گرمایی ارائه می‌شود.

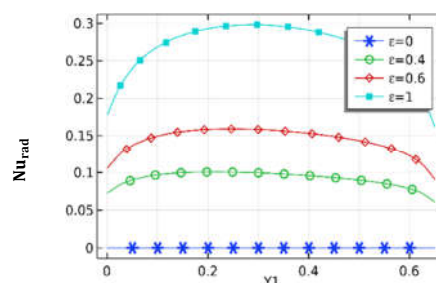
در شکل ۱۱ خطوط هم‌دما در بلوک جامد و سیال داخل حفره‌ها نشان داده شده است. افزایش نسبت رسانایی گرمایی سبب افزایش دمای سطح سمت چپ حفره می‌شود و بنابراین اختلاف دمای سطوح چپ و راست حفره افزایش می‌یابد. در این شکل همچنین دیده می‌شود که با افزایش k^* ، گرادیان دما در مجاورت سطوح حفره زیاد می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش نسبت رسانایی گرمایی، همرفت طبیعی داخل حفره تقویت شود.

در شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت موضعی همرفت در $Ra = 10^6$ و برای مقادیر مختلف ضریب صدور بر روی سطح سمت چپ حفره بالایی نشان داده شده است. در این شکل کاهش عدد ناسلت همرفت با افزایش ضریب صدور این مطلب را تأیید می‌کند که در نظر گرفتن انتقال گرمای تابشی سطحی، همرفت طبیعی را تضعیف می‌کند. در شکل ۱۰ تغییرات عدد ناسلت موضعی تابشی بر روی سطح سمت چپ حفره بالایی برای $Ra = 10^6$ و مقادیر مختلف ضریب صدور نشان داده شده است. افزایش ضریب صدور سبب افزایش آهنگ انتقال گرمای تابشی از سطح سمت چپ که در واقع سطح داغ حفره است می‌شود. در نزدیکی گوشه‌های پایینی و بالایی حفره انتقال گرمای رسانشی در بلوک جامد سبب کاهش دمای سطح می‌شود و بنابراین آهنگ انتقال گرمای تابشی در این نواحی هم به دلیل دمای پایین و هم به دلیل کوچک بودن ضریب دید، کاهش می‌یابد. در جدول ۷ عدد ناسلت همرفت میانگین روی تمام سطوح داخلی حفره بالایی ارائه شده است. نتایج ارائه شده در جدول، کاهش عدد ناسلت میانگین با افزایش ضریب صدور را نشان می‌دهد، در نتیجه با افزایش عدد رایلی، عدد ناسلت میانگین (با افزایش ضریب صدور) مقدار بیشتری کاهش می‌یابد.



شکل ۹- تغییرات عدد ناسلت موضعی همرفت بر روی سطح سمت

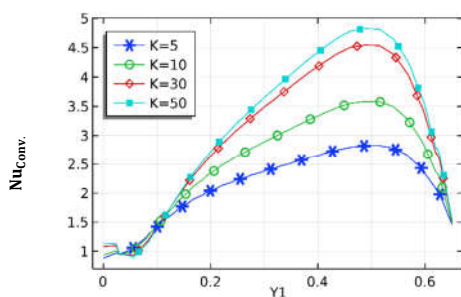
چپ حفره برای $Ra = 10^6$ و $k^* = 10$



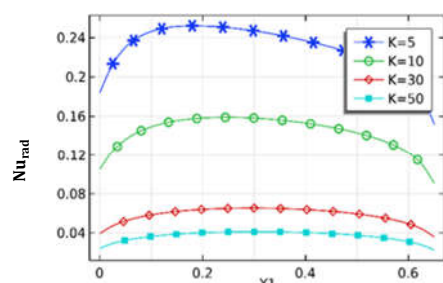
شکل ۱۰- تغییرات عدد ناسلت موضعی تابشی بر روی سطح سمت

چپ حفره برای $Ra = 10^6$ و $k^* = 10$

را تقویت می‌کند و تاثیر همزمان افزایش عدد رابلی و k^* باعث می‌شود درصد افزایش ناسلت همرفت میانگین در اعداد رابلی بالاتر، قابل ملاحظه باشد.



شکل ۱۲- تغییرات عدد ناسلت همرفت موضعی برای مقادیر مختلف نسبت رسانایی گرمایی ($Ra = 10^6$, $\varepsilon = 0.6$)



شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت تابشی موضعی برای مقادیر مختلف نسبت رسانایی گرمایی ($Ra = 10^6$, $\varepsilon = 0.6$)

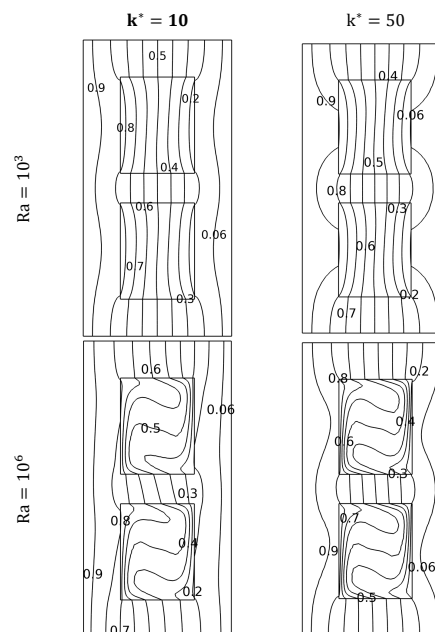
جدول ۹- ناسلت همرفت میانگین بر روی سطوح داخلی حفره برای مقادیر مختلف نسبت رسانایی گرمایی

Nu_{conv}	k^*	Ra	Nu_{conv}	k^*	Ra
۲/۰۰۳۸	۱۰	10^6	۱/۱۴۹۸	۱۰	10^3
۲/۳۲۹۷	۳۰		۱/۱۹۶۷	۳۰	
۲/۴۱۵۸	۵۰		۱/۲۰۷۴	۵۰	

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از روش المان محدود و نرم‌افزار 6.1 Comsol Multiphysics به مطالعه تأثیر انتقال گرمای تابشی، رسانش و همرفت طبیعی در حفره‌های پر از گاز واقع در یک بلوک جامد به‌صورت دوبعدی پرداخته شده است. برای این منظور اثرات گوناگون برای اعداد رابلی مختلف، ضریب صدورهای گوناگون و ضرایب رسانش مختلف بر روی مشخصه‌های جریان و انتقال گرما بررسی شده است. مشخصات جریان و انتقال گرما برای مقادیر مختلف اعداد رابلی $10^3 \leq Ra \leq 10^6$ ، ضریب صدور $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ، ضرایب رسانش بی‌بعد مختلف k^* صورت گرفته است. نتایج حاصل را به این صورت می‌توان بیان کرد:

۱- با افزایش عدد رابلی از 10^3 تا 10^6 قدرت گردابه‌های تشکیل شده در درون حفره‌ها افزایش می‌یابد که سبب افزایش سرعت جریان در مجاور دیواره‌های حفره‌ها می‌شود و تراکم خطوط جریان در کنار



شکل ۱۱- خطوط هم‌دما برای مقادیر مختلف عدد رابلی و نسبت رسانایی گرمایی ($\varepsilon = 0.6$)

در جدول ۸ بیشینه مقدار تابع جریان برای دو مقدار مختلف عدد رابلی و دو مقدار مختلف نسبت رسانایی گرمایی نشان داده شده است. با توجه به افزایش گردابان دما در مجاورت سطوح حفره با افزایش نسبت رسانایی گرمایی که در شکل ۱۱ مشهود است، گردابه تشکیل شده درون حفره‌ها نیز با افزایش نسبت رسانایی گرمایی تقویت می‌شود و سیال با سرعت بیشتری در مجاورت سطوح حفره‌ها به جریان در می‌آید. بنابراین بیشینه مقدار تابع جریان با افزایش نسبت رسانایی گرمایی افزایش می‌یابد.

جدول ۸- بیشینه مقدار تابع جریان برای مقادیر مختلف عدد رابلی و نسبت رسانایی گرمایی ($\varepsilon = 0.6$)

$ \Psi _{max}$		عدد رابلی
$k^* = 50$	$k^* = 10$	
۰/۳۰۳۴	۰/۱۷۸۷	10^3
۱۴/۸۵۸۱	۱۲/۹۸۱۱	10^6

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، تغییرات عدد ناسلت همرفت و تابشی روی دیوار سمت چپ برای مقادیر مختلف k^* نشان داده شده است. عدد ناسلت همرفت با افزایش k^* (با توجه به تقویت همرفت طبیعی با افزایش نسبت رسانایی گرمایی) افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش رسانایی گرمایی، دمای سطوح افقی حفره‌ها افزایش می‌یابد و اختلاف دمای این سطوح با سطح سمت چپ کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش k^* تبادل تابش بین این سطوح کم می‌شود و عدد ناسلت تابشی کاهش می‌یابد.

در جدول ۹ عدد ناسلت همرفت میانگین بر روی سطوح داخلی حفره برای مقادیر مختلف k^* ارائه شده است. با افزایش k^* ، همرفت طبیعی داخل حفره تقویت می‌شود و عدد ناسلت همرفت میانگین افزایش می‌یابد. افزایش عدد رابلی نیز گردابه تشکیل شده داخل حفره

- partitioned differentially-heated square cavity. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2017 Feb 1;81:92-103.
- [5] Das D, Roy M, Basak T. Studies on natural convection within enclosures of various (non-square) shapes-A review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017 Mar 1;106:356-406.
- [6] Saravanan S, Sivaraj C. Combined natural convection and thermal radiation in a square cavity with a nonuniformly heated plate. *Computers & Fluids*. 2015 Aug 31;117:125-38.
- [7] Nia MF, Ansari AB, Nassab SA. Transient combined volumetric radiation and free convection in a chamber with a hollow heat-generating solid body. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2020 Dec 1;119:104937.
- [8] Miroshnichenko IV, Sheremet MA. Turbulent natural convection heat transfer in rectangular enclosures using experimental and numerical approaches: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018 Feb 1;82:40-59.
- [9] Martyushev SG, Sheremet MA. Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in an air filled cavity with internal heat source. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014 Feb 1;76:51-67.
- [10] Mehryan SA, Ghalambaz M, Feroz RK, Hajjar A, Izadi M. Free convection in a trapezoidal enclosure divided by a flexible partition. *International journal of heat and mass transfer*. 2020 Mar 1;149:119186.
- [11] Yang G, Wu JY. Effects of natural convection, wall thermal conduction, and thermal radiation on heat transfer uniformity at a heated plate located at the bottom of a three-dimensional rectangular enclosure. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2016 Mar 18;69(6):589-606.
- [12] Wang T, Qiu Y, Lei G, Zhang J, Huang Y, Yang G. Transient characteristics of coupled thermal radiation and natural convection in a three-dimensional cylindrical cavity containing a heated plate. *Thermal Science*. 2022(00):135.
- [13] Ranjan Behera B, Chandrakar V, Senapati JR. Numerical analysis of combined free convection and radiation heat transfer from an open hemispherical cavity. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2023 Jan 19:1-8.
- [14] Bilgen E. Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005 Aug 1;48(17):3493-505.
- [15] Zhang W, Zhang C, Xi G. Conjugate conduction-natural convection in an enclosure with time-periodic sidewall temperature and inclination. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2011 Feb 1;32(1):52-64.
- [16] Kim DM, Viskanta R. Effect of wall conduction and radiation on natural convection in a rectangular cavity. *Numerical Heat Transfer*. 1984 Oct 1;7(4):449-70.

دیواره‌ها افزایش می‌یابد به طوری که باعث افزایش بیشینه تابع جریان ($|\Psi|_{max}$) از مقدار 0.203 تا $14/93$ می‌گردد.

۲- انتقال گرمای غالب در درون حفره‌ها برای رایلی 10^3 به صورت رسانی انجام می‌گیرد و در این حالت در دیوارهای جانبی بلوک، انتقال گرمای رسانی به صورت دو بعدی است. با افزایش عدد رایلی از 10^4 تا 10^6 الگوی خطوط هم‌دما درون حفره‌ها تغییر می‌کند و انتقال گرمای همرفت طبیعی درون حفره‌ها حاکم می‌شود و انتقال گرمای رسانی در دیوارهای جانبی تقریباً یک بعدی می‌شود.

۳- با افزایش عدد رایلی، ناسلت همرفت روی دیواره سمت چپ حفره افزایش می‌یابد به طوری که ناسلت همرفت میانگین روی سطح سمت چپ از $1/0897$ برای رایلی 10^3 به $3/1997$ برای رایلی 10^6 افزایش پیدا می‌کند که افزایش 193% را نشان می‌دهد با این حال تغییرات ناسلت تابشی به گونه‌ای است که در قسمت‌های فوقانی و پایینی سطح سمت چپ حفره مقدار آن کم است و در قسمت میانی سطح بیشترین مقدار را دارد اما در کل تغییرات ناسلت تابشی در مقایسه با ناسلت همرفت ناچیز است.

۴- افزایش ضریب صدور باعث افزایش ناسلت تابشی و شار گرمایی تابشی می‌گردد اما با افزایش ضریب صدور سطوح، ناسلت همرفت میانگین روی سطوح در رایلی 10^6 از مقدار $2/1195$ به $1/91$ تغییر پیدا کرده است که تقریباً کاهش 10 درصدی را نشان می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود که با افزایش ضریب صدور آهنگ انتقال گرمای همرفتی کاهش یابد.

۵- با افزایش k^* ، از 10 به 50 ، گرادیان دما در مجاورت سطوح حفره افزایش می‌یابد و قدرت گردابه تشکیل شده درون حفره‌ها زیاد می‌شود و سیال با سرعت بیشتری در مجاورت سطوح حفره‌ها به جریان در می‌آید به طوری که با افزایش بیشینه تابع جریان از $12/9811$ به $14/8581$ ، در رایلی 10^6 ، افزایش حدوداً 14 درصدی را نشان می‌دهد پس همرفت طبیعی داخل حفره‌ها تقویت می‌شود.

۶- با افزایش k^* از 10 به 50 ، دمای سطوح افقی حفره‌ها افزایش می‌یابد و اختلاف دمای این سطوح با سطح سمت چپ کاهش می‌یابد و ناسلت همرفت افزایش می‌یابد به این صورت که در رایلی 10^6 ، ناسلت همرفت میانگین سطوح از $2/038$ به $2/4158$ افزایش می‌یابد که یک افزایش 20 درصدی را نشان می‌دهد اما با افزایش k^* تبادل تابش بین این سطوح کم می‌شود و عدد ناسلت تابشی کاهش می‌یابد، که این کاهش نسبت به عدد ناسلت همرفت ناچیز است.

۶-مراجع

- [1] Ghasemi B, Aminossadati SM. Periodic natural convection in a nanofluid-filled enclosure with oscillating heat flux. *International Journal of Thermal Sciences*. 2010 Jan 1;49(1):1-9.
- [2] Ouakarrouh M, El Azhary K, Laaroussi N, Garoum M, Feiz A. Three-dimensional numerical simulation of conduction, natural convection, and radiation through alveolar building walls. *Case Studies in Construction Materials*. 2019 Dec 1;11:e00249.
- [3] Boukendil M, Abdelbaki A, Zrikem Z. Numerical simulation of coupled heat transfer through double hollow brick walls: Effects of mortar joint thickness and emissivity. *Applied Thermal Engineering*. 2017 Oct 1;125:1228-38.
- [4] Khatamifar M, Lin W, Armfield SW, Holmes D, Kirkpatrick MP. Conjugate natural convection heat transfer in a