

انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی آزاد و هدایت در محفظه مربعی متخلخل، حاوی قطعه جامد گرمازا

مجید طهماسبی کهیانی^۱، بهزاد قاسمی^۲، افراسیاب رئیسی^۳

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۲۹)

چکیده

در مقاله حاضر، انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی آزاد و هدایت در یک محفظه مربعی متخلخل حاوی جسم جامد دارای تولید انرژی که در آن انرژی یکنواخت بر واحد حجم تولید می‌شود، به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. دیواره‌های افقی این محفظه عایق و دیواره‌های عمودی چپ و راست به ترتیب در دماهای T_c و T_h می‌باشند. با وجود این شرایط مرزی در معادلات بی‌بعد شده دو پارامتر مؤثر وجود خواهد داشت که شامل Ra و λ_{sb} می‌باشند. پارامتر Ra عدد رایلی بوده و تابعی از اختلاف دما در مرزهای گرم و سرد می‌باشد و λ_{sb} پارامتری وابسته به تولید انرژی در جسم جامد است. معادلات بی‌بعد حاکم بر اساس مدل داریسی به‌دست آمده‌اند و برای حل این معادلات از روش حجم کنترل استفاده شده است. اثر تغییر پارامترهای Ra و λ_{sb} بر میدان جریان و دما و نرخ انتقال حرارت و غیره بررسی شده است. نتایج نشان دهنده کاهش بیشینه دمای دامنه حل با افزایش عدد Ra و یا کاهش λ_{sb} است.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، انتقال حرارت ترکیبی، جسم جامد، تولید انرژی

Conjugated Natural Convection and Conduction Heat Transfer in a Square Cavity Containing a Porous Medium and a Solid Body Heat Source

M. Tahmasebi-kohyani, B. Ghasemi, A. Raisi

Mechanical Engineering Department

Shahrekord University

(Received: 15 January, 2014; Accepted: 19 June, 2014)

ABSTRACT

Conjugated natural convection and conduction in a square cavity containing a porous medium with a solid body subjected to a uniform energy generation per unit volume is studied numerically in this paper. The vertical walls of the cavity are assumed to have constant temperatures (T_h and T_c) and the horizontal walls to be adiabatic. The effective parameters in this case are Ra and λ_{sb} which appear in the nondimensionalized equations. Ra is a function of temperature difference between hot and cold walls, and λ_{sb} is a parameter that depends on the energy generation in the porous medium. Nondimensionalized governing equations in both cases are obtained based on the darcy model; a control volume approach is used for solving these equations. The effect of the variation of two parameters, Ra and λ_{sb} , on the heat transfer rate, fluid flow and isotherms are investigated. The results show that the maximum temperature decreases as Ra increases or λ_{sb} decreases.

Keywords: Porous Medium, Conjugated Natural Convection, Heat Generation, Solid Body

۱- دانشجوی دکتری: matkoh@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): behzadgh@yahoo.com

۳- استادیار: raisi@eng.sku.ac.ir

سال‌های اخیر محققان توجهی ویژه به بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر انتقال حرارت در محیط‌های متخلخل داشته باشند. به‌عنوان مثال کاربردی در زمینه استفاده از محیط‌های متخلخل، می‌توان به مبدل‌های زیرزمینی برای ذخیره انرژی، بازیابی و کنترل دمای راکتورها، خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، عایق‌های حرارتی، انرژی‌های زمین گرمایی و غیره اشاره کرد. این موارد و کاربردهای بیشتر را می‌توان در مراجع [۴-۱] یافت. بررسی انتقال حرارت در محیط‌های متخلخل با شرایط مرزی مختلف یکی از موضوعات مهم در این زمینه به‌شمار می‌رود و مقالات زیادی در این زمینه به ثبت رسیده است. اندرسن و لاریت^۱ [۵] جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه که دارای دیواره‌های عمودی سرد و دیواره کف گرم در دمای یکنواخت می‌باشد را بررسی کرده‌اند. کیمورا و بیجن^۲ [۶] جابه‌جایی طبیعی را به‌صورت عددی در یک محفظه مستطیلی که سطح کف آن خنک نگهداشته شده است و به یکی از دیواره‌های عمودی نیز شار وارد می‌شود را بررسی نموده‌اند. پپ و سعید^۳ [۷] در زمینه محیط‌های متخلخل ساده مقاله‌ای ارائه کردند که با افزایش عدد رایلی، زمان رسیدن به عدد نوسلت ثابت کمتر و با کاهش عدد دارسی، اختلاف بین دو مدل میکروسکپی و ماکروسکپی زیاد می‌شود. چائو و اوزی^۴ [۸] به بررسی جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مورب که نیمی از کف آن عایق و به نیم دیگر شار گرمایی وارد شده و دیوار بالایی نیز خنک شده است، پرداخته‌اند. گرانزارولی و میلانز^۵ [۹] به بررسی محفظه‌ای که دارای دیواره‌های عمودی سرد در دمای یکنواخت بوده و شار حرارتی نیز از کف محفظه وارد می‌شود، پرداخته‌اند. به تازگی سعید [۱۰] انتقال حرارت جابه‌جایی در یک محیط متخلخل که توسط دو لایه با ضخامت محدود احاطه شده است را مورد بررسی قرار داده است که از جمله نتایج آن می‌توان به افزایش مقدار جریان گردشی با دو عامل کاهش ضخامت دیواره‌ها و افزایش نسبت ضریب رسانش دیواره‌ها به ضریب رسانش محیط متخلخل (Kr) اشاره کرد. در این مقاله همچنین نشان داده شده است که با افزایش Kr عدد نوسلت و گرادیان دمای افقی افزایش می‌یابند. چمخا^۶ و همکارانش [۱۱] یک محفظه متخلخل در معرض

فهرست علائم

H	ارتفاع محفظه
D	طول ضلع بدون بعد جسم جامد مربعی
X, Y	طول‌های بدون بعد در جهت‌های X و Y
g	شتاب جاذبه زمین
Ra	عدد رایلی
λ_{sb}	عدد بی‌بعد وابسته به تولید حرارت در قطعه جامد
$\frac{Nu}{Nu}$	نوسلت میانگین
Nu	نوسلت موضعی
T_p	دمای محیط متخلخل
T_{sb}	دمای قطعه جامد
T_h, T_c	دمای مرز گرم و سرد
U	سرعت در جهت X
V	سرعت در جهت Y
K	ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل
k	ضریب رسانش حرارتی
q'''	تولید انرژی بر واحد حجم

علائم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی
θ	دمای بدون بعد
ν	لزجت سینماتیکی
β	ضریب انبساط گرمایی
ψ	تابع جریان
Ψ	تابع جریان بدون بعد

زیرنویس‌ها

P	محیط متخلخل
sb	قطعه جامد
sbp	قطعه جامد و محیط متخلخل
h	دیواره گرم
c	دیواره سرد
max	بیشینه

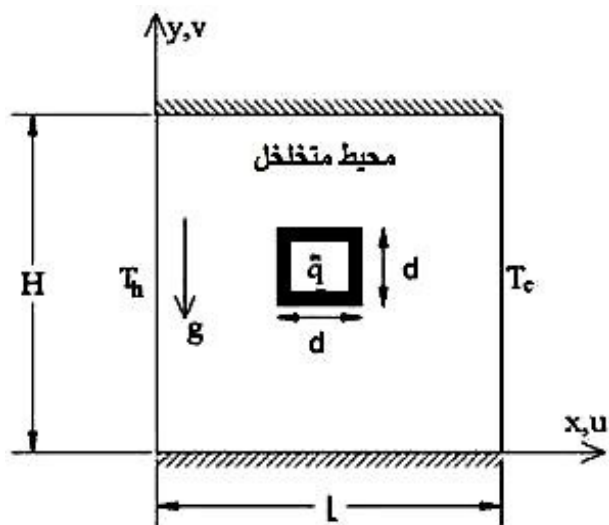
۱- مقدمه

محیط‌های متخلخل و بررسی پدیده انتقال در آنها جایگاه ویژه‌ای در فناوری و صنعت دارد. این اهمیت باعث شده که در

1- Anderson and Lauriat
2- Kimura and Bejan
3- Pop and Saeid
4- Chao and Ozoe
5- Granzarolli and Milanez
6- Chamkha

۲- بیان مسئله و روش حل

شماتیک مسئله مورد بررسی در شکل ۱ نمایش داده شده است. محفظه مربعی بوده و دیوارهای عمودی آن در دو دمای T_h و T_c نگاه داشته می‌شوند. دیوارهای افقی آن نیز آدیاباتیک می‌باشند. جسم جامد با تولید انرژی یکنواخت در مرکز محفظه قرار دارد. فرض می‌شود که محیط متخلخل همسانگرد و همگن است و در حالت کاملاً اشباع قرار دارد. سیال و محیط در شرایط تعادل دمای محلی قرار دارند و از اثرات اتلاف اصطکاکی و ترم اینرسی در معادلات انرژی و مومنتوم صرف‌نظر می‌شود. خواص ترمودینامیکی محیط و سیال، به‌جز چگالی سیال در عبارت شناوری، طی بررسی ثابت فرض می‌شوند. فرض می‌شود که چگالی سیال مطلق با فرضیه مشهور بوزینسک $\rho = \rho_0[1 - \beta_T(T - T_0)]$ ، تغییر می‌کند که β_T ضریب انبساط حرارتی سیال است.



شکل (۱): نمایی از محفظه مورد بررسی ($H=L$).

فرض می‌شود که سیال درون محیط متخلخل از مدل داریسی تبعیت می‌کند. با در نظر گرفتن فرضیه‌های ذکر شده، معادلات حاکم بر رفتار سیال و فاز جامد در حالت دوبعدی به‌صورت زیر می‌شود:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{gK\beta}{v} \frac{\partial T_p}{\partial x}, \quad (2)$$

$$u \frac{\partial T_p}{\partial x} + v \frac{\partial T_p}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 T_{sb}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{sb}}{\partial y^2} + \frac{q''}{k_{sb}} = 0. \quad (4)$$

تشعشع را مورد بررسی قرار دادند. علاوه بر تحقیقات فوق که در آنها انرژی گرمایی بر روی مرزهای محفظه اعمال می‌شود، در برخی تحقیقات نیز منبع انرژی در داخل محفظه در نظر گرفته شده است. پپ و سعید [۱۲] به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی در یک محیط متخلخل عمودی با دو منبع حرارتی پرداخته‌اند که در آن، تغییرات پارامترهایی از جمله اعداد رایلی و پکلت و فاصله میان منابع گرمایی بر نرخ انتقال حرارت مورد توجه واقع شده است. گروسان^۱ و همکارانش [۱۳] به بررسی اثرات تولید حرارت داخلی و میدان مغناطیسی در یک محیط متخلخل پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که میزان انتقال حرارت جابه‌جایی به‌شدت به پارامترهایی از جمله عدد رایلی و عدد هارتمن، (Ha) تابعی از شدت میدان مغناطیسی) وابسته است. همچنین نشان داده‌اند که عدد نوسلت موضعی در دیوارهای افقی با تغییر زاویه میدان مغناطیسی از حالت افقی به عمودی تغییر قابل ملاحظه‌ای دارد. میلی و مرکین^۲ [۱۴] انتقال حرارت جابه‌جایی در محیط متخلخل با تولید انرژی داخلی را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها نشان داده‌اند که در اعداد رایلی بزرگ لایه‌های مرزی با گردابه‌های Eddy، در نواحی مرکزی دیوارهای عمودی ایجاد می‌شود. از دیگر نتایج آن می‌توان به دستیابی به دمایی بالاتر از دمای دیوار گرم توسط تولید انرژی داخلی درون محیط متخلخل اشاره کرد. طبیعی و عباسی [۱۵] اثر آرایش‌های مختلف قرارگیری و تغییر ضخامت ماده متخلخل در یک لوله پهن شده را مورد بررسی قرار دادند که از جمله نتایج آن استفاده از آرایش مرکزی برای افزایش انتقال حرارت و آرایش مرزی برای عایق می‌باشد. کیهانی و محبی [۱۶] به بررسی عددی جریان سیال و انتقال حرارت در محیط متخلخل بین دو صفحه موازی پرداخته‌اند و نشان دادند که وجود موانع ثابت در دامنه محاسباتی به عنوان محیط متخلخل، موجب افزایش عدد نوسلت متوسط می‌شود. هرچند تحقیقات فراوانی در رابطه با محیط‌های متخلخل انجام شده، اما کمتر به مسائلی که در آنها علاوه بر تولید انرژی در داخل محفظه دیواره آن نیز گرم می‌باشد، پرداخته شده است. در این راستا تحقیق حاضر به‌منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف بر انتقال حرارت از محیط متخلخل حاوی جسم جامد گرم‌تر با دیواره‌های گرم و سرد انجام شده است که در بررسی شبیه‌سازی انتقال حرارت از قطعات نصب شده در مدارهای الکترونیکی کاربرد دارد.

1- Grosan

2- Mealey and Merkin

در این رابطه، θ_p دمای گره داخل محیط متخلخل، θ_{sb} دمای گره داخل قطعه و θ_{sbp} دمای سطح مشترک قطعه و محیط متخلخل است. با برابر در نظر گرفتن δX_{sb} و δX_p ، معادله (۱۳) را می‌توان به صورت ساده شده زیر نوشت:

$$\theta_{sbp} = \frac{\Gamma \theta_{sb} + \theta_p}{1 + \Gamma}, \quad \Gamma = \frac{k_{sb}}{k_p}. \quad (14)$$

رابطه (۱۴) شرط مرزی جبری شده در سطح مشترک قطعه جامد و محیط متخلخل می‌باشد. مقدار تابع جریان Ψ ، درون قطعه جامد برابر صفر قرار داده می‌شود. در این بررسی عدد نوسلت موضعی Nu ، و متوسط \overline{Nu} ، روی دیواره‌های سرد و گرم به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Nu = -\frac{\partial \theta}{\partial X}, \quad \overline{Nu} = \int_0^1 Nu dY. \quad (15)$$

۳- روش حل عددی

برای جبری کردن معادلات بی‌بعد شده از روش حجم کنترل استفاده شده است. همان‌طور که از روابط (۶) و (۷) پیدا است، معادلات مذکور به یکدیگر مرتبط بوده و باید به صورت هم‌زمان حل شوند. برای تقریب جملات پخش، از تقریب تفاضل مرکزی و در رابطه با جملات جابه‌جایی پخش، از روش پاورلا استفاده شده است [۱۷]. برای به دست آوردن جواب‌هایی دقیق باید از شبکه‌بندی متناسب با شرایط مرزی و هندسه مسئله استفاده نمود. زیرا در غیر این صورت جواب‌ها واگرا شده و یا غیر دقیق به دست می‌آیند. برای شبکه‌سازی از روش‌های گوناگونی استفاده می‌شود. در مرجع [۱۸] در این مورد توضیحات کافی آمده است. در مقاله حاضر از روش جبری برای شبکه‌سازی استفاده شده است. برای شبکه‌بندی از شبکه غیر یکنواخت به گونه‌ای استفاده شده که در نزدیکی مرزهای محفظه و قطعه جامد اندازه شبکه ریزتر باشد، چون در آنجا تغییرات شدیدتر است. نمونه‌ای از شبکه‌بندی استفاده شده در شکل ۲ آورده شده است. در حل‌های عددی یکی از نکات مهم عدم وابستگی جواب‌ها به تعداد نقاط شبکه است، با توجه به بررسی‌هایی که روی پارامترهای مهم مسئله، برای نشان دادن عدم وابستگی حل به تعداد نقاط شبکه انجام گرفت، از شبکه بهینه در حل استفاده شده است. نمونه‌ای از این بررسی‌ها در شکل ۳ مشاهده می‌شود. با توجه به این شکل دیده می‌شود که تغییرات بیشینه دمای دامنه حل، θ_{max} ، از شبکه 61×61 تا 121×121 بسیار کم است و از شبکه 101×101 به بعد تقریباً تغییراتی ندارد.

روابط (۱-۳) به ترتیب مربوط به پیوستگی، ممنتوم و انرژی در محیط متخلخل و رابطه (۴) معادله انرژی در جسم جامد است. u و v مؤلفه‌های سرعت در جهت‌های X و Y ، T_p و T_{sb} دمای محیط متخلخل و قطعه جامد و K ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل می‌باشند. بقیه پارامترها در فهرست علائم آورده شده‌اند. معادله‌های فوق را می‌توان برحسب تابع جریان، که به صورت $u = \frac{\partial \Psi}{\partial Y}$ و $v = -\frac{\partial \Psi}{\partial X}$ تعریف می‌شود، نوشت. ابتدا پارامترهای بدون بعد زیر تعریف می‌شود:

$$\Psi = \frac{\psi}{\alpha}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad X = \frac{x}{H}, \quad Y = \frac{y}{H}. \quad (5)$$

با استفاده از پارامترهای رابطه (۵) معادله‌های حاکم بر مسئله به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -Ra \frac{\partial \theta_p}{\partial X}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta_p}{\partial X} - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \frac{\partial \theta_p}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_p}{\partial Y^2}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_{sb}}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta_{sb}}{\partial Y^2} + \lambda_{sb} = 0. \quad (8)$$

در روابط فوق، Ra عدد ریلی است و به صورت $Ra = (g\beta K(q''' H^2 / k)L) / (v\alpha)$ تعریف می‌شود و $\lambda_{sb} = \frac{q''' H^2}{k(T_h - T_c)}$ حاصل شده است. شرایط مرزی محفظه با

استفاده از پارامترهای بدون بعد (۵) به شرح زیر می‌باشد:

$$\Psi(0, Y) = \Psi(1, Y) = \Psi(X, 0) = \Psi(X, 1) = 0, \quad (9)$$

$$\theta(0, Y) = 0, \quad \theta(1, Y) = 1, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta(X, 0)}{\partial Y} = \frac{\partial \theta(X, 1)}{\partial Y} = 0. \quad (11)$$

لازم به ذکر است در رابطه با مسئله مذکور برای شرط مرزی سطح مشترک قطعه جامد و محیط متخلخل، ابتدا باید با توجه به برابری دما و شار حرارتی قطعه جامد و محیط متخلخل روی این مرز، رابطه (۱۲) دمای سطح مشترک را به دست آورد:

$$k_{sb} \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{sbp, sb} = k_p \frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{sbp, p} \quad (12)$$

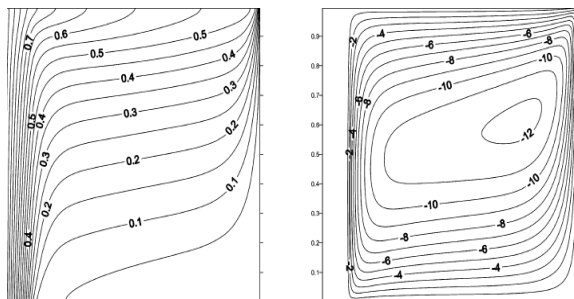
با استفاده از تقریب تفاضل پیشرو مرتبه اول، معادله (۱۲) به صورت زیر خواهد شد:

$$k_{sb} \frac{\theta_{sbp} - \theta_{sb}}{\delta X_{sb}} = k_p \frac{\theta_p - \theta_{sbp}}{\delta X_p}. \quad (13)$$

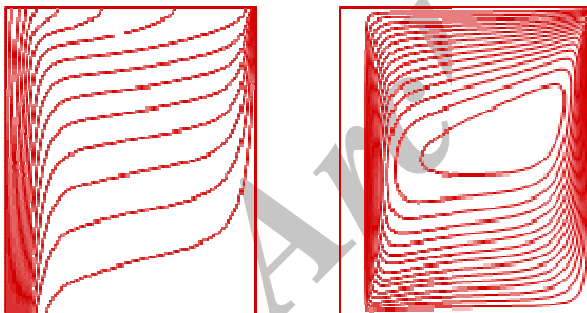
می‌شود که نتایج به‌دست آمده با مرجع [۱۹] به‌خوبی مطابقت دارد. اختلاف موجود بین نتایج، ناشی از تقریب‌های مختلف و یا معیارهای همگرایی متفاوت استفاده شده در زمان حل می‌باشد.

جدول (۱): مقایسه \overline{Nu} با مرجع [۱۹] در $\Gamma = k_{sb}/k_p = 1$.

نویسنده	Saeid [19]	This study
D	\overline{Nu}	
۰/۰۲	۱۰/۴۱	۱۰/۳۸
۰/۱	۵/۰۴۴	۵/۰۱۳
۰/۵	۱/۵۶۶	۱/۵۶۰



(الف)



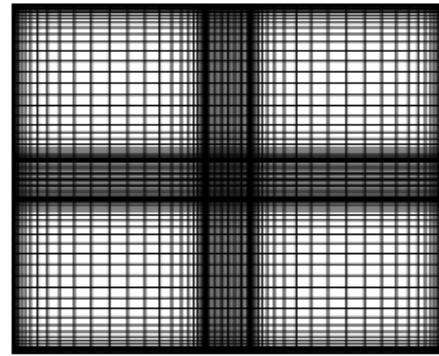
(ب)

شکل (۴): مقایسه محفظه حاوی دیوار جامد با مرجع [۱۹]

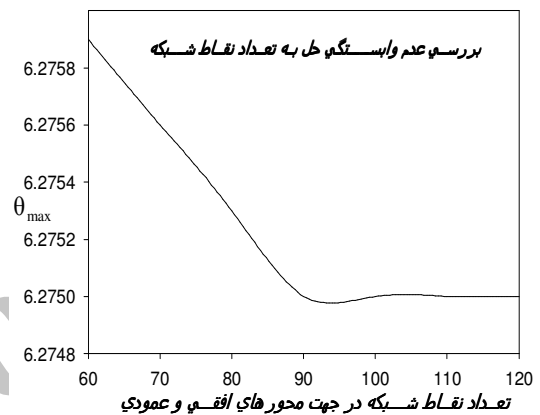
(الف) خطوط دما ثابت (چپ) و جریان (راست) مرجع [۱۹] و (ب)

خطوط دما ثابت (چپ) و جریان (راست) مقاله حاضر.

قابل ذکر است در شکل‌های ۴-الف و ب $Ra = 1000$ و $\Gamma = k_{sb}/k_p = 1$ و ضخامت دیوار جامد $D = 0.1$ است. بعد از اطمینان از عملکرد برنامه رایانه‌ای به بررسی مسئله حاضر پرداخته می‌شود. لازم به‌ذکر است که در این تحقیق کلیه



شکل (۲): نمایی از شبکه‌بندی استفاده شده در روند حل.



شکل (۳): تغییرات ناچیز θ_{max} با افزایش نقاط شبکه (بررسی عدم وابستگی حل به تعداد نقاط شبکه در جهت محورهای افقی و عمودی) ($\lambda_{sb} = 5000, Ra = 1000$)

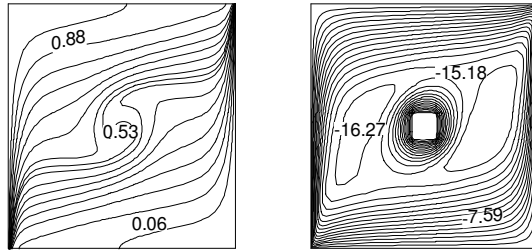
بنابراین برای داشتن سرعت و دقت بالاتر در روند حل، از شبکه 101×101 استفاده شده است. معادلات جبری به‌دست آمده به‌وسیله روش تکرار خط به خط و با استفاده از الگوریتم ماتریس سه قطری حل شده‌اند. همگرایی فرآیند تکرار تا رسیدن به محدودیت زیر ادامه می‌یابد:

$$\left[\frac{\sum |\phi_{i,j}^n - \phi_{i,j}^{n-1}|}{\sum |\phi_{i,j}^n|} \right] \leq 10^{-8} \quad (16)$$

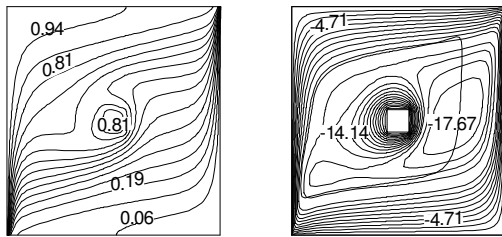
که در آن، ϕ معرف θ و یا Ψ است و n شمارنده تکرار است.

۴- بحث در نتایج

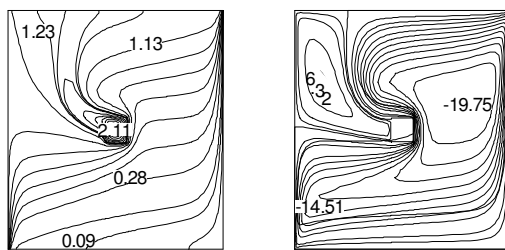
برای اطمینان از صحت کد رایانه‌ای نوشته شده، نتایج مقایسه با مرجع [۱۹] برای حالتی که قطعه جامد بدون تولید انرژی به دیواری با ضخامت متغییر در سمت منبع دما بالا تبدیل شده باشد، آمده است. در شکل ۴ خطوط جریان و دما ثابت و در جدول ۱ تغییرات عدد نوسلت در سه ضخامت مختلف برای دیوار جامد مشاهده می‌شود. با توجه به جدول ۱ و شکل ۴ مشاهده



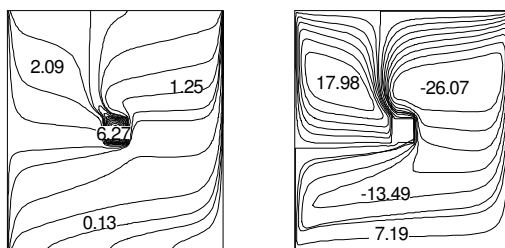
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۵): خطوط جریان (راست) و هم‌دما (چپ)

به ازای λ_{sb} متغیر و $Ra = 1000$.

$$\lambda_{sb} = 10 \quad \Psi_{\max} = 0, \quad \Psi_{\min} = -17.34, \quad \theta_{\max} = 1 \quad (\text{الف})$$

$$\lambda_{sb} = 100 \quad \Psi_{\max} = 0, \quad \Psi_{\min} = -18.84, \quad \theta_{\max} = 1 \quad (\text{ب})$$

$$\lambda_{sb} = 1000 \quad \Psi_{\max} = 6.44, \quad \Psi_{\min} = -21.49, \quad \theta_{\max} = 2.24 \quad (\text{ج})$$

$$\lambda_{sb} = 5000 \quad \Psi_{\max} = 21.12, \quad \Psi_{\min} = -29.22, \quad \theta_{\max} = 6.69 \quad (\text{د})$$

بررسی‌ها در حالت $\Gamma = k_{sb}/k_p = 1$ و ابعاد قطعه جامد $D^2 = 0.1 \times 0.1$ صورت می‌پذیرد.

۴-۱- اثر تغییر λ_{sb} در Ra ثابت

در این قسمت، در عدد رایلی ثابت $Ra = 1000$ ، اثر تغییر نرخ تولید انرژی در قطعه جامد مربعی در قالب پارامتر λ_{sb} بررسی می‌شود. در شکل ۵ خطوط دما ثابت (چپ) و جریان (راست) در حالتی که Ra ثابت است برای چهار مقدار λ_{sb} متفاوت آمده است.

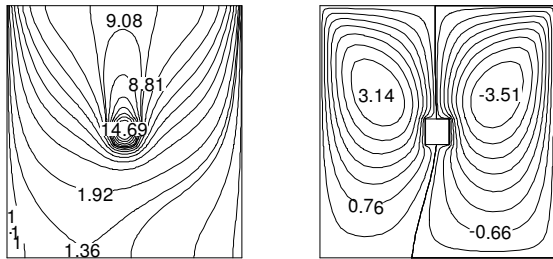
در این شکل می‌توان به تشکیل گردابه‌های مثبت در گوشه بالا و سمت راست محفظه و نیز شکل گرفتن خطوط هم‌دما با تراکم بالا درون قطعه جامد که نشان دهنده افزایش تغییرات دما در اثر افزایش انرژی درون قطعه می‌باشد، با افزایش λ_{sb} اشاره کرد. افقی شدن خطوط هم‌دما با افزایش λ_{sb} را می‌توان ناشی از افزایش قدرت سازوکار انتقال حرارت جابه‌جایی از محفظه دانست.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، به ازای λ_{sb} کوچک (۱۰، ۱۰۰) به دمای بالاتر از دمای مرز گرم دست نیافته و مقدار بیشینه تابع جریان، Ψ_{\max} صفر به دست آمده است، یعنی فقط گردابه‌های هم‌جهت وجود دارند. این در حالی است که برای λ_{sb} های بزرگ گردابه‌هایی با جهت‌های چرخش متفاوت ایجاد می‌شوند. همچنین با توجه به اعداد آورده شده در زیر شکل‌ها دیده می‌شود که با افزایش λ_{sb} به بیشینه دمای محفظه θ_{\max} و شدت گردابه‌های چرخشی افزوده می‌شوند.

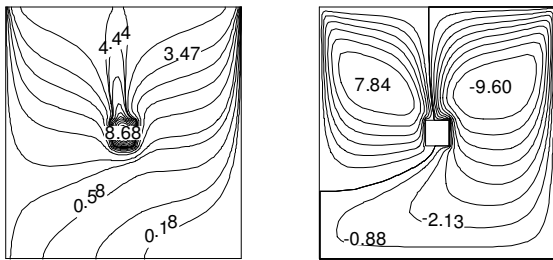
در شکل ۶ تغییرات دما در محور عمودی مرکزی محفظه در حالت Ra ثابت و λ_{sb} متغیر مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۶ افزایش دما با حرکت از پایین محفظه ($Y=0$) به سمت بالا ($Y=1$) ملموس است. دلیل آن را می‌توان در قرار گرفتن سیال گرم‌تر در بالای محفظه به علت دارا بودن چگالی کمتر دانست.

با دقت در شکل ۶ همچنین مشخص است که به ازای λ_{sb} کوچک ($\lambda_{sb}/Ra < 0.1$) دمای بیشینه در خارج از جسم جامد و به ازای λ_{sb} های بزرگ ($\lambda_{sb}/Ra > 0.1$) در مرکز قطعه جامد حاصل می‌شود. برای نشان دادن برقراری موازنه انرژی تولید شده در قطعه جامد و انرژی بیرون رفته از مرزها، نمودار تغییرات \overline{Nu}_h و \overline{Nu}_c در شکل ۷ آمده است.

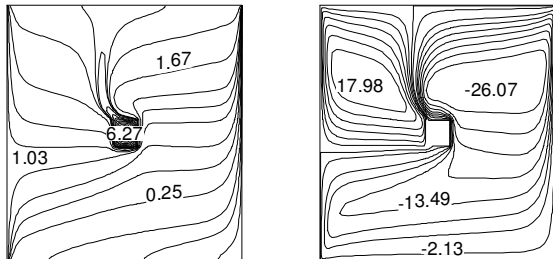
این امر باعث خنک شدن قطعه شده و دمای بیشینه آن را کاهش می‌دهد.



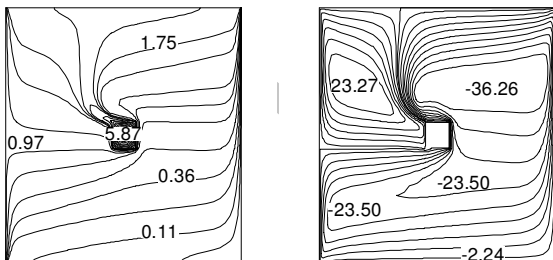
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۸): خطوط جریان (راست) و هم‌دما (چپ)

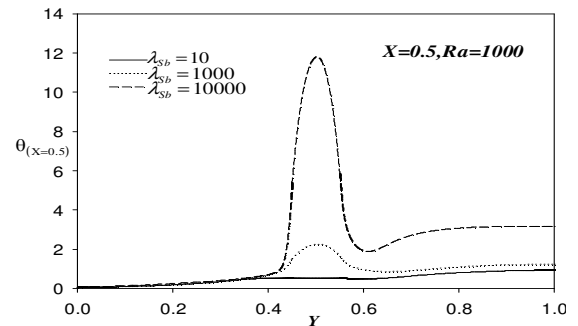
به ازای Ra متغیرو $\lambda_{sb} = 5000$.

الف) $Ra=10 \Psi_{max} = 3.61, \Psi_{min} = -3.98, \theta_{max} = 15.67$

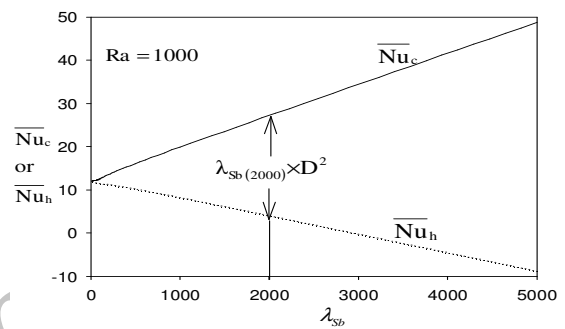
ب) $Ra=10^2 \Psi_{max} = 9.08, \Psi_{min} = -10.84, \theta_{max} = 9.25$

ج) $Ra=10^3 \Psi_{max} = 21.12, \Psi_{min} = -29.22, \theta_{max} = 6.69$

د) $Ra=2 \times 10^3 \Psi_{max} = 27.52, \Psi_{min} = -40.51, \theta_{max} = 6.26$



شکل (۶): تغییرات دما در خط تقارن عمودی محفظه با تغییر λ_{sb} در Ra ثابت (۱۰۰۰).



شکل (۷): تغییرات \overline{Nu} در مرزهای گرم و سرد با λ_{sb} به ازای $Ra = 1000$.

از شکل ۷ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش λ_{sb} ، که نشان از افزایش تولید انرژی در قطعه است، تبادل حرارت از دیواره سرد افزایش و از دیواره گرم کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که در λ_{sb} های بالاتر از حدود ۳۰۰۰ هر دو دیواره حرارت از دست می‌دهند. همچنین موازنه انرژی تولید شده بر واحد حجم درون قطعه جامد و حرارت انتقال یافته از مرزها به صورت رابطه زیر برقرار است:

$$\overline{Nu}_c - \overline{Nu}_h = \lambda_{sb} \times D^2 \quad (17)$$

۴-۲- اثر تغییر Ra در λ_{sb} ثابت

در ادامه، حالتی که λ_{sb} ثابت و برابر ۵۰۰۰ باشد و عدد Ra تغییر کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با دقت در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش Ra گردابه‌های منفی (پادساعت‌گرد) فضای بیشتری از محفظه را اشغال خواهند کرد و گردابه‌های مثبت محدود به گوشه بالا و سمت راست محفظه می‌شوند. همچنین مشخص است با تغییرات Ra از ۱۰ به ۲۰۰۰ گردابه‌های قوی‌تری تشکیل شده است و مقادیر قدر مطلق Ψ_{min} و Ψ_{max} افزایش یافته است. همچنین پیداست، مقادیر θ_{max} با افزایش عدد Ra کاهش یافته است که به علت افزایش قدرت سازوکار جابه‌جایی درون محفظه است.

در شکل ۱۰ با افزایش عدد Ra و تقویت حرکت‌های جابه‌جایی آزاد به نرخ انتقال حرارت از هر دو دیواره سرد و گرم افزوده می‌شود. در این قسمت نیز اختلاف میان مقادیر نوسلت میانگین در مرزهای سرد و گرم با افزایش Ra تقریباً ثابت و متناسب با λ_{sb} می‌باشد و بالانس انرژی به صورت $\overline{Nu}_c - \overline{Nu}_h = \lambda_{sb} \times D^2$ برقرار است.

۵- نتیجه‌گیری

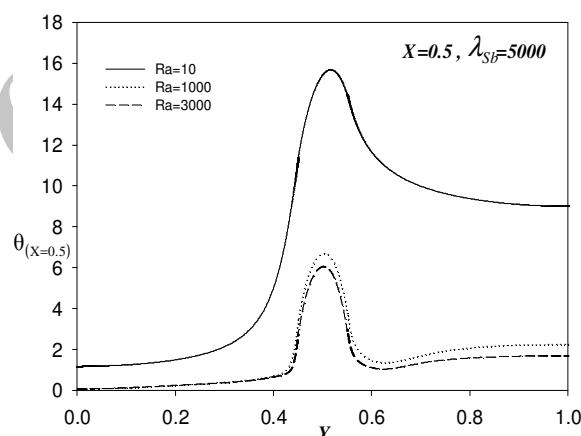
در مقاله حاضر انتقال حرارت ترکیبی جابه‌جایی آزاد و هدایت در یک محفظه مربعی متخلخل حاوی جسم جامد دارای تولید انرژی که در آن انرژی یکنواخت بر واحد حجم تولید می‌شود، به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داد به‌طور کلی در معادله‌های بی‌بعد شده دو پارامتر مؤثر خواهند داشت که عبارت از Ra و λ_{sb} می‌باشد. Ra تابعی از اختلاف دما در مرزهای گرم و سرد و λ_{sb} پارامتری وابسته به تولید انرژی در قطعه جامد است. معادلات بی‌بعد حاکم بر اساس مدل داریسی به دست آمده‌اند و برای حل این معادلات از روش حجم کنترل استفاده شده است. اثر تغییر پارامترهای Ra و λ_{sb} بر میزان انتقال حرارت، میدان جریان و دما بررسی شده است. در مجموع نتایج نشان می‌دهند که در یک λ_{sb} خاص با افزایش Ra کاهش θ_{max} و افزایش قدرت گردابه‌ها ψ را خواهند داشت. در Ra ثابت افزایش λ_{sb} هر چند افزایش قدرت گردابه‌ها ψ را در پی خواهد داشت، اما به‌علت افزایش تولید انرژی محفظه را گرم‌تر کرده و موجب افزایش θ_{max} می‌شود. همچنین نشان داده شد که به‌ازای نسبت‌های کوچک λ_{sb} به Ra ($\frac{\lambda_{sb}}{Ra} \leq 0.1$) دمای بیشینه در خارج از جسم جامد و به‌ازای نسبت‌های بزرگ‌تر در مرکز قطعه جامد حاصل می‌شود. اثرات تغییر در λ_{sb} و Ra بر پارامتر \overline{Nu} نیز بررسی شد و مشخص شد که افزایش λ_{sb} و Ra باعث افزایش نرخ انتقال حرارت از محفظه خواهد شد.

۶- مراجع

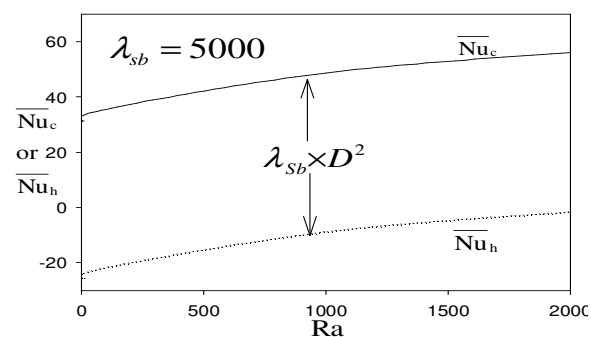
1. Nield, D.A. and Bejan, A. "Convection in Porous Media", Third Ed., 2006.
2. Ingham, D.B., Bejan, A., Mamut, E., and Pop., I. "Emerging Technologies Techniques in Porous Media, Kluwer Academic, Dordrecht", 2004.
3. Ingham, D.B. and pop., I., "Transport Phenomena in Porous Media", Book, Vol. 1 and 2, Pergamon, Oxford, 2005.

با دقت در شکل ۹ که نشان دهنده تغییرات دما در خط تقارن عمودی محفظه می‌باشد، مشخص است که به‌ازای $\lambda_{sb} = 5000$ در اعداد Ra کوچک ($Ra \leq 10$) تفاوت چشم‌گیری بین منحنی‌های توزیع دما با حالت اعداد Ra بزرگ‌تر مشاهده می‌شود و دلیل آن را می‌توان عدم حرکت قوی سیال درون محفظه در این حالت دانست که اختلاف دمای زیاد بین بالا و پایین محفظه را در پی خواهد داشت. nZ در این حالت به‌علت بزرگ بودن مقدار تولید انرژی در جسم، $\frac{\lambda_{sb}}{Ra} > 0.1$ ، دمای بیشینه در مرکز جسم حاصل شده است.

همچنین در شکل ۹ نیز برای نشان دادن برقراری موازنه انرژی تولید شده در قطعه جامد و انرژی بیرون رفته از مرزها، نمودار تغییرات \overline{Nu}_c و \overline{Nu}_h با Ra به‌ازای $\lambda_{sb} = 5000$ در شکل ۱۰ آورده شده است.



شکل (۹): تغییرات دما در خط تقارن عمودی محفظه با تغییر Ra در λ_{sb} ثابت (۵۰۰۰).



شکل (۱۰): تغییرات \overline{Nu} در مرزهای گرم (h) و سرد (c) با Ra در $\lambda_{sb} = 5000$.

13. Grosan, A.T., Revnic, B.C., pop, I., and Ingham, D.B. "Magnetic Field and Internal Heat Generation Effects on the Free Convection in a Rectangular Cavity Filled with a Porous Medium", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No's. 5-6, pp. 1525-1533, 2009.
14. Mealey, L.R. and Merkin, J.H. "Steady Finite Rayleigh Number Convective Flows in a Porous Medium with Internal Heat Generation", *Int. J. Thermal Sci.*, Vol. 48, No. 6, pp. 1068-1080, 2009.
15. Taeibi-Rahni, M., Khayat, M., and Aliabbasi, R. "Numerical Simulation of Forced Convection Flow through a Flattened Pipe Using Porous Material in the Central and Boundary Arrangement", *Aerospace Mech. J., Thermal Sci.*, Vol. 9, No. 1, pp. 77-85, 2013 (In Persian).
16. Kayhani, M.M. and Mohebi, R. "Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer on the Porous Media Between Two Parallel Plates Using the Lattice Boltzmann Method", *Aerospace Mech. J., Thermal Sci.*, Vol. 9, No. 1, pp. 63-76, 2013, (In Persian).
17. Patankar, S.V. "Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer", Innovative Research, Inc. USA, 1996.
18. Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T. "Computational Fluid Dynamics For Engineers", Book, 1993.
19. Saeid, N.H. "Conjugate Natural Convection in a Porous Enclosure: Effect of Conduction in one of the Vertical Walls", *Int. J. Thermal Sci.*, Vol. 46, No. 6, pp. 531-539, 2007.
4. Vafai, K.A. "Hand Book of Porous Media", New York, 2000.
5. Anderson, R. and Lauriat, G. "The Horizontal Natural Convection Boundary Layer Regime in a Closed Cavity", In Proc. 8th, *Int. Heat Transfer Conf.* San Francisco USA, Vol. 98, pp. 1453-1458, 1986.
6. Kimura, S. and Bejan, A. "Natural Convection in Differentially Heated corner Region", *Phys. Fluids* Vol. 28, No. 10, pp. 2980-2989, 1985.
7. pop, I. and Saeid, N.H. "Transient Free Convection in a Square Cavity Filled with a Porous Medium", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No's. 8-9, pp. 1917-1924, 2004.
8. Chao, P. and Ozoe, H. "Laminar Natural Convection in an Inclined Rectangular Box with Lower Surface Half Heated and Half Insulated", *AZME J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 105, No. 3, pp. 425-432, 1983.
9. Granzarolli, M.M. and Milanez, L.F. "Natural Convection in Rectangular Enclosures Heated from Below and Symmetrically Cooled from the Sides", *Int J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 6, pp. 1063-1073, 1995.
10. Saeid, N.H. "Conjugate Natural Convection in a Vertical Porous Layer Sandwiched by Finite Thickness Walls", *Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 34, pp. 200-216, 2007.
11. Chamkha, A.J. and Khalil Khanafer, I.C. "Natural Convection From an Inclined plate Embedded in a Variable Porosity Porous Medium Due to Solar Radiation", *Int. J. Therm Sci.*, Vol. 41, No. 1, pp. 73-81, 2002.
12. pop, I. and Saeid, N.H. "Mixed Convection From two Thermal Sources in a Vertical Porous Layer", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No's. 19-20, pp. 4150-4160, 2005.