

اثر یک بافل روی انتقال حرارت جابه‌جایی توأم از یک محفظه‌ی باز با قطعات گرمازا

قاسم محمودی^۱ و بهزاد قاسمی^۲

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهرکرد

(تاریخ دریافت: ۸۹/۹/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۳)

چکیده

در این بررسی، جریان جابه‌جایی توأم آزاد و اجباری از یک محفظه‌ی باز که در یک کانال افقی قرار گرفته، به روش عددی حل شده است. سه قطعه‌ی گرمازا در کف محفظه و یک بافل عمودی بر روی دیواره‌ی بالایی کانال قرار گرفته است. جریان به‌صورت یکنواخت در دمای سرد وارد کانال شده و با کف محفظه که گرم می‌باشد، تبادل حرارت می‌کند. معادلات مومنتوم و انرژی حاکم به‌روش حجم کنترل جبری شده و به کمک الگوریتم سیمپل به صورت هم‌زمان حل می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که افزودن بافل به کانال تهویه محفظه را در اعداد ریچاردسون پایین بهبود بخشیده ولی در اعداد ریچاردسون بزرگتر اثر معکوس دارد. همچنین با بررسی‌های انجام گرفته بر روی ارتفاع و موقعیت بافل ملاحظه می‌شود که با افزایش ارتفاع بافل و قرار گرفتن آن در ورودی محفظه، میزان انتقال حرارت از محفظه افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جابه‌جایی توأم اجباری و آزاد، کانال، محفظه باز، بافل

Effect of a Baffle on Mixed Convection Heat Transfer from an Open Cavity with Heat Sources

Gh. Mahmoudi and B. Ghasemi

Mech. Eng. Dep't.

Shahrekord Univ.

(Received: 22 Nov. 2010; Accepted: 25 Sep. 2011)

ABSTRACT

This paper presents a numerical investigation of mixed convection heat transfer from an open cavity in a horizontal channel. Three heat sources are located at the bottom of the cavity and a baffle hanging from the top wall of the channel. A free flow at a relatively lower temperature enters the channel and is expected to remove heat from the heat sources. The governing equations are solved numerically with a finite volume approach using the SIMPLE algorithm. The results of this study show that due to the existence of the baffle, the ventilation performance of the cavity is improved at low Richardson numbers, while it is deteriorated at high Richardson numbers. The length and location of the baffle also show to have a significant impact on the ventilation performance of the cavity.

Keywords: Mixed Convection, Channel, Open Cavity, Baffle

۱- کارشناس ارشد: ghasem_mahmoodi2@yahoo.com

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

فهرست علائم

۱- مقدمه

امروزه انتقال حرارت در کانال‌های حاوی محفظه باز با توجه به کاربردهای مهندسی فراوان نظر اندیشمندان را به خود معطوف نموده است. خنک‌کاری اجزاء الکترونیکی، مبدل‌های حرارتی فین‌دار، محفظه‌های دریافت‌کننده خورشیدی، تهویه مطبوع و خنک‌کاری مرطوب از جمله این کاربردهاست.

در تحقیقی وو و پرنگ^۱ مطالعه‌ای روی افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در یک کانال افقی با موانع گرم‌مازا روی دیواره پایینی انجام داده‌اند. آنها برای افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی از تیغه‌ی مورب که سر راه جریان داخل کانال نصب شده استفاده کردند. بررسی‌ها در زوایای مختلف تیغه و مقادیر مختلف عدد رینولدز و گراشف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که در زاویه ۶۰ درجه تیغه نسبت به جریان ورودی و $Gr/Re^2 = 20$ ، بیشترین افزایش انتقال حرارت نسبت به حالت بدون تیغه حاصل می‌شود [۱].

تحقیقی عددی با موضوع جابه‌جایی از یک محفظه باز در داخل یک کانال افقی توسط مانکا^۲ و همکارانش در سال ۲۰۰۳ انجام شده است. در این مقاله، جابه‌جایی توأم در یک کانال افقی با محفظه باز گرم‌مازا بررسی شده است. این مطالعه در سه مرحله انجام شده و در هر مرحله یک دیواره محفظه (راست، چپ و پایین) به عنوان دیواره گرم و بقیه سطوح عایق در نظر گرفته شده است. نتایج آنها نشان داد که جابه‌جایی توأم به‌طور کلی تابعی از نیروی شناوری، عدد رینولدز و عدد ریچاردسون می‌باشد. همچنین آنها نشان دادند که زمانی که منبع گرم بر روی دیواره سمت راست محفظه قرار داشته باشد، ماکزیمم دما و عدد نوسلت میانگین ظاهر شده و ماکزیمم دما با کاهش عدد رینولدز و افزایش عدد ریچاردسون کاهش می‌یابد [۲].

در همین راستا لانگ^۳ و همکارانش در تحقیقی به بررسی اثرات شناوری در قالب عدد گراشف، بر روی انتقال حرارت از محفظه در کانال‌های افقی پرداخته‌اند. این تحقیق برای محدوده وسیعی از پارامترهای حاکم $1 < Re < 2000$ و $0 < Gr < 10^6$ همچنین تغییر عرض محفظه انجام شده است.

D	عمق محفظه، m
g	شتاب جاذبه زمین، ms^{-2}
Gr	عدد گراشف، $Gr = g\beta\Delta TH^3 / \nu^2$
h	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، $Wm^{-2}k^{-1}$
H	ارتفاع کانال، m
K	ضریب انتقال حرارت هدایت، $Wm^{-1}k^{-1}$
L_e	طول خروجی کانال، m
P	فشار بی بعد
n	تعداد تکرار
Nu_m	نوسلت متوسط کل محفظه
$Nu_{m,b}$	نوسلت متوسط کل محفظه با افزودن بافل
Pr	عدد پراانتل، ν/α
Re	عدد رینولدز، $u_c H / \nu$
Ri	عدد ریچاردسون، Gr/Re^2
t	زمان، s
T	دما، k
T_c	دمای سطح سرد و ورودی، k
T_h	دمای سطح گرم، k
u	سرعت در جهت x ، m/s
u_c	سرعت یکنواخت ورودی، m/s
U	سرعت بی بعد در جهت x ، u/u_c
v	سرعت در جهت y ، m/s
V	سرعت بی بعد در جهت y ، v/u_c
X	طول بدون بعد، x/H
Y	عرض بدون بعد، y/H

علائم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی، m^2/s
β	ضریب انبساط گرمایی، $1/k$
θ	دمای بی بعد، $(T - T_c)/(T_h - T_c)$
μ	لزجت دینامیکی، $Pa.s$
ν	لزجت سینماتیکی، m^2/s
ρ	چگالی، Kg/m^3
τ	زمان بی بعد، tu_c/H
ϕ	متغیر عمومی

1 - Wu and Perng

2 - Manca

3 - Leong

نفوذ گرما از منبع گرم به سطح بالایی کانال افقی دارد [۶]. در سال ۲۰۰۹، امین الساداتی و قاسمی [۷] در تحقیقی به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در یک کانال افقی با محفظه باز گرمازا پرداخته‌اند. در این مطالعه به بررسی اثر موقعیت منبع گرم درون محفظه که در سه مرحله انجام شده است پرداخته‌اند. در هر مرحله منبع گرم روی یکی از دیواره‌های محفظه قرارداد داشت و بقیه دیواره‌ها عایق فرض شده‌اند. نتایج آنها نشان داد که زمانی که منبع گرم بر روی دیواره سمت راست محفظه قرار داشته باشد، ماکزیمم عدد نوسلت میانگین ظاهر شده و بعد از آن منبع در صورتی که کف محفظه قرار بگیرد نسبت به سمت چپ محفظه میزان انتقال حرارت بهتری دارد.

همان گونه که اشاره گردید، در مرجع [۱] محققین در جریان درون یک کانال از یک بافل برای هدایت جریان به سمت منابع گرم، که روی دیواره پایین کانال قرارداد شده‌اند، استفاده کرده‌اند. در ادامه این تحقیق از این ساز و کار برای محفظه باز گرمازا استفاده شده است. که در این راستا به منظور هدایت بهتر جریان به داخل محفظه و عبور بیشتر جریان از روی قطعات گرم می‌توان از یک بافل هدایت‌کننده که روی دیوار بالایی کانال نصب شده استفاده کرد. در این تحقیق، که در بررسی‌های قبلی به چشم نمی‌خورد، اثر افزایش بافل هدایت‌کننده، اثر ارتفاع و موقعیت بافل روی میزان انتقال حرارت از محفظه باز مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- بیان مسئله

مطابق شکل ۱، کانالی دوبعدی همراه با یک محفظه باز در نظر گرفته می‌شود. جریان سیال هوا ($Pr = 0.71$) به‌طور یکنواخت از ورودی با سرعت u_c و دمای ثابت T_c وارد کانال شده و از سمت راست کانال خارج می‌شود. شتاب گرانشی g ، در جهت $-y$ عمل می‌کند. کف محفظه حاوی قطعات گرم در درجه حرارت ثابت T_h قرار دارد. بقیه دیواره پایینی کانال و دیواره‌های کناری محفظه به خوبی عایق شده است. دیواره بالایی کانال در دمای ثابت T_c است.

این نتیجه حاصل شده است که مقدار عدد رینولدز و گراشرف روی شکل میدان جریان تأثیر گذاشته و منجر به ایجاد گردابه‌های چرخشی متفاوتی می‌شوند. این بررسی در حالت‌های مختلف جابه‌جایی آزاد، اجباری و توأم انجام شده است. نتایج نشان داده است که گذر به جابه‌جایی توأم به نسبت عدد گراشرف به رینولدز بستگی دارد. برای جریان‌های با گراشرف بالا ($Gr > 10^5$) جریان ممکن است ناپایدار شود. در حالت جابه‌جایی توأم، انتقال حرارت نسبت به دو حالت دیگر کاهش می‌یابد. به‌خصوص برای $Gr > 10^3$ یک مقدار بحرانی عدد رینولدز وجود دارد که میزان انتقال حرارت از کف محفظه کمترین مقدار است [۳].

فانگ^۱ در تحقیقی نقش جابه‌جایی توأم در کانال همراه با یک محفظه باز گرمازا را در نرخ تمیزکاری هیدرودینامیکی سیال داخل محفظه بررسی کرد. نتایج نشان می‌دهد که تغییر در عدد گراشرف به علت برهم‌کنش جریان اجباری داخل کانال و جریان آزاد داخل محفظه باعث تغییر شدیدی در نرخ تمیزکاری هیدرودینامیکی از محفظه می‌شود [۴].

فانگ در مطالعه عددی دیگری، درخصوص جابه‌جایی توأم در کانال افقی همراه با محفظه باز، فرآیند خروج سیال داخل محفظه را توسط جریان سیالی با همان چگالی در کانال بررسی کرده است. او نشان داده است که تغییر نیروهای غوطه‌وری بر اثر انتقال حرارت از محفظه و همچنین تغییر پروفیل سرعت جریان ورودی به کانال باعث تغییر شدیدی در شکل گردابه‌های درون محفظه و در نتیجه میزان انتقال حرارت و تمیزکاری محفظه دارد. نتایج همچنین نشان می‌دهد که جریان کوئت ورودی در اعداد گراشرف بالا منجر به بیشترین میزان بیرون‌دهی سیال از محفظه می‌شود [۵].

در سال ۲۰۰۶، مانکا^۲ و همکارانش یک مطالعه تجربی روی جا به جایی توأم در یک کانال افقی با محفظه باز که منبع گرم در دیواره چپ محفظه قرار داشت انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که برای $Re = 1000$ ، دو جریان مجزا در کانال ایجاد می‌شود. یک جریان اجباری در کانال و یک جریان چرخشی در حفره ایجاد می‌شود و برای $Re = 100$ ، نیروی شناوری یک اثر تعیین‌کننده ای در

1-Fang

2-Manca

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad P = \frac{\bar{p}}{\rho u_c^2}, \quad \tau = \frac{u_c t}{H}$$

که در این روابط، H طول مشخصه (عرض کانال) و u_c سرعت مرجع (سرعت ورودی) است. با این متغیرهای بی‌بعد و با توجه به تعریف اعداد بدون بعد مهم (روابط ۶)، معادلات در نهایت به فرم بی‌بعد روابط (۷-۱۰) در می‌آیند:

$$Re = \frac{\rho u_c H}{\mu}, \quad Gr = \frac{g\beta(T_h - T_c)H^3}{\nu^2}, \quad (6)$$

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2}, \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_p}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

(۷) پیوستگی

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0,$$

(۸) ممنتوم X

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

(۹) ممنتوم Y

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

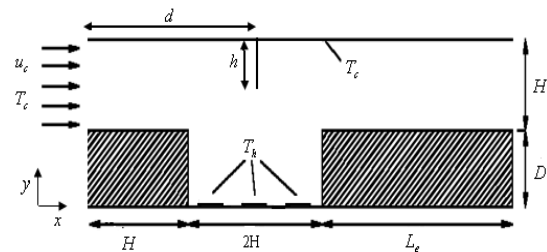
(۱۰) انرژی

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re \cdot Pr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right).$$

۴- شرایط اولیه و شرایط مرزی

شرایط مرزی هیدرودینامیکی معادلات فوق شامل شرط عدم لغزش روی دیواره‌ها ($U, V=0$)، سرعت ورودی یکنواخت ($U=1, V=0$)، شرط توسعه‌یافتگی سرعت در خروجی، $\partial U/\partial X = 0$ ، $V=0$ است. شرایط مرزی حرارتی نیز دمای ثابت منابع گرم در کف محفظه $\theta=1$ ، دمای ثابت در دیواره بالایی و ورودی $\theta=0$ و بقیه دیواره‌ها و خروجی $\partial \theta/\partial N = 0$ (N مختصه بی‌بعد X یا Y) می‌شود.

شرایط مرزی خروجی با فرض جریان توسعه‌یافته در خروجی کانال بیان شده است. لازم به ذکر است که طول خروجی در چند حالت مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مشخص شد که طول خروجی $L_e = 2H$ ، شکل ۱، شرایط توسعه‌یافتگی در خروجی کانال را کاملاً ارضاء می‌کند. میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است. با توجه به مقادیر بدون بعد، نوسلت موضعی روی هر یک از



شکل (۱): هندسه کلی میدان حل، کانال همراه با یک محفظه باز گرمازا.

هدف این است که با افزودن بافل به کانال اثر بافل بر نرخ انتقال حرارت بررسی شده همچنین اثر تغییرات ارتفاع بافل (h) و موقعیت بافل (d) بر نرخ انتقال حرارت بررسی شود.

۳- معادلات اساسی حاکم بر جریان

معادلات حاکم برای جریان آرام دوبعدی و داخل کانال، با فرض سیال نیوتنی غیر قابل تراکم و با استفاده از تقریب بوزینسک به صورت زیر می‌باشد:

(۱) پیوستگی

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

(۲) ممنتوم در جهت X

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

(۳) ممنتوم در جهت Y

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

(۴) انرژی

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

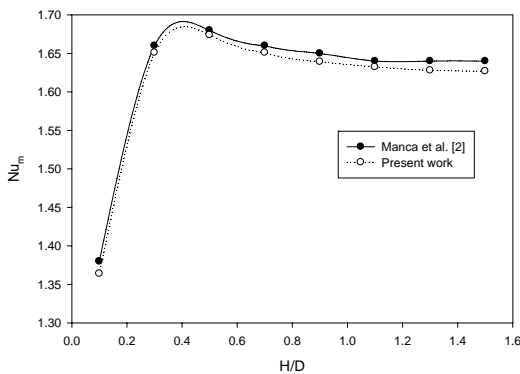
برای تحلیل جامع‌تر، معادلات به صورت بی‌بعد تعریف می‌شوند. برای بی‌بعد کردن معادلات حاکم، متغیرهای زیر تعریف می‌شوند:

$$Y = \frac{y}{H}, \quad U = \frac{u}{u_c}, \quad V = \frac{v}{u_c}, \quad (5)$$

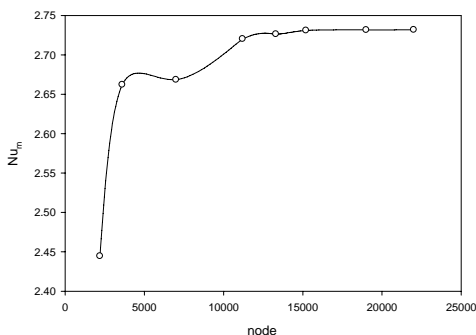
$$X = \frac{x}{H},$$

منابع حرارتی به صورت زیر است:

نتایج حاصل از این بررسی در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل، تغییرات نوسلت متوسط بر حسب نسبت عدد بدون بعد عرض کانال به عمق محفظه (H/D) و به ازای عدد گراشف $Gr = 10^3$ و عدد رینولدز $Re = 100$ ($Ri = 0.1$) مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود اختلاف نتایج حاصل از دو بررسی قابل قبول است. در اینجا حداکثر اختلاف نتایج ۱.۲۷٪ می‌باشد که قابل چشم پوشی است. پس از اطمینان از درستی کد رایانه‌ای تهیه شده، به بررسی قسمت‌های مختلف پرداخته شد. برای انتخاب شبکه حل مناسب، ابتدا بررسی روی تعداد نقاط شبکه انجام گرفت. بدین منظور اثر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت متوسط که بیانگر نرخ انتقال حرارت از کف محفظه می‌باشد، بررسی شد. نمونه‌ای از بررسی‌های انجام شده در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل (۲): مقایسه نوسلت متوسط به دست آمده از مطالعه حاضر با مرجع [۲]. $Pr = 0.71, Ri = 0.1, Re = 100$.



شکل (۳): تأثیر تعداد نقاط شبکه روی مقادیر نوسلت متوسط کل منابع گرم برای کانال محفظه‌دار با بافل، $Pr = 0.71, Ri = 1.0, Gr = 10^4$.

$$Nu_x = -\frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0}, \quad (11)$$

می‌توان با انتگرال‌گیری از رابطه فوق روی سطح هر یک از سه منبع گرم، نوسلت متوسط آن منبع ($Nu_{m,sl}$) را به صورت زیر بیان کرد:

$$Nu_{m,sl} = \frac{1}{l_1} \int_{l_1} \left(-\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Y=0} dX \quad (12)$$

که در این رابطه، (l_1) طول بدون بعد منبع گرم می‌باشد. به همین ترتیب می‌توان مقدار نوسلت متوسط را روی منابع گرم دیگر و یا هر سه منبع (Nu_m) محاسبه نمود.

۵- روش عددی

معادلات (۷-۱۰) همراه با شرایط مرزی گفته شده به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابه‌جا شده شبکه‌بندی شده است. در روش شبکه‌ی جابه‌جا شده علاوه بر راحتی محاسبه دبی‌ها روی وجوه حجم کنترل به علت معلوم بودن سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می‌شود. جهت حل هم‌زمان معادلات جبری شده، از الگوریتم سیمپل که جزئیات کامل آن در مرجع [۸] آمده استفاده شد. همچنین از معیار همگرایی زیر استفاده شده است:

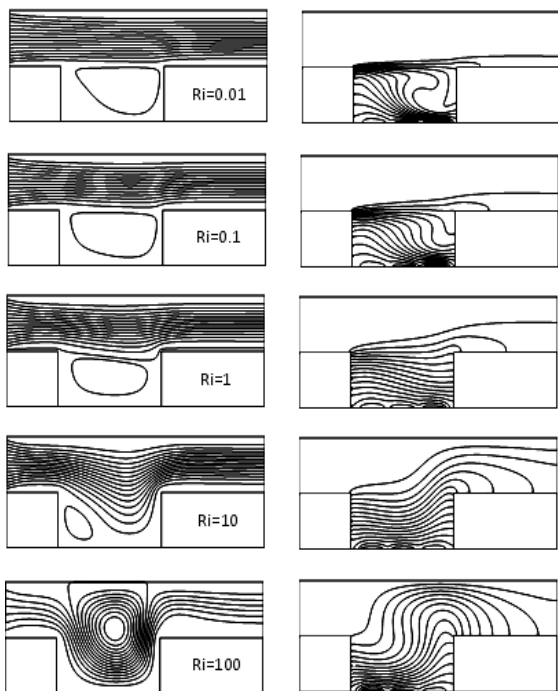
$$\sum_j \sum_i \sqrt{\left(\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\phi^{n+1}} \Big|_{i,j} \right)^2} \leq 10^{-7}, \quad (13)$$

که در آن، n تعداد تکرار و ϕ متغیر عمومی می‌باشد.

۶- نتایج

برای اجرای الگوریتم مورد نظر برنامه‌ای رایانه‌ای به زبان فرترن نوشته شد. جهت اثبات کارایی روش اطمینان از درستی کد نوشته شده، نتایج عددی حاصل از آن با کار مشابه انجام گرفته توسط دیگران یعنی جریان در کانال با محفظه گرم‌زا مقایسه شد. برای این منظور ابعاد کانال و محفظه و همچنین شرایط مرزی جریان مطابق مرجع [۲]، که یک تحلیل عددی و بر اساس روش المان محدود مبتنی بر باقیمانده وزنی می‌باشد، اصلاح شد. در این مقاله، منبع گرم کف محفظه و به صورت شار یکنواخت اعمال شده است و نتایج به صورت عدد نوسلت متوسط بررسی و مقایسه شد.

نسبت به دو منبع دیگر بیشتر می‌باشد که حاکی از آن است که تبادل حرارت بهتری دارد. با افزایش عدد ریچاردسون و حاکم شدن جابه‌جایی آزاد، این تراکم به منبع سمت چپ انتقال پیدا می‌کند. پس می‌توان گفت که موقعیت منابع در کف محفظه در میزان انتقال حرارت از محفظه مؤثر می‌باشد.



شکل (۴): میدان جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) در اعداد ریچاردسون مختلف برای کانال بدون بافل ($D/H = 1$ و $Gr = 10^3$).

در مرحله بعد به منظور بررسی اثر افزایش بافل بر میزان انتقال حرارت با ثابت نگه داشتن عدد گراشف و با تغییر عدد ریچاردسون در محدوده $0.01 \leq Ri \leq 100$ به بررسی اثر افزایش بافل (شکل ۱) بر نرخ انتقال حرارت از محفظه پرداخته شده است.

در شکل ۵ میدان جریان و دما به ازای اعداد ریچاردسون مختلف و عدد گراشف $Gr = 10^3$ برای کانال دارای بافل ارائه شده است. خطوط جریان نشان می‌دهد که در اعداد ریچاردسون پایین $Ri \leq 10$ ، با افزودن بافل تمایل جریان سرد داخل کانال به نفوذ به داخل محفظه نسبت به حالت بدون بافل بیشتر شده است. این نفوذ بیشتر منجر به جابه‌جایی بیشتر سیال از مجاور منابع گرم کف محفظه

در این شکل تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب تعداد نقاط شبکه برای کانال با بافل به ارتفاع $h/H = 0.5$ و در موقعیت $d/H = 2$ مشاهده می‌شود. باید توجه داشت عدد نوسلت به‌عنوان پارامتری تأثیرپذیر از تعداد نقاط شبکه و نیز میدان جریان و دما برای این بررسی مناسب است. بر این اساس، شبکه غیر یکنواخت 190×70 برای محاسبات بعدی انتخاب شد.

۶-۱- اثر افزایش بافل به کانال

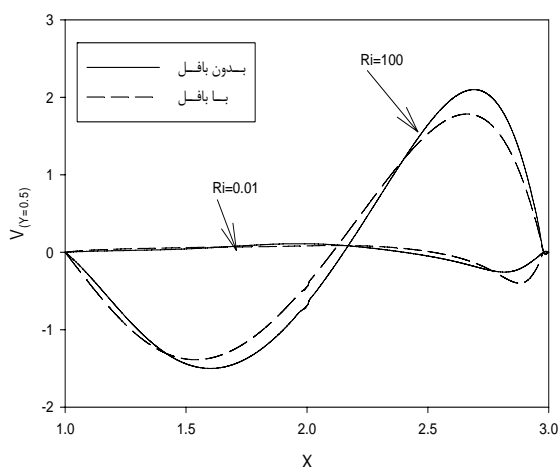
پس از انتخاب شبکه مناسب و اطمینان از درستی کد نوشته شده، در ابتدا شکل ۱ را بدون بافل در نظر گرفته و سپس با ثابت نگه داشتن عدد گراشف و با تغییر عدد ریچاردسون در محدوده $0.01 \leq Ri \leq 100$ به بررسی اثر تغییر عدد ریچاردسون بر میدان جریان، دما و نرخ انتقال حرارت از محفظه پرداخته شده است.

میدان جریان و دما به ازای عدد گراشف $Gr = 10^3$ در شکل ۴ در اعداد ریچاردسون مختلف در حالت بدون بافل ارائه شده است. با افزایش عدد ریچاردسون، نقش جابه‌جایی آزاد در انتقال حرارت جابه‌جایی توأم افزایش یافته و عمده انتقال حرارت کل توسط انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد انجام می‌گیرد.

با بررسی میدان جریان در شکل ۴ مشاهده می‌شود که برای $Ri \leq 1$ اثرات جابه‌جایی طبیعی ناچیز است. دو جریان مجزا شامل جریان اجباری در کانال و جریان چرخشی در محفظه ایجاد می‌شود. با افزایش عدد ریچاردسون از 0.1 تا 1 که حاکی از کاهش عدد رینولدز می‌باشد، میزان جابه‌جایی سیال از روی منابع گرم کاهش پیدا کرده که بیانگر کاهش میزان انتقال حرارت از محفظه است. با افزایش عدد ریچاردسون، نقش جابه‌جایی آزاد نسبت به اجباری در انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در $Ri \geq 10$ گردابه‌های چرخشی قوی‌تر می‌شوند. افزایش قدرت گردابه‌ها، بیانگر جابه‌جایی بیشتر سیال در محفظه و همچنین انتقال حرارت بیشتر از کف محفظه می‌باشد. مطالب ذکر شده در شکل ۷ نیز قابل مشاهده می‌باشند.

ملاحظه می‌شود که در اعداد ریچاردسون کوچک تراکم خطوط هم‌دما در داخل محفظه روی منبع سمت راستی

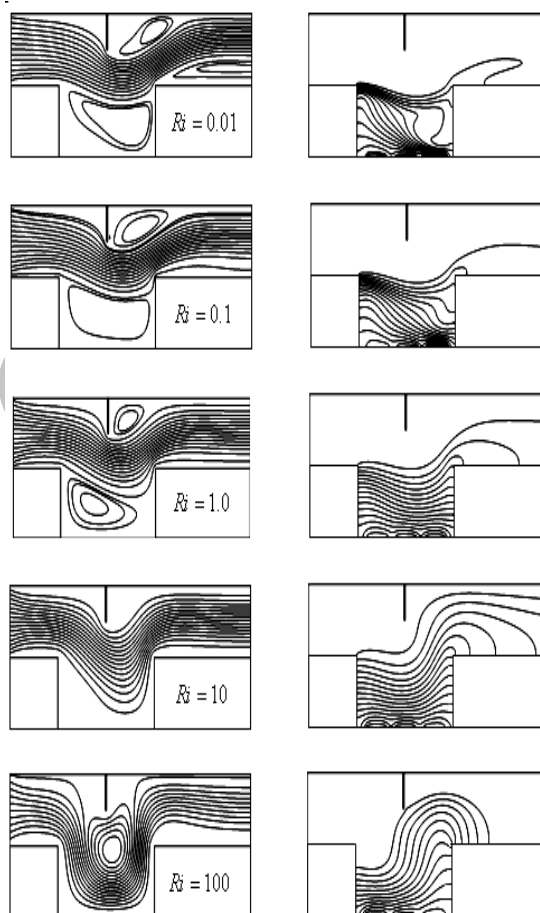
می‌دهد، بهتر مقایسه کرد. زمانی که عدد ریچاردسون کوچک بوده و جریان اجباری حاکم بر مسئله است، با افزودن بافل، سرعت عمودی افزایش می‌یابد. این امر نشان از جابه‌جایی بیشتر سیال در محفظه است که منجر به تبادل حرارت بهتر می‌شود. ولی در عدد ریچاردسون بزرگ، زمانی که جابه‌جایی آزاد حاکم بر مسئله است، سرعت عمودی کاهش یافته که نشان از گردابه‌های ضعیف‌تر نسبت به حالت بدون بافل دارد و می‌تواند منجر به کاهش انتقال حرارت شود.



شکل (۶): پروفیل مؤلفه عمودی سرعت بی‌بعد در خط افقی میانی محفظه به ازای اعداد ریچاردسون مختلف در دو حالت بدون بافل و با بافل، $Gr = 10^3$ ، $d/H = 2$ ، $D/H = 1$ ، $h/H = 0.5$.

شکل ۷ به منظور نشان دادن تأثیر افزایش بافل بر روی انتقال حرارت، تغییرات عدد نوسلت متوسط کل (سه منبع گرم) را بر حسب تغییرات عدد ریچاردسون در دو حالت بدون بافل و با بافل نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در حالت بدون بافل، نوسلت با افزایش ریچاردسون ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. در حقیقت در اعداد ریچاردسون کوچک ($Ri = Gr/Re^2$) حاکم بر انتقال حرارت، جابه‌جایی اجباری و در اعداد ریچاردسون بزرگ جابه‌جایی آزاد حاکم است. بنا بر این، با توجه به ثابت بودن عدد گراشف، در $Ri = 0.01$ عدد Re بزرگ بوده و شدت جریان سرد خارجی و انتقال حرارت زیاد است. با بزرگ شدن عدد ریچاردسون تا زمانی که مکانیزم

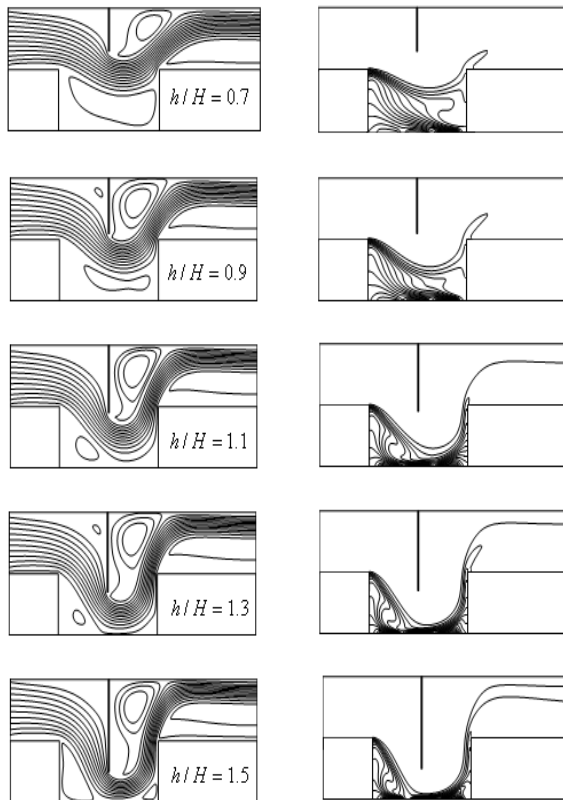
می‌شود. از سوی دیگر خطوط هم‌دما نسبت به حالت بدون بافل متراکم‌تر شده که می‌توان گفت نسبت به حالت بدون بافل تبادل حرارت بهتر صورت می‌گیرد. ولی در عدد ریچاردسون بزرگ ($Ri = 100$) که مکانیزم جابه‌جایی آزاد حاکم می‌باشد، افزودن بافل مانعی در رشد گردابه‌های چرخشی درون محفظه می‌باشد. به نظر می‌رسد این امر با کاهش جابه‌جایی سیال از مجاور منابع گرم همراه بوده و تبادل حرارت کاهش خواهد یافت.



شکل (۵): میدان جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) در اعداد ریچاردسون مختلف برای کانال بافل‌دار، $d/H = 2$ ، $D/H = 1$ ، $Gr = 10^3$ ، $h/H = 0.5$.

تغییرات جریان سیال را می‌توان در شکل ۶ که سرعت‌های عمودی میانی محفظه ($Y=0.5$) در دو حالت بدون بافل و با بافل را در دو عدد ریچاردسون مختلف نشان

میزان انتقال حرارت بررسی شده است. میدان جریان و میدان دما به ازای عدد ریچاردسون ۰/۰۱ و عدد گراشف 10^3 به ازای ارتفاعهای مختلف بافل در شکل ۸ ارائه شده است.

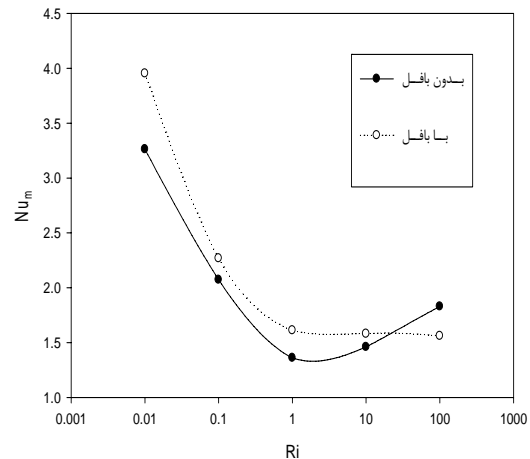


شکل (۸): میدان جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) در ارتفاعهای مختلف بافل

$$d/H = 2 \text{ و } D/H = 1, Ri = 0.01, Gr = 10^3$$

همان‌طور که از روی خطوط جریان و دما مشاهده می‌شود با افزایش ارتفاع بافل جریان تمایل زیادی به ورود به داخل محفظه پیدا می‌کند. زمانی که بافل به داخل محفظه وارد می‌شود جریان به طور مستقیم از روی کف محفظه عبور کرده و با توجه به جابه‌جایی بیشتر سیال از مجاور قطعات گرم به نظر می‌رسد که تبادل حرارت بهتر صورت می‌گیرد. همچنین این مطلب را می‌توان در شکل ۹، که پروفیل سرعت عمودی را در خط میانی محفظه ($Y=0.5$) به ازای ارتفاعهای مختلف بافل نشان می‌دهد، مشاهده نمود. با افزایش ارتفاع بافل سرعت عمودی افزایش قابل ملاحظه‌ای

جابه‌جایی اجباری مکانیزم حاکم است، $Ri \leq 1$ ، شدت جریان خارجی کم شده و انتقال حرارت، یا عدد نوسلت، کم می‌شود.



شکل (۷): تغییرات عدد نوسلت متوسط کل بر حسب اعداد ریچاردسون در دو حالت بدن بافل و با بافل

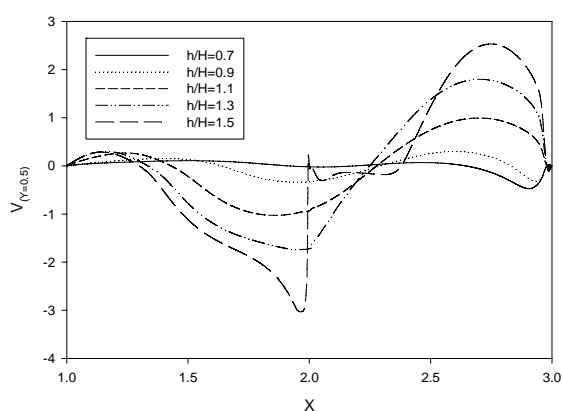
$$h/H = 0.5, d/H = 2, D/H = 1, Gr = 10^3$$

در اعداد ریچاردسون بالاتر از یک جابه‌جایی آزاد حاکم شده و روند بر عکس می‌شود. در این شرایط، بزرگ شدن عدد ریچاردسون باعث قوی‌تر شدن گردابه‌های چرخشی جابه‌جایی آزاد و افزایش مجدد نرخ انتقال حرارت می‌شود. با افزودن بافل- همان‌طور که در شکل دیده می‌شود- جریان خارجی بهتر به داخل محفظه هدایت می‌شود. این امر باعث افزایش نرخ انتقال حرارت، به جز هنگامی که جابه‌جایی آزاد قوی است، می‌شود. هنگامی که جابه‌جایی آزاد قوی باشد وجود بافل باعث جلوگیری از رشد گردابه‌های چرخشی جریان آزاد شده و انتقال حرارت کم می‌شود.

۲-۶- اثر ارتفاع بافل

در این مرحله به منظور بررسی اثر افزایش ارتفاع بافل بر عدد نوسلت و در نتیجه انتقال حرارت شکل ۱ با همان ابعادی که در مرحله قبل ذکر شد در نظر گرفته شده و ارتفاع بافل در محدوده، $0.3 \leq h/H \leq 1.5$ ، تغییر داده می‌شود. با ثابت نگه داشتن عدد گراشف $Gr = 10^3$ و تغییر عدد ریچاردسون در محدوده $0.01 \leq Ri \leq 100$ اثر افزایش ارتفاع بافل بر

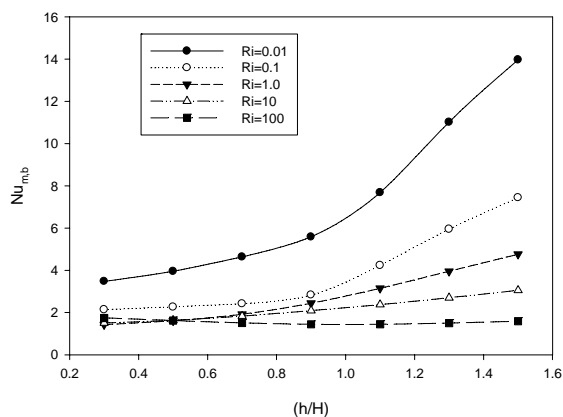
بافل بیش از چهار برابر حالت بدون بافل می باشد که نشان از افزایش چشم‌گیر انتقال حرارت نسبت به شرایط مشابه بدون بافل می باشد. همچنین مشاهده می‌شود که به ازای تمام ارتفاع‌های مختلف، بافل با افزایش عدد ریچاردسون، این نسبت روند نزولی پیدا می‌کند ولی همچنان تا $Ri < 10$ نسبت دو عدد نوسلت بزرگتر از یک می باشد. این در حالی است که، به ازای $Ri = 100$ این نسبت کوچکتر از یک شده که نشان از کاهش انتقال حرارت و نقش منفی بافل در جابه‌جایی آزاد دارد.



شکل (۹): پروفیل مؤلفه عمودی سرعت بی بعد در خط افقی

میانی محفظه به ازای ارتفاع های مختلف بافل

$$. Ri = 0.01 \text{ و } d/H = 2, D/H = 1, Gr = 10^3$$



شکل (۱۰): نوسلت متوسط کل منابع گرم در کانال به همراه

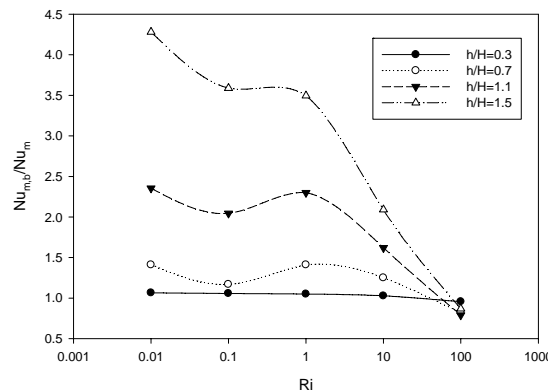
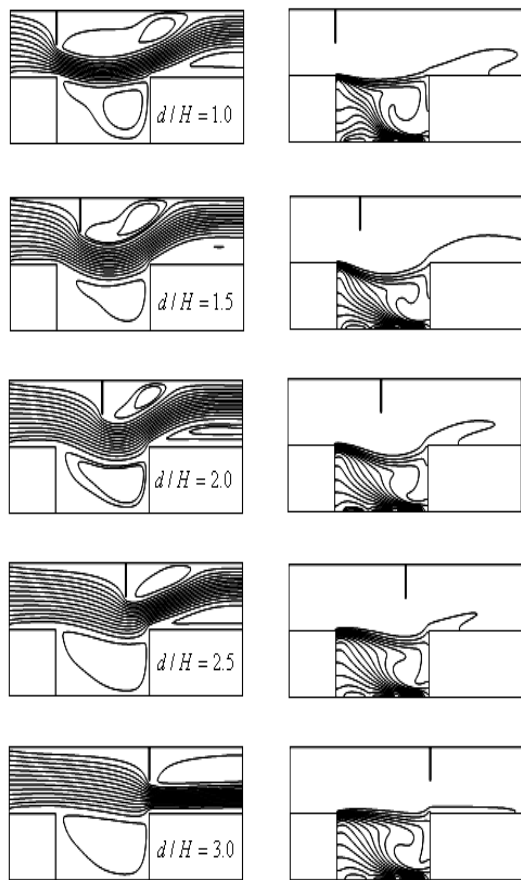
بافل بر حسب ارتفاع بافل

$$.(d/H = 2 \text{ و } D/H = 1.0, Gr = 10^3)$$

داشته که نشان از جابه‌جایی بیشتر سیال در محفظه می‌باشد. با مقایسه خطوط جریان و دما در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع بافل تا زمانی که هنوز بافل به داخل محفظه وارد نشده است گردابه‌های ایجاد شده نقش اصلی را در جابه‌جایی سیال در نتیجه تبادل حرارت ایفا می‌کنند. همچنین تمرکز خطوط هم‌دما بر روی منبع سمت راستی نسبت به دو منبع دیگر بیشتر است که نشان می‌دهد انتقال حرارت بیشتری نسبت به دو منبع دیگر دارد. ولی با ورود بافل به داخل محفظه سازوکار جابه‌جایی سیال به وسیله گردابه‌ها به عبور جریان مستقیم از روی منابع وسط و سمت راست تبدیل شده و جابه‌جایی سیال روی منبع سمت چپ به وسیله گردابه ایجاد شده رخ می‌دهد. همچنین از روی تراکم خطوط هم‌دما مشاهده می‌شود که منبع وسط نسبت به دو منبع دیگر انتقال حرارت بهتری دارد که این مطلب با توجه به موقعیت بافل و نحوه عبور خطوط جریان از روی منبع وسطی قابل توجیه می‌باشد.

همچنین می‌توان اثر افزایش ارتفاع بافل بر انتقال حرارت کل محفظه را در شکل ۱۰ مشاهده نمود. زمانی که عدد ریچاردسون پایین باشد، $Ri < 10$ ، با افزایش ارتفاع بافل عدد نوسلت متوسط که معیاری از انتقال حرارت می‌باشد افزایش می‌یابد. البته تا زمانی که ارتفاع بافل $0/8$ عرض کانال می‌باشد، تغییر زیادی در عدد نوسلت ایجاد نمی‌شود. ولی با افزایش بیشتر آن و ورود بافل به داخل محفظه، عدد نوسلت افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. از سوی دیگر به ازای $Ri = 100$ افزایش ارتفاع بافل نه تنها عدد نوسلت افزایش نمی‌یابد، بلکه کمی روند نزولی نیز در آن مشاهده می‌شود. این رفتار با توجه به خطوط جریان شکل ۸ قابل توجیه است.

در شکل ۱۱ مقایسه‌ای بین نوسلت میانگین حالت بدون بافل و با بافل انجام شده است. در این مقایسه نسبت عدد نوسلت در حالت با بافل به بدون بافل به ازای ارتفاع‌های مختلف بافل بر حسب عدد ریچاردسون ارائه شده است. همان‌طور که از در این شکل مشخص است به ازای ارتفاع بافل $h/H = 0.3$ و $Ri < 10$ ، نسبت حالت با بافل به بدون بافل کمی بزرگتر از یک می‌باشد ولی به ازای $h/H \geq 0.7$ و $Ri < 10$ این نسبت عدد بزرگی بوده به طوری که به ازای ارتفاع بافل $h/H = 1/5$ و $Ri = 0.01$ عدد نوسلت با



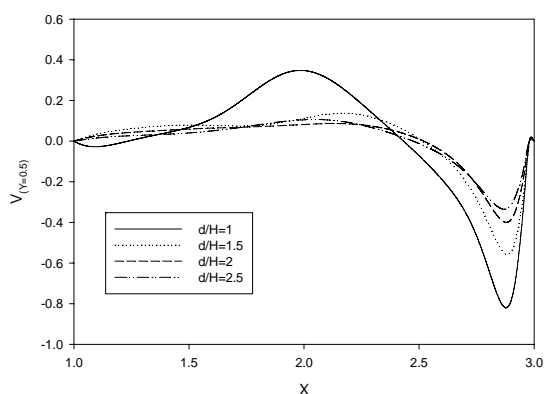
شکل (۱۱): نسبت نوسلت متوسط کل منابع گرم در کانال با بافل به بدون بافل از برای ارتفاع های مختلف بافل ($d/H = 2$ و $D/H = 1.0$ ، $Gr = 10^3$).

۳-۶- اثر موقعیت بافل

در این مرحله به منظور بررسی اثر موقعیت بافل بر میدان دما و جریان و نرخ انتقال حرارت شکل ۱ را با همان ابعادی که در مرحله قبل ذکر شد در نظر گرفته و فاصله بافل از ورودی کانال را در محدوده $1 \leq d/H \leq 3$ ، تغییر می‌دهیم. در اینجا با ثابت نگه‌داشتن عدد گراشف $Gr = 10^3$ و تغییر عدد ریچاردسون در محدوده $0.01 \leq Ri \leq 100$ به بررسی اثر موقعیت بافل بر روی انتقال حرارت می‌پردازیم.

شکل ۱۲ اثر موقعیت بافل را بر روی میدان جریان و خطوط هم‌دما به ازای عدد گراشف $Gr = 10^3$ و عدد ریچاردسون $Ri = 0.01$ نشان می‌دهد. همان‌طور که از روی خطوط جریان حالت $Ri = 0.01$ ، دیده می‌شود با افزایش فاصله بافل از ورودی کانال نفوذ جریان سرد داخل کانال به محفظه کمتر شده در نتیجه جابه‌جایی سیال از مجاور قطعات گرم کاسته شده که می‌تواند منجر به کاهش تبادل حرارت شود. این مطلب را می‌توان در شکل ۱۳، که پروفیل سرعت عمودی را در خط میانی محفظه ($Y=0.5$) به ازای موقعیت‌های مختلف بافل نشان می‌دهد مشاهده نمود. با افزایش فاصله بافل از ورودی محفظه سرعت عمودی کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته که نشان از جابه‌جایی کمتر سیال در محفظه و در نتیجه کاهش انتقال حرارت می‌باشد.

شکل (۱۲): میدان جریان (سمت چپ) و خطوط هم‌دما (سمت راست) در موقعیت‌های مختلف بافل و عدد ریچاردسون ($h/H = 0.5$ و $Ri = 0.01$ ، $D/H = 1$ ، $Gr = 10^3$).



شکل (۱۳): پروفیل مؤلفه عمودی سرعت بی‌بعد در خط افقی میانی محفظه به ازای موقعیت‌های مختلف بافل ($h/H = 0.5$ و $Ri = 0.01$ ، $D/H = 1$ ، $Gr = 10^3$).

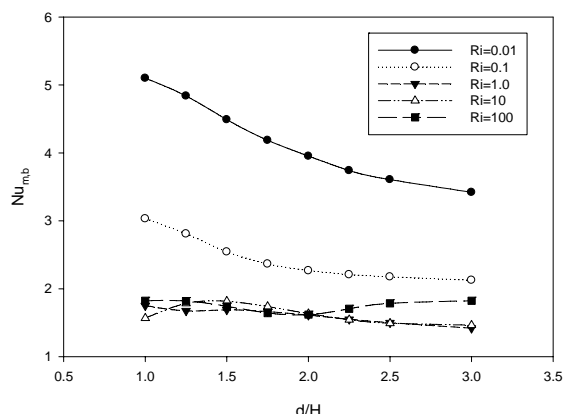
($Ri < 10$)، که جابه‌جایی اجباری حاکم است، انتقال حرارت نسبت به حالت بدون بافل افزایش می‌یابد. دلیل آن نفوذ بهتر جریان به داخل کانال و جابه‌جایی بیشتر سیال از مجاور قطعات گرم می‌باشد. از سوی دیگر در حالت‌هایی که جابه‌جایی آزاد مکانیزم حاکم است ($Ri = 100$)، افزایش بافل نه تنها مفید نیست بلکه اثر معکوس نیز نشان می‌دهد،

۲- در اعداد ریچاردسون نه چندان زیاد، با افزایش ارتفاع بافل، عدد نوسلت متوسط که معیاری از حرارت منتقل شده از محفظه است افزایش می‌یابد. این افزایش در ارتفاع‌های زیاد بافل خصوصاً با ورود بافل به داخل محفظه، قابل ملاحظه است. به عنوان مثال در $Ri = 0.01$ ، زمانی که ارتفاع بافل $1/5$ برابر عرض کانال می‌باشد، نوسلت متوسط بیش از چهار برابر حالت مشابه بدون بافل می‌باشد. این در حالی است که در $Ri = 100$ افزایش ارتفاع بافل نه تنها عدد نوسلت را افزایش نمی‌دهد، بلکه باعث کاهش آن نیز می‌شود و

۳- با تغییر فاصله بافل از ورودی کانال ملاحظه شد که هر چه بافل به سمت خارج کانال نزدیک‌تر شود، انتقال حرارت کاهش می‌یابد. بیشترین انتقال حرارت زمانی صورت می‌گیرد که بافل در ورودی محفظه قرار داشته باشد.

مراجع

1. Wu, H. and Perng, S.W. "Enhancement of Heat Transfer of Mixed Convection for Heated Blocks, Using Vortex Shedding Generated by an Oblique Plate in a Horizontal Channel", Acta Mech., Vol. 136, No. 1-2, pp. 77-89, 1999.
2. Manca, O., Nardini, S., Khanafar, K., and Vafaei, K. "Effect of Heated Wall Position on Mixed Convection in a Channel with an Open Cavity", J. Num. Heat Trans., Vol. 43, No. 3, pp. 259-282, 2003.
3. Leong, J.C., Brown, N.M., and Lai, F.C. "Mixed Convection from an Open Cavity in Horizontal Channel", J. Heat and Mass Trans., Vol. 32, No. 5, pp. 583-592, 2005.
4. Fang, L.C. "Effect of Mixed Convection on Transient Hydrodynamic Removal of a Contaminant from a Cavity", Int. J. Heat and Mass Trans., Vol. 46, No. 11, pp. 2039-2049, 2003.



شکل (۱۴): نوسلت متوسط کل منابع گرم در کانال به همراه بافل بر حسب موقعیت بافل از ورودی ($h/H = 0.5$ و $D/H = 1.0$ ، $Gr = 10^3$) .

همچنین می‌توان اثر موقعیت بافل بر انتقال حرارت محفظه را در شکل ۱۴ مشاهده نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود و قبلاً نیز اشاره شد، زمانی که عدد ریچاردسون پایین باشد، ($Ri < 1$)، با افزایش فاصله بافل از ورودی عدد نوسلت متوسط، که معیاری از انتقال حرارت می‌باشد، کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت که هر چه بافل به ورودی محفظه نزدیک‌تر باشد، تأثیر بیشتری در انتقال حرارت دارد. زمانی که عدد ریچاردسون خیلی بزرگ باشد، $Ri = 100$ ، جابه‌جایی آزاد حاکم بر مسئله بوده هر چه بافل به وسط محفظه نزدیک‌تر باشد به دلیل تداخلی که در رشد گردابه‌های چرخشی ایجاد می‌کند انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

۷- نتیجه‌گیری

در بررسی حاضر جریان جابه‌جایی هم‌زمان آزاد و اجباری آرام در کانال افقی همراه با محفظه باز گرمازا به روش عددی تحلیل شد. معادلات مومنوم و انرژی حاکم به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده و توسط الگوریتم سیمپل به طور هم‌زمان حل شدند. اثر پارامترهای حاکم در جریان جابه‌جایی توأم بر میزان انتقال حرارت بررسی شد. به طور کلی نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

۱- با اضافه کردن بافل به کانال در اعداد ریچاردسون پایین

7. Aminossadati, S.M. and Ghasemi, B. "A Numerical Study of Mixed Convection in a Horizontal Channel with a Discrete Heat Source in an Open Cavity", *European J. Mech. B/Fluids*, Vol. 28, No. 4, pp. 590-598, 2009.
8. Patankar, S.V. "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, 1980.
5. Fang, L.C. "Effect of Duct Velocity Profile and Buoyancy-induced Flow on Efficiency of Transient Hydrodynamic Removal of a Contaminant from a Cavity". *Int. J. Num. Methods in Fluids*, Vol. 44, No. 12, pp. 1389-1404, 2004.
6. Manca, O., Nardini, S., and Vafai, K. "Experimental Investigation of Mixed Convection in a Channel with an Open Cavity", *Exp. Heat Trans.*, Vol. 19, No. 1, pp. 53-68, 2006.

Archive of SID