

تحلیل قانون دوم برای جابجایی آزاد جریان هوا در محفظه L شکل با یک جسم مولد گرما

کوروش جواهرده^{۱*}، استادیار، حبیب کریمی^۲، مربی
^۱ دانشکده مهندسی مکانیک- دانشگاه گیلان- رشت- ایران
javaherdeh@guilan.ac.ir

^۲ گروه مکانیک- دانشگاه آزاد اسلامی- واحد رودسر- املش- رودسر- ایران
habib_karimi63@yahoo.com

دریافت مقاله: ۹۰/۳/۲ اصلاحیه: ۹۰/۶/۱۲
پذیرش نهایی: ۹۰/۹/۲۳

چکیده: در مقاله حاضر، قانون دوم ترمودینامیک برای جابجایی آزاد جریان هوا در محفظه L شکل با یک جسم رسانای مولد گرما به طور عددی تحلیل شده است. در این تحلیل، معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی با روش حجم محدود و با الگوریتم سیمپلر حل شده است. نتایج با قرار دادن جسم مولد گرما در سه موقعیت متفاوت، برای سه نسبت منطقی متفاوت از محفظه L شکل، در اعداد رایلی مابین 10^3 و 10^5 مطالعه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش عدد رایلی، عدد ناسلت متوسط بر روی پله داغ افزایش می‌یابد. در اعداد رایلی پایین، رسانش مکانیزم غالب، تبادل گرما در محفظه است، اما در اعداد رایلی بالا جابجایی غالب خواهد بود. هنگامی که جسم مولد گرما در مرکز محفظه قرار بگیرد، نرخ انتقال حرارت و تولید آنتروپی کل بیشینه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: جابجایی آزاد، تولید آنتروپی، محفظه، جسم مولد گرما.

۱. مقدمه

جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی سه بعدی را با یک جسم مکعبی تولید کننده گرما در مرکز محفظه، تحلیل عددی کرده‌اند. جریان سیال در محفظه از وجود دو اختلاف دما در محفظه به وجود می‌آید: یکی اختلاف دمای بین دیواره‌های سرد و گرم در طرفین محفظه، و دیگری اختلاف دمای ایجاد شده توسط جسم مولد گرما. در تحقیقی دیگر، از تاپ و بیلگن [۸] به جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی حاوی سیال تولید کننده گرما با یک دیواره ناقص داخلی پرداخته‌اند. دیواره‌های عمودی محفظه دما، ثابت و دیواره‌های افقی، عایق‌اند. دیواره داخلی نیز با دمای سرد در نظر گرفته شده است. نتایج برای مکان‌های متفاوت دیواره داخلی و مقادیر مختلف ارتفاع دیواره داخلی و عدد رایلی جریان به شکل خطوط جریان و خطوط هم‌دما ارائه شده است. لی و ها [۹] جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی با جسم تولید کننده گرما در مرکز محفظه را تحلیل عددی کرده‌اند. دیواره‌های طرفین محفظه، عایق و دیواره‌های پایین و بالا به ترتیب گرم و سردند. نتایج آن‌ها به شکل خطوط هم‌دما، خطوط جریان و تغییر عدد ناسلت متوسط دیواره‌های سرد و گرم در طول زمان ارائه شده است. در اعداد رایلی بالا (حدود 10^6) جریان در داخل محفظه ناپایدار است و هر چه میزان تولید حرارت در جسم مولد گرما بیشتر باشد، ناپایداری در محفظه شدیدتر خواهد بود و در اعداد رایلی پایین‌تر اتفاق خواهد افتاد. شوگا و همکاران [۱۰] تولید آنتروپی در یک محفظه مربعی با یک جسم مولد گرما را تحلیل عددی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که جسم مولد گرما در مرکز محفظه قرار دارد، تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک، کمترین مقدار و تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت، بیشترین مقدار را دارد. محمودی [۱۱] تأثیر عدد رایلی و نسبت منظری را برای جابجایی آزاد نانوسیال روی محفظه L شکل بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی افزایش می‌یابد. همچنین میزان انتقال حرارت با کاهش نسبت منظری افزایش می‌یابد.

در این تحقیق، جابجایی آزاد در این محفظه L شکل تحلیل عددی شده است و علاوه بر آن، قانون دوم ترمودینامیک و میزان تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک و انتقال حرارت در محفظه محاسبه شده است. تعیین موقعیت مناسب مولد گرما در محفظه، ضمن خنک‌کاری بهتر جسم مولد گرما موجب انتقال گرمای بیشتر از دیواره گرم به دیواره سرد می‌شود. به کمک نتایج تحقیق حاضر می‌توان بدون استفاده از مبدل حرارتی خنک‌کن و صرف انرژی لازم برای راه‌اندازی پمپ یا کمپرسور، به شرایط بهینه خنک‌کاری دست یافت. به این ترتیب، می‌توان در میزان انرژی مصرفی صرفه‌جویی کرد.

جابجایی آزاد در محفظه‌های بسته در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی دارای کاربرد فراوان است. کوره‌های صنعتی، سرمایش اجزای تجهیزات الکترونیکی، کلکتورهای خورشیدی، پنجره‌های دوجداره و غیره، همگی مثال‌هایی از کاربرد فرآیند انتقال گرما در محفظه‌های بسته است، بنابراین مینیمم‌سازی تولید آنتروپی در یک سیستم ترمودینامیکی از معیارهای طراحی بهینه آن سیستم می‌باشد و به همین علت، تحقیقات زیادی بر روی تولید آنتروپی صورت گرفته است. جنی و همکاران [۱] شبیه‌سازی عددی را برای جابجایی طبیعی در یک محفظه بسته با جسم مولد گرما در حالت شار ثابت بر روی یک دیوار انجام داده‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که افزایش عدد گراشف، باعث تغییر شکل در خطوط هم‌دما می‌شود. همچنین دریافته‌اند که محل قرارگیری جسم مولد گرما بر روی دیوار بر روی نتایج به دست آمده تأثیرگذار است. لین و بجان [۲] تحقیقات آزمایشگاهی و عددی را بر روی انتقال حرارت جابجایی آزاد در داخل یک محفظه مستطیلی با یک دیواره ناقص داخلی انجام داده‌اند. این تحقیق در اعداد رایلی بالا و نسبت‌های منظری متفاوت دریچه بالای دیواره داخلی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت منظری دریچه بر روی میزان انتقال حرارت و میدان جریان در محفظه، تأثیر بسیار زیادی دارد. وان و همکارانش [۳] جابجایی آزاد هوا در یک محفظه مربعی با جدارهای سرد و گرم در طرفین محفظه و جدارهای عایق در بالا و پایین را تحلیل عددی کرده‌اند. چانگ و تسای [۴] جابجایی آزاد در یک محفظه بسته با یک پله داغ را حل عددی کرده و نتایج را برای اعداد رایلی متفاوت محفظه و نسبت‌های مختلف منظری آن ارائه داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت در یک محفظه با پله داغ نسبت به یک محفظه مربعی و بدون پله، بیشتر است. محمود [۵] نشان داد که عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رایلی جریان افزایش می‌یابد و نسبت منظری پله بر روی عدد ناسلت متوسط، تأثیر مستقیم می‌گذارد. حمیرا و محمود [۶] جابجایی آزاد در محفظه‌های L شکل مایل را به طور عددی مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج برای اعداد رایلی متفاوت، نسبت‌های منظری گوناگون و زوایای مختلف محفظه ارائه شده است. در اعداد رایلی پایین، رسانش مکانیزم غالب، انتقال گرماست و تغییر زاویه شیب محفظه، تأثیری در نرخ انتقال حرارت ندارد. با افزایش نسبت منظری محفظه، عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. یونگ و جانگ [۷]

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(\vec{J}_v) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{Ra. Pr. } \theta_f \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t} + \text{div}(\vec{J}_\theta) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \theta_s}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial Y^2} \right) + \frac{\Delta T}{(\rho c_p) A} \quad (5)$$

$$\vec{J}_v = U\vec{V} - \text{Pr. } \vec{\nabla}U \quad (6)$$

$$\vec{J}_v = V\vec{V} - \text{Pr. } \vec{\nabla}V \quad (7)$$

$$\vec{J}_\theta = \theta_f \vec{V} - \vec{\nabla}\theta_f \quad (8)$$

پارامترهای بی بعد در معادلات بی بعد حاکم به صورت زیر تعریف می شوند:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vL}{\alpha_f} \quad (9)$$

$$P = \frac{pL^2}{\rho_f \alpha_f^2}, \quad \theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}, \quad t = \frac{t^* \alpha_f}{L^2}$$

و

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha}, \quad \text{Ra} = \frac{g\beta L^3 (T_H - T_C)}{\nu \alpha_f}$$

$$k = \frac{k_s}{k_f}, \quad \Delta T = \frac{\dot{q}W^2 / k_f}{T_H - T_C}, \quad A = \frac{W^2}{L^2} \quad (10)$$

$$\rho c_p = \frac{(\rho c_p)_s}{(\rho c_p)_f}, \quad \alpha = \frac{\alpha_s}{\alpha_f}$$

در این تحقیق، عدد پراکتل برای هوا ۰/۷ در نظر گرفته شده و نسبت مساحت $A=0/04$ است. نسبت اختلاف دمایی نیز $\Delta T=1$ انتخاب شده است. نسبت ضریب هدایت گرمایی جسم جامد به سیال $k=50$ و نسبت نفوذ حرارتی جسم جامد به سیال $\alpha=0/05$ فرض شده است. برای شرایط مرزی، سرعت برای تمام دیواره‌ها صفر و برای دما در سمت دیواره سرد $\theta=0$ و برای دیواره گرم $\theta=1$ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی دما در سطح تماس جسم مولد گرما و سیال به صورت زیر است (n بردار واحد عمود بر سطح است):

$$k_f \frac{\partial \theta_f}{\partial n} = k_s \frac{\partial \theta_s}{\partial n} \quad (11)$$

$$\theta_s = \theta_f$$

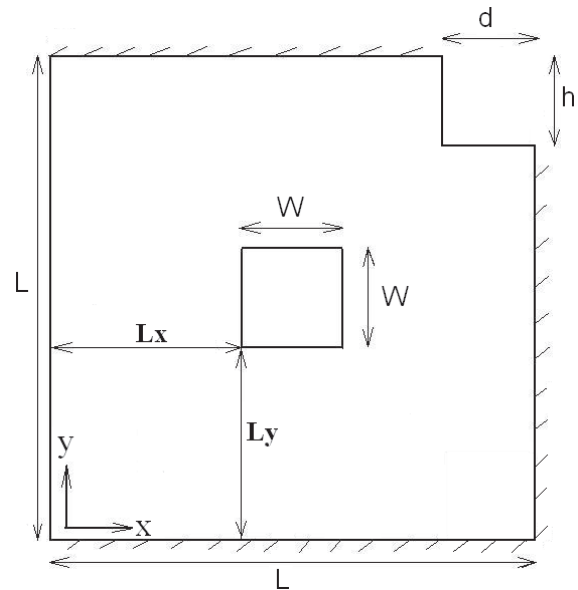
اعداد ناسلت موضعی بر روی وجوه عمودی و افقی پله داغ به

ترتیب به صورت Nu_x و Nu_y تعریف می شوند:

$$Nu_x = -\left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right) d \quad (12)$$

۲. مدل ریاضی مسئله

شکل (۱)، نمایی از مسئله مورد نظر را نشان می دهد. این مسئله شامل یک محفظه مربعی به طول L است که دارای یک پله داغ به ابعاد h و d می باشد. نسبت منطری پله به صورت $AR=h/d$ تعریف می شود. دیواره عمودی سمت چپ محفظه، دارای دمای ثابت سرد T_c است و بقیه دیواره‌ها عایقاند. در داخل محفظه، یک جسم مربعی مولد گرما به طول W قرار گرفته است. حرارت از طریق پله داغ و جسم مولد گرما به داخل محفظه انتقال می یابد و از طریق دیواره سرد دفع می شود. k_s ، ضریب هدایت گرمایی جسم مولد گرما و \dot{q} بیانگر میزان تولید حرارت در واحد حجم برای این جسم است. عمق محفظه در جهت عمود بر صفحه بی نهایت در نظر گرفته شده است، لذا می توان مسئله را دوبعدی فرض کرد. در این مسئله از انتقال حرارت تابشی و اتلافات ویسکوز صرف نظر، و خصوصیات سیال به جز چگالی که از تقریب بوزینسکی تبعیت می کند، ثابت در نظر گرفته شده است. نیروی جاذبه در جهت منفی Y عمل می کند و جریان هوا در داخل محفظه، آرام و تراکم ناپذیر است.



شکل(۱): شمایی از محفظه L شکل همراه با جسم مولد گرما

معادلات بی بعد حاکم بر مسئله شامل پیوستگی، مومتوم در دو جهت X و Y و انرژی برای سیال و جسم مولد گرما به ترتیب به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(\vec{J}_u) = -\frac{\partial P}{\partial x} \quad (2)$$

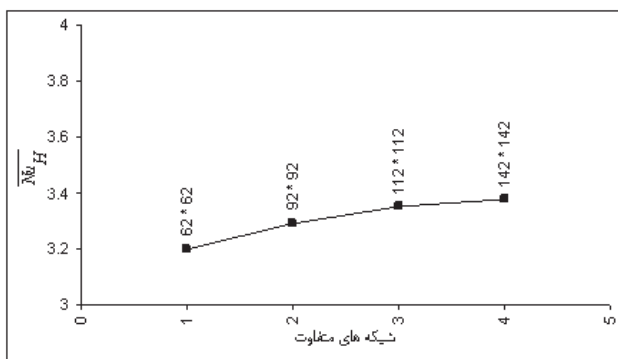
۳. روش حل عددی

از روش قائده توانی (power law) برای تغییر شکل معادلات (۱) تا (۴) در روش ضمنی متناوب جهتی استفاده شده است. مقادیر U ، V ، θ ، و P با استفاده از الگوریتم سیمپلر به طور پیوسته حل شده‌اند. فرآیند حل، زمانی به همگرایی می‌رسد که میزان خطا از 10^{-5} کمتر باشد. برای اطمینان از صحت نتایج برنامه کامپیوتری، به بررسی حل عددی یک مسئله نمونه و مرتبط با موضوع تحقیق پرداخته شده که جریان طبیعی درون محفظه مربعی را مورد مطالعه قرار داده است. نتایج حاصل و میزان خطای نسبی در محاسبات در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقایسه عدد ناسلت متوسط محفظه با مراجع

| کار حاضر | منظری [۱۳] | وان و همکاران [۳] | عدد رایلی (Ra) |
|----------|------------|-------------------|----------------|
| ۱/۱۲ | ۱/۰۷۴ | ۱/۱۱۷ | 10^3 |
| ۲/۲۲ | ۲/۰۸۴ | ۲/۲۵۴ | 10^4 |
| ۴/۴۷ | ۴/۳ | ۴/۵۹۸ | 10^5 |
| ۸/۶۷ | ۸/۷۴۳ | ۸/۹۷۶ | 10^6 |

همان‌طور که در جدول (۱) دیده می‌شود، بیشترین میزان خطای نسبی عدد ناسلت متوسط محفظه در عدد رایلی 10^6 اتفاق افتاده است. این مسئله نشان می‌دهد که برنامه کامپیوتری نوشته شده دارای دقت مطلوبی در حل مسئله مورد نظر است. برای عدد رایلی 10^5 اختلاف در عدد ناسلت متوسط برای شبکه‌های 112×112 و 92×92 برابر $1/8\%$ و برای شبکه‌های 112×112 و 142×142 ، $1/9\%$ می‌باشد، بنابراین شبکه غیر یکنواخت با تعداد گره 112×112 ، برای حل مسئله مورد نظر انتخاب شده است. شکل (۲) تأثیر تعداد سلول‌های شبکه را بر روی عدد ناسلت متوسط پله داغ نشان می‌دهد.



شکل (۲): مقادیر ناسلت متوسط برای شبکه‌های متفاوت

۴. نتایج و بحث

در این تحقیق، توزیع برگشت‌ناپذیری $Idr=10^{-4}$ فرض شده است. در

$$Nu_y = -\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_h$$

عدد ناسلت متوسط بر روی پله از انتگرال‌گیری اعداد ناسلت موضعی در امتداد وجوه پله به دست می‌آید:

$$\overline{Nu}_H = \frac{1}{h+d} \left[\int_0^h Nu_y dY + \int_0^d Nu_x dX \right] \quad (12)$$

بر اساس تعادل ترمودینامیکی موضعی و تئوری انتقال خطی [۱۲]، تولید آنتروپی موضعی در واحد حجم به صورت زیر خواهد بود:

$$s_l''' = \frac{k}{T_0^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 \right] + \frac{\mu}{T_0} \times \quad (13)$$

$$\left[2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \right]$$

تولید آنتروپی موضعی در واحد حجم به صورت زیر بدون بعد خواهد بود:

$$S_l''' = S_{l,ht}''' + S_{l,fr}''' \quad (14)$$

و داریم:

$$S_{l,fr}''' = Idr \left[2 \left(\left(\frac{\partial U}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y}\right)^2 \right) + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X}\right)^2 \right] \quad (15)$$

$$S_{l,ht}''' = \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)^2 \right]$$

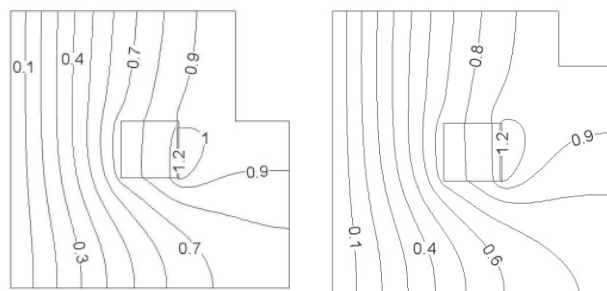
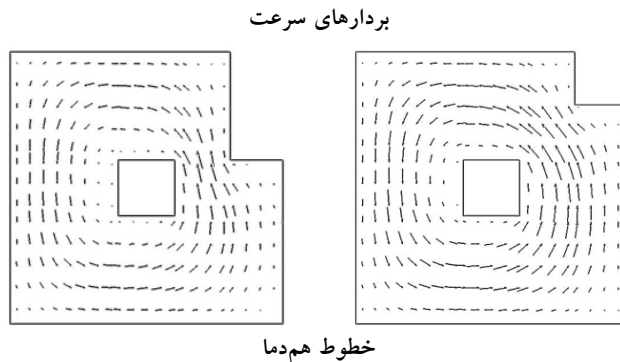
$$Idr = \frac{\mu T_0}{k} \left(\frac{\alpha}{L(T_H - T_c)} \right)^2$$

جملات اول و دوم سمت راست معادله (۱۴) به ترتیب، تولید آنتروپی بدون بعد موضعی ناشی از انتقال حرارت و اصطکاک سیال‌اند. توزیع برگشت‌ناپذیری (Idr) به صورت نسبت تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک به تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت تعریف می‌شود. تولید آنتروپی کل بدون بعد با انتگرال‌گیری از تولید آنتروپی بدون بعد موضعی بر روی حجم سیستم تعیین می‌شود:

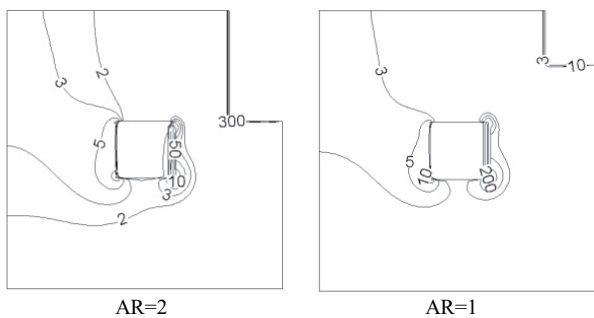
$$S = \int S_l''' d\vartheta \quad (16)$$

میزان بازگشت‌ناپذیری Idr از معادله (۱۵) به دست می‌آید.

محفظه نیز تغییر بسیار جزئی ایجاد می‌شود. با کاهش سرعت سیال اعوجاج خطوط هم‌دما نیز در مقایسه با نسبت‌های منطری پله ۱ و ۲ کمتر می‌شود.



خطوط هم‌تراز تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت



شکل (۳): مشخصه‌های جریان برای حالت جسم مولد گرما در مرکز محفظه L شکل برای $Ra=10^3$ ($L_x = \frac{2}{5}L, L_y = \frac{2}{5}L$)

۲.۴. جسم مولد گرما در پایین و سمت چپ محفظه

شکل (۴) بردار جریان، خطوط هم‌دما و خطوط هم‌تراز تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت را برای محفظه L شکل با نسبت منطری پله مختلف و جسم مولد گرما در پایین و سمت چپ محفظه نشان می‌دهد.

با انتقال جسم مولد گرما از مرکز به گوشه پایین و سمت چپ محفظه، گردابه‌ای در بالای جسم مولد گرما در خلاف جهت عقربه‌های ساعت شکل می‌گیرد. افزایش ارتفاع پله، تأثیر چندانی در

حل عددی انجام شده، محدوده تغییرات توزیع برگشت‌ناپذیری (Idr) که به صورت نسبت تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک به تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت تعریف شده، بین 10^{-3} تا 10^{-5} می‌باشد که برای کار حاضر مقدار میانگین محدوده فوق در نظر گرفته شده است. جریان سیال در داخل محفظه با وجود جسم مولد گرما از بر هم کنش دو پدیده ناشی می‌شود: اولین پدیده، جریان جابجایی آزاد در داخل محفظه بدون جسم مولد گرماست که در اثر اختلاف دما بین پله داغ و دیواره سرد حاصل می‌شود؛ دومین پدیده، وجود جسم مولد گرما در داخل محفظه است. جسم مولد گرما باعث ایجاد حرکت رو به بالای سیال در فضای مجاور خود می‌شود. گردابه اصلی ناشی از پدیده اول در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در محفظه می‌گردد و جسم مولد گرما نیز تمایل به ایجاد حرکت رو به بالای سیال در فضای مجاور خود را دارد. این دو پدیده در سمت راست جسم مولد گرما برخلاف یکدیگرند، اما در سمت چپ جسم مولد گرما با یکدیگر جمع می‌شوند، بنابراین در سمت چپ، سرعت سیال در محفظه افزایش می‌یابد، اما در سمت راست جسم مولد گرما، گردابه‌ای در مجاورت این جسم ایجاد می‌شود. در جابجایی آزاد در محفظه‌های L شکل، دو گردابه در داخل محفظه شکل می‌گیرد. گردابه بزرگ‌تر و اصلی، فضای سمت چپ محفظه را در بر می‌گیرد و گردابه دوم در زیر پله داغ در محفظه تشکیل می‌شود؛ البته چون در محفظه‌های L شکل کار حاضر، عرض پله (d) به دلیل وجود جسم مولد گرما در داخل محفظه نمی‌تواند از حد مشخصی بیشتر شود، گردابه دوم که در زیر پله داغ تشکیل می‌شود، با گردابه بزرگ‌تر ادغام می‌شود و یک گردابه واحد در تمام فضای محفظه شکل می‌گیرد. دومین پدیده مؤثر در میدان جریان محفظه‌های L شکل، وجود جسم مولد گرما در داخل محفظه است که باعث ایجاد حرکت رو به بالای سیال در فضای مجاور خود می‌شود.

۱.۴. جسم مولد گرما در مرکز محفظه

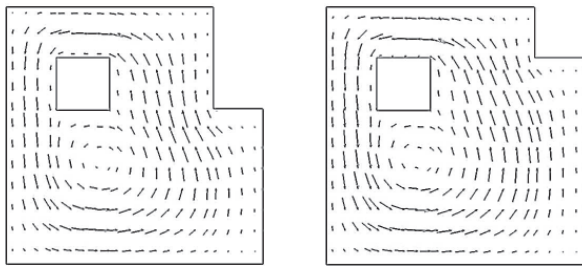
شکل (۳) بردار جریان، خطوط هم‌دما و خطوط هم‌تراز تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت را برای محفظه L شکل با نسبت منطری پله مختلف و جسم مولد گرما در مرکز محفظه نشان می‌دهد. گردابه اصلی در محفظه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. در $Ra=10^3$ خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره سرد به طور عمودی گسترش یافته و در نزدیکی پله داغ نیز در امتداد وجوه پله‌اند. هر چه به سمت مرکز محفظه حرکت کنیم، رسانش مکانیزم غالب تبادل گرما در محفظه است.

با افزایش ارتفاع پله از نسبت منطری ۱ به ۲، تغییر کمی در خطوط هم‌دما ایجاد می‌شود. همچنین تغییر در خطوط تولید آنتروپی نیز کم است. در مقادیر عدد ناسلت متوسط و تولید آنتروپی در

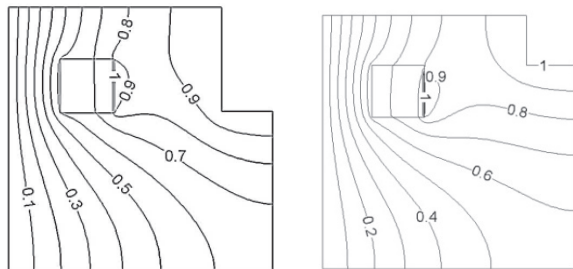
۳.۴. جسم مولد گرما در بالا و سمت چپ محفظه

شکل (۵) بردار جریان، خطوط هم‌دما و خطوط هم‌تراز تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت را برای محفظه L شکل با نسبت منظری پله مختلف و جسم مولد گرما در بالا و سمت چپ محفظه نشان می‌دهد. در $Ra=10^3$ گردابه کوچکی در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در زیر جسم مولد گرما شکل می‌گیرد. گردابه اصلی نیز در خلاف جهت عقربه‌های ساعت، تقریباً تمام فضای محفظه را فرا گرفته است.

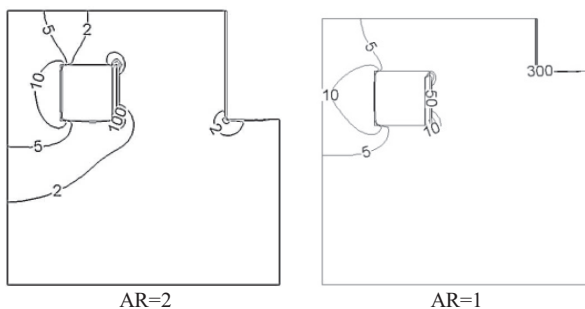
بردارهای سرعت



خطوط هم‌دما



خطوط هم‌تراز تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت



AR=2

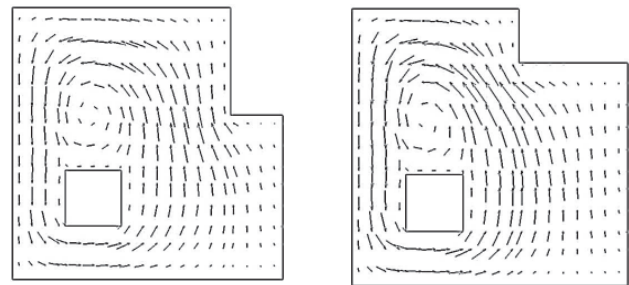
AR=1

شکل (۵): مشخصه‌های جریان برای حالت جسم مولد گرما در بالا و سمت چپ محفظه L شکل برای $Ra=10^3$ ($L_x = \frac{1}{5}L, L_y = \frac{3}{5}L$)

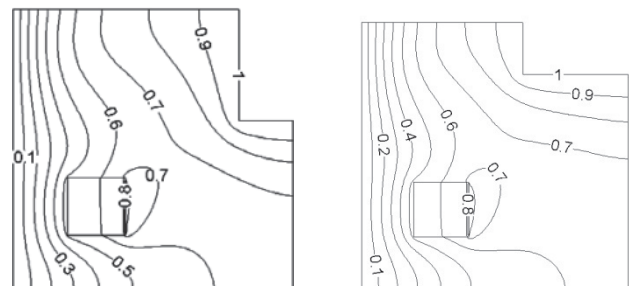
در این حالت، خطوط هم‌دما در نزدیکی دیواره‌های دما، به موازات دیواره‌ها ثابت‌اند و هرچه به سمت مرکز محفظه و جسم مولد گرما حرکت می‌کنیم، به کندی خم می‌شوند. مکانیزم غالب انتقال حرارت در محفظه در $Ra=10^3$ رسانش است. در نسبت منظری پله ۱ ($AR=1$) تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت نیز در نواحی که گرادیان دما بیشتر است و خطوط هم‌دما متراکم‌ترند، بیشترین مقدار خود را

ناسلت متوسط و میزان تولید آنتروپی در محفظه ندارد. با افزایش عرض پله و کاهش مسیر عبور جریان گردابه اصلی در محفظه، بین جسم مولد گرما و پله داغ در نسبت منظری ۰/۵، سرعت سیال به مقدار کمی کاهش می‌یابد و ناسلت متوسط پله و تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت به مقدار جزئی کم می‌شوند. در این محفظه‌ها با افزایش عدد رایلی، عدد ناسلت متوسط پله داغ افزایش می‌یابد. تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک سیال در $Ra \leq 10^4$ تقریباً صفر است و در $Ra > 10^4$ با افزایش عدد رایلی به سرعت افزایش می‌یابد. تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت نیز با افزایش عدد رایلی جریان افزایش می‌یابد.

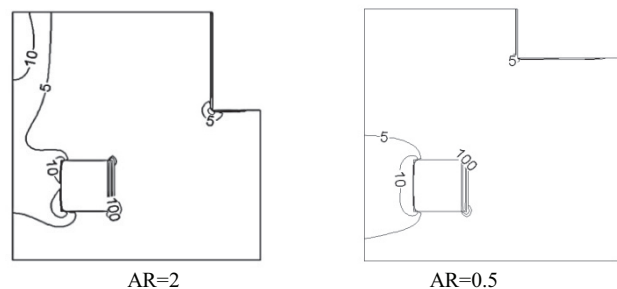
بردارهای سرعت



خطوط هم‌دما



خطوط هم‌تراز تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت



AR=2

AR=0.5

شکل (۴): مشخصه‌های جریان برای حالت جسم مولد گرما در پایین و سمت چپ محفظه L شکل برای $Ra=10^4$ ($L_x = \frac{1}{5}L, L_y = \frac{1}{5}L$)

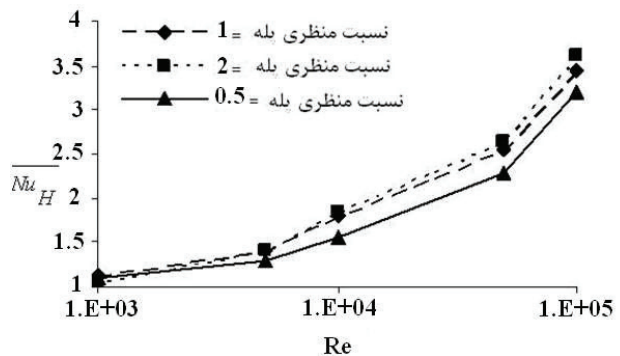
از انتقال حرارت نیز بزرگ‌تر می‌شود. در $10^4 Ra \leq$ تولید آنتروپی ناشی از اصطکاک سیال ناچیز است و با افزایش عدد رایلی در $10^4 Ra >$ به سرعت افزایش می‌یابد. تولید آنتروپی کل نیز با عدد رایلی جریان، رابطه مستقیم، و در اعداد رایلی بزرگ‌تر، مقدار بیشتری دارد. در بیشتر حالات، میزان انتقال حرارت و نرخ تولید آنتروپی در محفظه‌های دارای نسبت‌های گوناگون منظری پله، در نسبت منظری پله ۰٫۵ کمتر است. تغییر ارتفاع پله، تأثیر چندانی در میزان انتقال حرارت و تولید آنتروپی ندارد، اما عرض پله در انتقال حرارت و نرخ تولید آنتروپی مؤثر است.

فهرست علائم

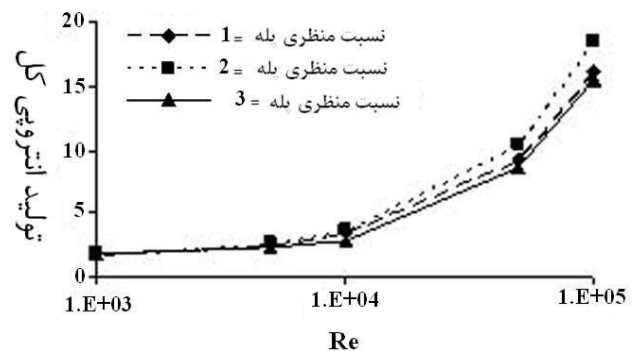
| | | |
|--|--|---------------|
| $A = \frac{W^2}{L^2}$ | نسبت مساحت | A |
| $\frac{kJ}{kgk}$ | گرما ویژه | C_p |
| (m) | عرض پله | D |
| (m/s^2) | شتاب گرانش | G |
| (m) | ارتفاع پله | H |
| | نسبت توزیع برگشت‌ناپذیری | Idr |
| () | ضریب هدایت حرارتی سیال | k_f |
| $\frac{W}{mk}$ | ضریب هدایت حرارتی جسم مولد گرما | k_s |
| | نسبت ضریب هدایت حرارتی جسم جامد به سیال | k |
| (m) | طول محفظه | L |
| | عدد ناسلت | Nu |
| (Pa) | فشار | P |
| | فشار بی بعد | P |
| | عدد پرانتل | Pr |
| $\frac{W}{m^3}$ | نرخ حرارت تولیدی در واحد حجم جسم مولد گرما | q' |
| | عدد رایلی جریان | Ra |
| | جمله چشمه در فرم کلی معادله دیفرانسیل | SC |
| $\frac{kJ}{kgm^3k}$ | تولید آنتروپی در واحد حجم | s''' |
| | تولید آنتروپی در واحد حجم بی بعد | S''' |
| | تولید آنتروپی کل بی بعد | S |
| (s) | زمان | t^* |
| | زمان بی بعد | t |
| (k) | درجه حرارت | T |
| $T_0 = \frac{T_H + T_C}{2}$ | دمای حجمی | T_0 |
| $\Delta T = \frac{q'W^2/K_f}{T_H - T_C}$ | نسبت اختلاف دما | ΔT |
| | مؤلفه‌های سرعت بی بعد | U, V |
| (m^3) | حجم سیستم | \mathcal{G} |
| | بردار سرعت بی بعد | \vec{V} |
| (m) | طول جسم مولد گرما | W |
| | علائم یونانی | |
| $(m^2 \cdot s^{-1})$ | ضریب نفوذ حرارتی جسم جامد | α_s |

داراست. با افزایش ارتفاع پله در نسبت منظری ۲ در مقایسه با نسبت منظری ۱، تغییر جزئی در خطوط جریان و هم‌دما ایجاد می‌شود.

شکل (۶) و (۷) به ترتیب، تغییرات عدد ناسلت متوسط پله داغ (Nu_H) و تولید آنتروپی کل در محفظه‌های L شکل با جسم مولد گرما در بالا و سمت چپ محفظه را نشان می‌دهد. همان‌طور که نشان داده شده، با افزایش عدد رایلی، میزان عدد ناسلت و به تبع آن، میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. هر چه میزان انتقال حرارت از محفظه بیشتر می‌شود، تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت نیز بزرگ‌تر می‌گردد. تولید آنتروپی کل نیز با عدد رایلی جریان رابطه مستقیم دارد و در اعداد رایلی بزرگ‌تر، مقدار بیشتری دارد.



شکل (۶): تغییرات عدد ناسلت متوسط در محفظه L شکل با مولد گرما در بالا و سمت چپ



شکل (۷): میزان تولید آنتروپی کل در محفظه L شکل با جسم مولد گرما در بالا و سمت چپ محفظه

۵. نتیجه‌گیری

انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه L شکل با یک جسم مولد گرما بررسی و تحلیل شده است. علاوه بر آن، قانون دوم ترمودینامیک و میزان تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت در محفظه محاسبه شده است. در $10^4 Ra =$ انتقال حرارت اساساً رسانش است و با افزایش عدد رایلی، سهم جابجایی در انتقال حرارت از محفظه افزایش می‌یابد. هر چه میزان انتقال حرارت از محفظه بیشتر می‌شود، تولید آنتروپی ناشی

| | | | |
|--------------------------|----|--|------------|
| زیرنویس | | | |
| سرد | c | ضریب نفوذ حرارتی سیال ($m^2 \cdot s^{-1}$) | α_f |
| سیال | F | نسبت نفوذ حرارتی جسم جامد به سیال | α |
| اصطکاک | Fr | ضریب انبساط حرارتی سیال (k^{-1}) | β |
| داغ | H | دمای بی بعد | θ |
| انتقال حرارت | ht | لزجت دینامیکی ($m^2 \cdot s^{-1}$) | ν |
| موضعی | l | لزجت سینماتیک ($\frac{kg}{ms^2}$) | μ |
| مرز بالای گره مورد بررسی | n | چگالی جسم جامد ($\frac{kg}{m^3}$) | ρ_s |
| جسم جامد | s | چگالی سیال ($\frac{kg}{m^3}$) | ρ_f |
| | | نسبت چگالی جامد به چگالی سیال | ρ |

مراجع

- [1] Geniy V. Kuznetsov, Mikhail A. Sheremet "Conjugate natural convection in an enclosure with a heat source of constant heat transfer rate" Int. J. Heat Mass Transfer 54 (2011) 260-268
- [2] Lin, N.N., Bejan, A., "Natural convection in a partially divided enclosure", Int. J. Heat Mass Transfer 26 1867-1878 (1983).
- [3] Wan, D. C., Patnaik, B. S. and Wei, G. W., "A new benchmark quality solution for the buoyancy-driven cavity by discrete singular convolution", Numerical Heat Transfer, Part B, 40: 199-228, (2001).
- [4] Chang, T. S., Tsay, Y. L. "Natural convection heat transfer in an enclosure with a heated backward step", Int. J. Heat Mass Transfer 44 3963-3971.(2001)
- [5] Mahmud, S., "Free convection inside an L-shaped enclosure", Heat Mass Transfer 29 1005-1013.(2002)
- [6] Humaira, S., Mahmud, S., "Laminar free convection inside an inclined L-shaped enclosure", Int. Commun. Heat Mass Transfer 33 936-942.(2006)
- [7] Yeong, H., and Jung, M., "A numerical study on three-dimensional conjugate heat transfer of natural convection and conduction in a differentially heated cubic enclosure with a heat-generating cubic conducting body", Int. J. Heat Mass Transfer 43 4229-4248.(2000)
- [8] Oztop, H., Bilgen, E., "Natural convection in differentially heated and partially divided square cavities with internal heat generation", Int. J. Heat and Fluid Flow 27 466-475.(2006)
- [9] Lee, J. Ha, Y., "Numerical simulation of natural convection in a horizontal enclosure with a heat generating conducting body", Int. J. Heat Mass Transfer 49 2684-2702.(2006)
- [10] Shuja, S., Yilbas, S., Budair, O., "Natural convection in a square cavity with a heat generating body: entropy consideration", Heat Mass Transfer 36 343-350.(2000)
- [11] Mahmodi, M., "Numerical simulation of free convection of a nanofluid in L-shaped cavities" International journal of thermal science, 50 (2011) 1731-1740
- [12] Bejan, A., *Convection Heat Transfer*, second ed., John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [13] Manzari, M. T., "An Explicit Finite Element Algorithm for Convective Heat Transfer Problems", Int. J. Numer. Meth. Heat Fluid Flow, vol. 9, pp. 860-877, 1999.