

(یادداشت مهندسی)

بررسی رسوب‌زدایی هیدرودینامیکی ذرات از محفظه باز‌گرم‌مازا در یک کانال

روح‌ا... یداللهی‌فارسانی^۱

گروه مکانیک خودرو

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهرکرد (مرکز اردل)

(تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۴/۱۳)

بهزاد قاسمی^۲

گروه مهندسی مکانیک

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهرکرد

چکیده

در این مقاله فرایند رسوب‌زدایی هیدرودینامیکی از یک محفظه باز‌گرم‌مازا در یک کانال افقی تحت تأثیر جریان جابه‌جایی توأم آزاد و اجباری مورد مطالعه عددی قرار گرفته است. جریان با سرعت یکنواخت u_0 در دمای T_c وارد کانال می‌شود. کف محفظه در دمای ثابت T_h قرار دارد، در حالی که دیواره بالایی کانال در دمای T_c است. تحلیل برای محدوده‌ی وسیعی از عدد گراشوف ($10^1 \leq Gr \leq 10^5$) و عدد رینولدز ($10 \leq Re \leq 1000$) انجام شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که افزایش عدد گراشوف درصد رسوب‌زدایی از محفظه را افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش عدد رینولدز و نسبت ابعاد محفظه، درصد رسوب‌زدایی را کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: جابه‌جایی توأم، کانال، محفظه باز، رسوب‌زدایی ذرات

(Engineering Note)

Investigation of Hydrodynamic Removal of Particles from an Open Heated Cavity in a Channel

R. Yadollahi-Farsani

Islamic Azad Univ.

shahrekord Branch, Ardal Centre

B. Ghasemi

Eng. Faculty

Shahrekord Univ.

(Received: 8 Nov., 2010; Accepted: 3 July, 2012)

ABSTRACT

This paper presents the results of a numerical study on the removal process of fluid particles under the influence of mixed convection in a horizontal channel with an open cavity. The bottom wall of the cavity is heated at a constant temperature (T_h), while the top wall is maintained at a relatively low temperature (T_c). Fluid with a uniform velocity (u_0) and temperature (T_c) is introduced into the channel. The analysis is carried out for a wide range of values of Grashof numbers ($10^1 \leq Gr \leq 10^5$) and Reynolds numbers ($10 \leq Re \leq 1000$). The results show that the removal process of fluid particles increases by the increase in Grashof number, while decreases by the increase in Reynolds number as the well as Cavity's aspect ratio.

Keywords: Mixed Convection, Channel, Cavity, Particle Removal

۱ - مری (نویسنده پاسخگو): r.yadollahi@iaushk.ac.ir

۲ - دانشیار: ghasemi@eng.sku.ac.ir

فهرست علائم

A	نسبت ابعاد محفظه، $\frac{L}{H}$
D	عرض کانال، m
Gr	عدد گرافش، $g\beta(T_h-T_c)D^3/\nu^2$
H	عمق محفظه، m
L	عرض محفظه، m
Nu	عدد نوسلت متوسط
Pr	عدد پرائنتل، ν/α
Re	عدد رینولدز، u_0D/ν
%R	درصد ذرات بیرون رفته از محفظه
T_h	دمای کف محفظه، K
T_c	دمای دیواره بالایی، K
u_0	سرعت یکنواخت ورودی کانال، m/s
U, V	سرعت‌های بی‌بعد
X, Y	دستگاه کارتزین بی‌بعد
α	ضریب پخش حرارتی، $k/\rho c_p$
β	ضریب انبساط حرارتی، K^{-1}
Θ	دمای بی‌بعد، $(T-T_c)/(T_h-T_c)$
τ	زمان بی‌بعد
ν	ویسکوزیته سینماتیکی، m^2/s

۱- مقدمه

امروزه جریان جابه‌جایی سیال در کانال‌های همراه با محفظه باز به‌علت کاربردهای مهندسی وسیعی که دارد مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. در صنایع غذایی و شیمیایی معمولاً سطح مخازن و کانال‌ها به دلیل انتقال و تبادل حرارت با سیالات، با رسوب‌ها و ذرات ریز پوشانده می‌شود، که باعث کاهش نرخ انتقال حرارت و یا افت فشار بیشتر می‌شود. در نتیجه راندمان حرارتی با گذشت زمان به سبب جمع شدن رسوب روی سطوح انتقال حرارت کاهش می‌یابد، از این رو تلاش می‌شود که با روش‌های نوین و عملی از این پدیده جلوگیری شود. متداول‌ترین نوع رسوب، ته‌نشین شدن ذرات جامد معلق درون سیال روی سطوح انتقال حرارت (دیواره‌های کانال) است. معمولاً کانال‌ها و مخازن به‌صورت دوره‌ای و هر بار با پیاده کردن تجهیزات از سیستم تمیز

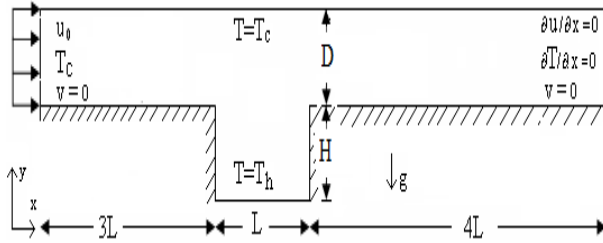
می‌شوند، برای تمیز کردن آنها آب یا حلال مناسب را با فشار روی سطوح می‌پاشند و یا رسوبات را به‌صورت مکانیکی جدا می‌کنند. اما به تازگی در تمیزکاری هیدرودینامیکی^۱ به کمک انرژی حرکتی و حرارتی سیال رسوبات از سطح دیواره‌های مخازن و کانال‌ها جدا می‌شوند و از ته نشست رسوبات روی سطوح انتقال حرارت جلوگیری می‌شود. در ادامه به برخی تحقیقات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود.

تحقیقی با موضوع جابه‌جایی از یک محفظه باز در داخل یک کانال افقی توسط لانگ^۲ و همکارانش [۱] انجام شده است. در این تحقیق اثرات اعداد رینولدز و گرافش و همچنین تغییر ابعاد محفظه بر روی انتقال حرارت از محفظه در یک کانال افقی بررسی شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهند که مقدار عدد رینولدز و گرافش روی شکل میدان جریان تأثیر می‌گذارد و منجر به ایجاد گردابه‌های چرخشی می‌شود. این در حالی است که نسبت ابعاد محفظه جهت‌گیری گردابه‌ها را تغییر می‌دهد. کریمی پور و قاسمی [۲] در مطالعه‌ای به بررسی اثر فرکانس نوسان درجه محفظه روی میزان انتقال حرارت در جریان جابه‌جایی توأم پرداختند. امین‌الساداتی و قاسمی [۳] در مطالعه‌ای به بررسی انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در یک کانال همراه با محفظه باز پرداختند. در این مطالعه ابعاد محفظه و محل گرمایش تغییر داده شد و در هر حالت نتیجه‌ها به شکل خطوط جریان، دما و مقدار عدد نوسلت در اعداد ریچاردسون مختلف بررسی شد. نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش نسبت ابعاد محفظه میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. جریان در کانال‌های همراه با محفظه باز گرمازا هم‌چنان مورد توجه دانشمندان بسیاری قرار دارد، رحمان و همکارانش [۴] در مطالعه‌ای به بررسی جریان انتقال حرارت جابه‌جایی توأم در کانال همراه با محفظه تحت تأثیر میدان مغناطیسی پرداخته است. در این تحقیق اثر تغییر پارامترهای حاکم مانند عدد رایلی و هارتمن روی میدان جریان و میزان انتقال حرارت از محفظه بررسی شد. نتیجه‌ها نشان داد که با افزایش عدد رایلی^۳ و رینولدز، مقدار عدد

1- Hydrodynamic Removal

2 - Leong

3 -Rayleigh Number



شکل (۱): نمایی از دامنه حل.

هدف این است که تأثیر تغییر نیروهای اجباری و غوطه‌وری بر درصد رسوب‌زدایی ذرات از محفظه پیش‌بینی شود. به طور کلی اگر یک محفظه باز گرمازا سر راه جریان واقع باشد، تأثیر فراوانی بر رفتار جریان داخل کانال می‌گذارد. نفوذ جریان اجباری کانال درون محفظه و تبادل حرارت با کف محفظه سبب ایجاد جابه‌جایی توأم در محفظه می‌شود.

۲- معادلات اساسی حاکم بر جریان

با استفاده از اصول بقاء، می‌توان معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی را برای جابه‌جایی توأم استخراج کرد. معادلات حاکم، معادلات ناویر استوکس^۴ در حالت دو بعدی است، که برای سیال نیوتنی، با فرض سیال تراکم‌ناپذیر و با استفاده از تقریب بوزینسک^۵ به دست آورده شده است. برای تحلیل کلی تر، معادلات به صورت بی بعد تحلیل شده است. معادلات حاکم در دامنه حل عبارت است از:

معادله پیوستگی:

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

معادله ممنتوم X:

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

معادله ممنتوم Y:

$$\frac{\partial V}{\partial \tau} + U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{Gr}{\text{Re}^2} \theta, \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right), \quad (4)$$

در این روابط از پارامترهای بی بعد زیر استفاده شده است:

نوسلت و در نتیجه میزان انتقال حرارت از کف محفظه افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش عدد هارتمن^۱ از میزان انتقال حرارت می‌کاهد.

رحمان و همکارانش [۵] در مطالعه‌ای دیگر به بررسی اثر جانمایی منبع گرمازا در دیواره‌های کانال روی میزان انتقال حرارت به جریان داخل کانال پرداخته است. نتیجه‌های این تحقیق نشان می‌دهد که اگر منبع گرمازا روی دیواره روبه‌رو به جریان ورودی کانال قرار گیرد، بیشترین نرخ انتقال حرارت اتفاق می‌افتد.

لی چان فانگ^۲ [۶] نقش جابه‌جایی توأم در کانال همراه با یک محفظه باز گرمازا را در نرخ تمیزکاری هیدرودینامیکی سیال داخل محفظه بررسی کرد. در این تحقیق فرآیند بیرون‌دهی ذرات سیال داخل محفظه با استفاده از حل عددی معادلات با استفاده از روش مک^۳ مدل شده است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که تغییر عدد گراشف، تغییر شدیدی در نرخ بیرون‌دهی هیدرودینامیکی ذرات از محفظه ایجاد می‌کند. لی چان فانگ [۷] در مطالعه‌ای دیگر فرآیند بیرون‌دهی ذرات سیال داخل محفظه را توسط جریان سیالی با همان چگالی در کانال بررسی کرد. او نشان داد که تغییر نیروهای غوطه‌وری بر اثر انتقال حرارت از محفظه و هم‌چنین تغییر نمایه سرعت جریان ورودی به کانال باعث تغییر در میزان انتقال حرارت و نرخ بیرون‌دهی ذرات سیال می‌شود.

جهت توسعه تحقیقاتی که در گذشته مورد بررسی قرار گرفته، در این مطالعه با در نظر گرفتن یک محفظه باز گرمازا درون یک کانال افقی، اثر تغییر عدد گراشف، عدد رینولدز و نسبت ابعاد محفظه روی درصد رسوب‌زدایی ذرات از محفظه بررسی می‌شود. دامنه حل کانالی دو بعدی همراه با یک محفظه باز گرمازا است که جریان آرام سیال مطابق شکل ۱ به طور یکنواخت با سرعت u_0 و دمای ثابت T_c وارد آن می‌شود. کف محفظه در درجه حرارت ثابت T_h قرار دارد، در حالی که بقیه دیواره پایینی به خوبی عایق شده است. هم‌چنین دیواره بالایی کانال در دمای ثابت T_c نگه داشته می‌شود.

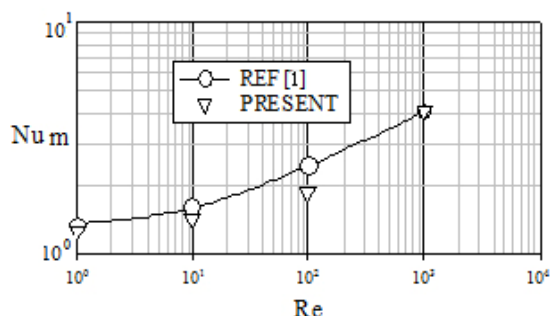
1- Hartmann
2- Lih Chuan Fang
3- MAC (Marker and Cell) Method

4- Navier-Stokes
5- Boussinesq Approximation

۴- بررسی صحت کد نوشته شده

برای اجرای الگوریتم مورد نظر برنامه‌های رایانه‌ای به زبان فرترن^۱ نوشته شد. جهت اثبات کارایی روش و برای اطمینان از درستی کد نوشته شده، نتیجه‌های عددی حاصل از آن با کار مشابه انجام گرفته توسط لانگ و همکارانش [۱] مقایسه شد. برای این منظور ابعاد کانال و محفظه و همچنین شرایط مرزی جریان مطابق با تحقیق آنها اصلاح شد و نتیجه‌ها به صورت عدد نوسلت متوسط بررسی و مقایسه شد. نتیجه‌های حاصل از این بررسی در شکل ۲ آورده شده است.

در شکل ۲ تغییرات نوسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در حالت $Gr=10^5$ و $A=2$ عدد دیده می‌شود. نمودار با توجه به نتیجه‌های در دسترس، در مقیاس لگاریتمی رسم شده است. ملاحظه می‌شود که اختلاف نتیجه‌های حاصل از دو بررسی قابل قبول است.



شکل (۲): مقایسه نتیجه‌های به دست آمده از مطالعه حاضر و مرجع [۱]، $Gr=10^5$ و $A=2$.

۵- روش حل

اولین قدم در حل عددی معادلات دیفرانسیل، شبکه‌بندی میدان حل است. نحوه شبکه‌بندی در روش حل بسیار مؤثر است، به گونه‌ای که هرگاه از شبکه‌بندی مناسب استفاده نشود، می‌تواند باعث کندی حل و یا حتی واگرایی جواب شود. در این مقاله با توجه به حل مسئله در دستگاه مختصات کارتزین، از شبکه‌بندی جابه‌جا شده^۲ در امتداد محورهای X و Y استفاده شده است [۷]. حسن استفاده از شبکه جابه‌جا شده این است که به علت معلوم بودن سرعت‌ها به راحتی

$$\tau = \frac{u_o t}{D}, P = \frac{\bar{P}}{\rho u_o^2}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad (5)$$

$$V = \frac{v}{u_o}, U = \frac{u}{u_o}, Y = \frac{y}{D}, X = \frac{x}{D}.$$

در این رابطه‌ها، D عرض کانال (طول مشخصه) و u_o سرعت مرجع ورودی به کانال است. علاوه بر پارامترهای بی‌بعد بالا از اعداد گراشف $g\beta(T_h - T_c)D^3/v^2$ ، رینولدز $u_o D/v$ ، پرانتل ν/α و ضریب پخش حرارتی $k/\rho c_p$ نیز استفاده شده است.

۳- شرایط اولیه و شرایط مرزی

برای به دست آوردن جواب یگانه یک معادله دیفرانسیل پاره‌ای، به مجموعه‌ای از شرایط مرزی و اولیه نیاز است. شرایط مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی در نظر گرفته شده مطابق جدول ۱ هستند. شرایط اولیه به معنی معلوم بودن مقدار متغیر وابسته در یک حالت اولیه است. بنابراین به طور دلخواه به کلیه متغیرهای وابسته مقدار صفر را به عنوان شرط اولیه اختصاص می‌دهیم.

لازم به ذکر است که طول کانال بعد از محفظه در چند حالت مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت مشخص شد که این طول باید چهار برابر عرض محفظه ($4L$) باشد تا شرایط توسعه یافتگی در خروجی کانال برقرار شود (شکل ۱).

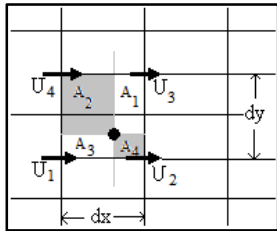
جدول (۱): شرایط مرزی سرعت و دما در دامنه حل.

شرط مرزی سرعت:	
$V = 0, U = 1$	۱- ورودی
$\partial U / \partial X = 0, V = 0$	۲- خروجی
$U = V = 0$	۳- سایر
شرط دما:	
$\theta = 0$	۱- ورودی
$\partial \theta / \partial X = 0$	۲- خروجی
$\theta = 1$	۳- کف محفظه
$\theta = 0$	۳- دیواره بالایی
$\partial \theta / \partial X = 0$ or $\partial \theta / \partial Y = 0$	۴- سایر

مساحت‌ها تعیین می‌شود. این روش در واقع ترکیبی است از روش اوپلری که میدان‌های جریان، فشار و دما را مورد توجه قرار می‌دهد و روش لاگرانژی که به هر ذره مقدار سرعت، فشار و دما را اختصاص می‌دهد. در این روش ابتدا به روش اوپلری میدان جریان حل می‌شود و سپس با استفاده از نتیجه‌های به‌دست آمده، حرکت ذره به روش لاگرانژی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

با توجه به شکل ۳، ذره نشانه‌گذاری شده k در میدان حل و در حجم کنترل مربوطه در نظر گرفته می‌شود. برای به‌دست آوردن مؤلفه افقی سرعت u_k از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$u_k = \frac{A_1 U_1 + A_2 U_2 + A_3 U_3 + A_4 U_4}{dxdy}, \quad (7)$$



شکل (۳): طرح وزنی سطح، ذره در حجم کنترل نشان داده شده است.

و به همین ترتیب مقدار مؤلفه عمودی سرعت ذره نشانه‌گذاری شده، v_k ، به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$v_k = \frac{A_1 V_1 + A_2 V_2 + A_3 V_3 + A_4 V_4}{dxdy}, \quad (8)$$

که در آن، A_i مطابق شکل ۳، مساحت تشکیل شده بین ذره نشانه‌گذاری شده در حجم کنترل و سطوح حجم کنترل و U_i و V_i مؤلفه‌های سرعت روی سطوح حجم کنترل هستند. روابط بالا در اصل میانگین وزنی سرعت سطوح حجم کنترل اطراف ذره را به ذره نسبت می‌دهند. بعد از معلوم شدن مؤلفه‌های سرعت ذره، مکان ذره در گام زمانی جدید با انتگرال‌گیری از معادلات (۶) به صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$x_k^{n+1} = u_k^{n+1} \Delta t + x_k^n, \quad y_k^{n+1} = v_k^{n+1} \Delta t + y_k^n. \quad (9)$$

در این روابط، x_k^{n+1} و y_k^{n+1} موقعیت ذره در گام جدید را نشان می‌دهد. برای بررسی حرکت ذرات نشانه‌گذاری شده در گام‌های زمانی مختلف، لازم شد که مسئله به صورت غیردائم حل شود. لازم به ذکر است که در روش مک، معادله انرژی به

می‌توان دبی‌ها را روی سطح حجم کنترل محاسبه کرد، به علاوه مقادیر فشار روی نقاط اصلی شبکه مشخص می‌شود.

برای انتخاب شبکه حل مناسب، ابتدا بررسی روی تعداد نقاط شبکه انجام گرفت. بدین منظور اثر تعداد نقاط شبکه بر پارامترهای مهم مسئله از جمله درصد خروج ذرات و عدد نوسلت متوسط بررسی شد. باید توجه داشت عدد نوسلت به عنوان پارامتری تأثیرپذیر از تعداد نقاط شبکه و نیز میدان جریان و دما برای این بررسی مناسب است. بر این اساس شبکه غیریکنواخت 60×250 به ترتیب در راستای محور X و Y انتخاب شد.

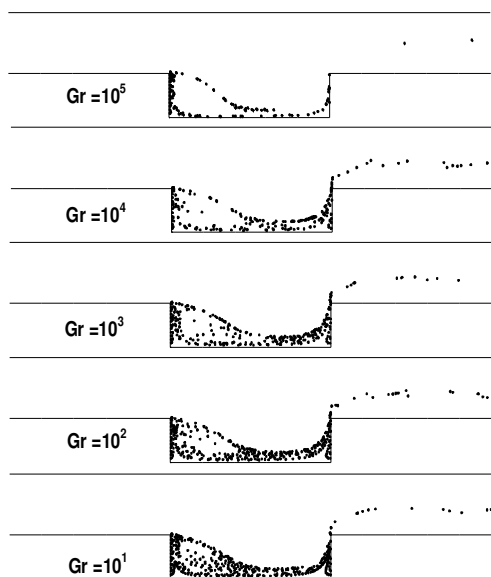
معادلات (۴-۱) همراه با شرایط مرزی گفته شده، به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم، کنترل جبری شدند. لازم به ذکر است که در این مطالعه با استفاده از ایده نشانه‌گذاری و دنبال کردن ذرات^۱ در یک روش ابداعی الگوریتم سیمپل و مک^۲ با هم ترکیب شده است. بدین صورت که ابتدا معادلات سرعت و دما با استفاده از الگوریتم سیمپل^۳ حل و سپس در هر گام زمانی حرکت ذرات نشانه‌گذاری شده با استفاده از روش مک مدل می‌شود. روش مک در سال ۱۹۶۵ توسط ولچ^۴ و همکارانش [۱۰-۹] برای نمایش سطح آزاد سیال معرفی شد. سپس مک کی^۵ و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۰۷، این روش را مورد بررسی قرار داده و تکمیل کردند. این روش هم‌چنان به عنوان روش حل معادلات کوپل در کنار روش سیمپل به کار برده می‌شود [۱۲]. در روش مک حرکت ذرات با مدل لاگرانژی، به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\frac{dx_k}{dt} = u, \quad (6)$$

$$\frac{dy_k}{dt} = v,$$

که در آن، (x_k, y_k) موقعیت اولیه ذره k هستند. با انتگرال‌گیری از معادلات دیفرانسیلی (۶) نسبت به زمان، موقعیت ذره مشخص می‌شود. سرعت ذره با توجه به تأثیر دو سویه نقاط همسایه و با استفاده از مدل میانگین وزنی

- 1- Mark and Follow
- 2- Marker and Cell (MAC)
- 3-SIMPLE
- 4- Welch
- 5- McKee



شکل (۵): موقعیت ذرات در گراشف‌های مختلف در $\tau = 100$ ($Re = 100$ و $A = 4$).

همان‌طور که دیده می‌شود، با افزایش عدد گراشف ذرات کمتری در محفظه باقی مانده‌اند. در نتیجه با افزایش عدد گراشف درصد خروج ذرات از محفظه افزایش می‌یابد. هم‌چنین دیده می‌شود ذرات باقیمانده در محفظه بیشتر در قسمت چپ محفظه، جایی که اثر عبور جریان اجباری کمتر است و معمولاً گردابه‌ها از این ناحیه شروع به رشد می‌کنند، قرار گرفته‌اند.

از طرفی، اثر تغییر عدد گراشف روی میزان رسوب‌زدایی ذرات را می‌توان با محاسبه درصد خروج ذرات (R) از محفظه با استفاده از رابطه (۱۰) بررسی کرد.

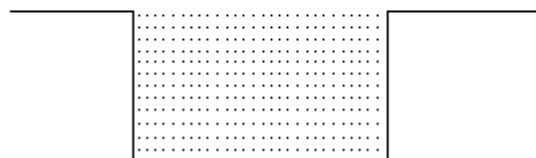
$$\%R = \frac{n}{2000} \times 100, \quad (10)$$

که در آن، n ، تعداد ذرات خارج شده از محفظه است. نتیجه‌های این بررسی در شکل ۶ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که روند خروج ذرات از محفظه را با گذشت زمان برای گراشف‌های مختلف و هم‌چنین در $Gr = 10^5$ ، که اثر جریانات جابه‌جایی آزاد نسبت به جریان اجباری در محفظه به مراتب بیشتر است، خروج ذرات از محفظه به مراتب مشهودتر است.

روش ضمنی حل می‌شود. اما کوا و همکارانش [۱۳] نشان دادند که روش ضمنی گاهی به نتیجه‌های غیر فیزیکی منجر می‌شود. بنابراین در این بررسی از روش صریح استفاده شده است. برای انتخاب گام زمانی مناسب، درصد بیرون‌دهی ذرات در گام‌های مختلف بررسی شده و نتیجه‌ها نشان می‌دهد که گام بی‌بعد ($\tau = 0.1$) برای بررسی حرکت ذرات مناسب است.

۶- نتایج و بحث

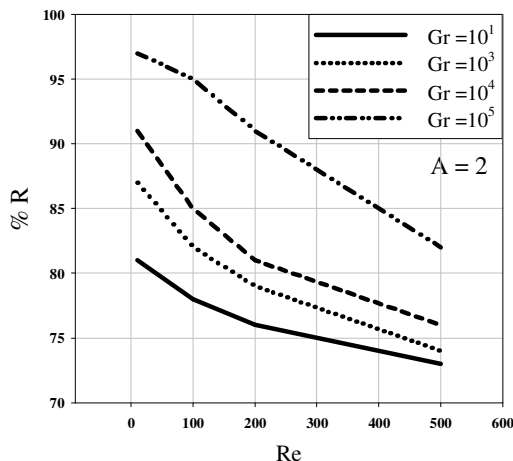
برای بررسی اثر پارامترهای مهم جریان روی خروج ذرات نشانه‌گذاری شده از محفظه در ابتدا ۲,۰۰۰ ذره درون محفظه در نظر گرفته شد. شکل ۴ موقعیت اولیه ذرات را به‌طور شماتیک نشان می‌دهد. با برقراری جریان در کانال و انتقال حرارت از کف محفظه، جریان‌های جابه‌جایی توأم به‌وجود می‌آید. این جریان باعث بیرون راندن ذرات از محفظه در راستای خطوط میدان جریان می‌شود. در ادامه اثر پارامترهای حاکم روی درصد خروج ذرات از محفظه بررسی خواهد شد.



شکل (۴): مکان اولیه ذرات در محفظه در لحظه $\tau = 0$.

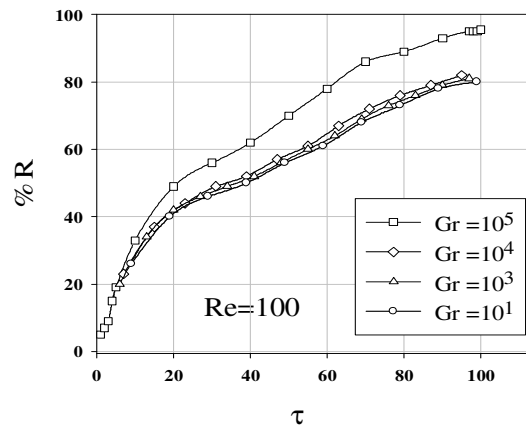
در ابتدا با تغییر عدد گراشف اثر جریان جابه‌جایی آزاد روی حرکت ذرات و رسوب‌زدایی از محفظه بررسی شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد گراشف، نقش جابه‌جایی آزاد در انتقال حرارت توأم افزایش می‌یابد. این روند باعث به‌وجود آمدن گردابه‌هایی در جریان داخل محفظه می‌شود که با افزایش بیشتر عدد گراشف بر قدرت آنها افزوده خواهد شد. موقعیت ذرات در نظر گرفته شده در زمان $\tau = 100$ به ازای $Re = 100$ و $A = 4$ ، در شکل ۵ نشان داده شده است.

گفت که با افزایش نقش جابه‌جایی اجباری اثر جابه‌جایی آزاد روی میدان جریان که نقش اساسی را در بیرون‌دهی ذرات از محفظه بر عهده دارند، کم می‌شود. برای نتیجه‌گیری بهتر در مورد نقش عدد رینولدز در خروج ذرات از محفظه، مطالعه‌ای روی درصد رسوب‌زدایی از محفظه در اعداد رینولدز و گراش‌های مختلف در حالت $A=2$ انجام شد. نتیجه‌های این بررسی در شکل ۸ نشان داده شده است.



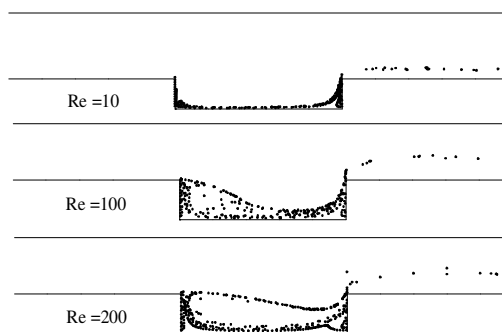
شکل ۸: درصد خروج ذرات از محفظه بر حسب عدد رینولدز در اعداد گراش‌های مختلف در زمان $\tau=100$ ($A=2$).

همان‌طور که دیده می‌شود، در کلیه اعداد گراش‌ها، با افزایش عدد رینولدز، از میزان رسوب‌زدایی محفظه کاسته می‌شود. مقایسه این روند، بین اعداد گراش‌های مختلف نشان می‌دهد که در اعداد گراش بالاتر، تأثیر عدد رینولدز مشهودتر است. با افزایش عمق محفظه، جریان سرد کمتری در معرض مستقیم با کف محفظه قرار می‌گیرد و این امر انتقال حرارت بین منبع گرم و سرد را کاهش می‌دهد، در نتیجه نرخ انتقال حرارت کاهش می‌یابد [۱۴]. به همین دلیل انتظار می‌رود تغییر نسبت ابعاد محفظه روی درصد رسوب‌زدایی از آن تأثیرگذار باشد. برای بررسی اثر نسبت ابعاد، محفظه در چهار نسبت ابعاد مختلف ۱، ۲، ۳ و ۴ ($A=4$) در نظر گرفته شده و با ثابت نگه‌داشتن عدد گراش‌ها و رینولدز اثر تغییر عمق محفظه روی درصد رسوب‌زدایی بررسی شده است. نتیجه‌های این بررسی‌ها در شکل ۹ در زمان $\tau=100$ به ازای $Re=100$ و $Gr=10^5$ نشان داده شده است. با توجه به



شکل ۶: درصد خروج ذرات از محفظه با گذشت زمان در اعداد گراش‌های مختلف ($Re=100$ و $A=2$).

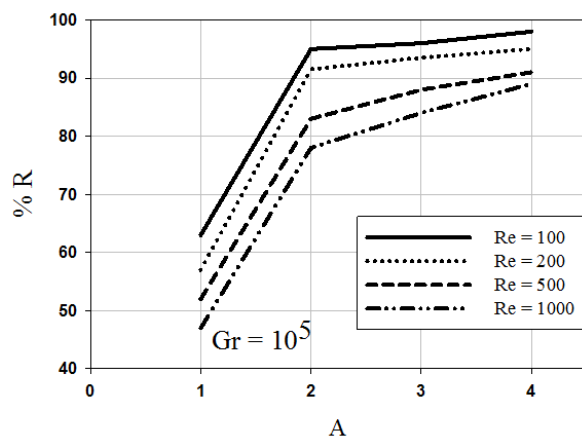
جریان اجباری داخل کانال به علت نقشی که در جابه‌جایی توأم بازی می‌کند، تأثیر زیادی روی رسوب‌زدایی از داخل محفظه دارد. تقویت جریان اجباری در قالب عدد رینولدز باعث کاهش دادن اثرات جابه‌جایی آزاد روی جریان سیال می‌شود. در مرحله بعد برای بررسی اثر تغییر جریان اجباری روی حرکت ذرات در محفظه عدد رینولدز تغییر داده شده است. نتیجه‌های این بررسی در زمان $\tau=100$ به ازای $Gr=10^3$ و $A=4$ در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: موقعیت ذرات در محفظه در اعداد رینولدز مختلف در $\tau=100$ ($Gr=10^3$ و $A=4$).

با توجه به این شکل، دیده می‌شود که در عدد رینولدز پایین که نقش جریان اجباری کم است، درصد خروج ذرات افزایش می‌یابد. به عبارتی، در عدد $Re=10$ رسوب‌زدایی ذرات از محفظه نسبت به اعداد رینولدز بالاتر، بیشتر است. می‌توان

ذرات از محفظه نسبت به عمق‌های بیشتر دارد. هم‌چنین دیده می‌شود که در $A \geq 2$ ، شیب نمودار به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. علت این است که در نسبت ابعاد بزرگ‌تر عمق محفظه کاهش می‌یابد و در نتیجه اثر افزایش A روی درصد بیرون‌دهی ذرات کاهش می‌یابد.



شکل (۱۰): درصد خروج ذرات از محفظه برحسب نسبت ابعاد محفظه در اعداد رینولدز مختلف در $\tau = 100$ و $(Gr = 10^5)$.

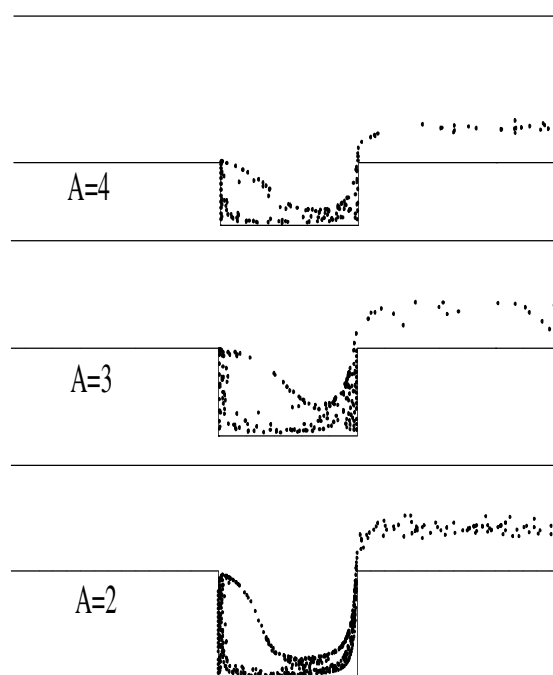
۷- نتیجه‌گیری

در بررسی حاضر جریان جابه‌جایی توأم در کانال افقی همراه با محفظه باز گرمازا به روش عددی تحلیل شد. معادلات مومنتم و انرژی حاکم به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شدند و توسط الگوریتم سیمپل و مک به طور هم‌زمان حل شدند. اثر پارامترهای حاکم بر درصد خروج ذرات از محفظه به طور کامل بررسی شد.

به طور کلی، نتیجه‌های به‌دست آمده را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- ۱- با افزایش عدد گراشف و در نتیجه حرکت‌های جابه‌جایی آزاد، جابه‌جایی جریان درون محفظه افزایش یافته و درصد خروج ذرات از محفظه افزایش می‌یابد،
- ۲- افزایش قدرت جریان اجباری در قالب عدد رینولدز جریان، باعث کاهش نقش جریان جابه‌جایی آزاد، که بیشترین سهم را در بیرون‌دهی ذرات داخل محفظه دارد، شده و در نتیجه درصد خروج ذرات از محفظه را کاهش می‌دهد و

این شکل دیده می‌شود که کاهش نسبت ابعاد محفظه درصد خروج ذرات مارک شده از محفظه را کاهش می‌دهد. با کاهش نسبت ابعاد و یا به عبارتی افزایش عمق محفظه، نفوذ جریان سیال سرد داخل محفظه کم شده و در نتیجه از قدرت جریان جابه‌جایی آزاد کاسته می‌شود. این روند درصد خروج ذرات از محفظه را کاهش می‌دهد.



شکل (۹): تغییر موقعیت ذرات نسبت ابعاد مختلف محفظه در $\tau = 100$ و $(Re = 1000$ و $Gr = 10^5)$.

در شکل ۱۰ این بررسی به‌طور جامع‌تر در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. در این شکل درصد خروج ذرات از محفظه برحسب نسبت ابعاد محفظه (A) در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. خروج ذرات در نسبت ابعاد بزرگ‌تر، بیشتر بر اثر جریان جابه‌جایی اجباری صورت می‌گیرد؛ در حالی که در نسبت ابعاد کوچک‌تر خروج ذرات بیشتر بر اثر جابه‌جایی آزاد داخل محفظه صورت می‌گیرد، چرا که در عمق‌های بیشتر نفوذ جریان اجباری داخل محفظه کمتر می‌شود.

با دقت در شکل ۱۰ دیده می‌شود که در نسبت ابعاد بزرگ‌تر افزایش عدد رینولدز تأثیر کمتری روی درصد خروج

7. Lih-Chuan, F., "Effect of Duct Velocity Profile and Buoyancy-Induced Flow on Efficiency of Transient Hydrodynamic Removal of a Contaminant from a Cavity". *Int. J. Num. Meth. in fluids*, Vol. 44, No. 12, pp.1389-1404, 2004.
8. Patankar, S.V. and Prakash, C. "An Analysis of the Effect of Plate Thickness on Laminar Flow and Heat Transfer in Interrupted-Plate Passages", *Int. J. Heat and Mass Trans.*, Vol. 24, No. 11, pp. 1801-1810, 1981.
9. Harlow, F.H. and Welch, J.E., "Numerical Calculation of Time Dependent Viscous Incompressible Fluid with Free Surface", *Phys. Fluids*, Vol. 8, No. 12, pp. 2182-2189, 1965.
10. Welch, J.E., Harlow, F.H., Shannon, J.P., and Daly, B.J., "The MAC Method-A Computing Technique for Solving Viscous, Incompressible, Transient Fluid Flow Problems Involving a Free Surface", *Los Alamos Sci. Lab. Rep. LA-3425*, Los Alamos, 1966.
11. McKee, S., Ftome, M., Ferreira, V.G., Cu-minato, J.A., Castelo, A., Sousa, F.S., and Mangiavacchi, N., "The MAC Method", *Computers & Fluids*, Vol. 37, No. 8, pp. 907-930, 2008.
12. Jena, S.K. and Mahapatra, S.K. "Numerical Modeling of Interaction Between Surface Radiation and Natural Convection of Atmospheric Aerosol in Presence of Transverse Magnetic Field", *Appl. Math. Modeling*, 2012 (In Press).
13. Kuo, C.H., Sharif, M.A.R., and Scheriber, W.C., "Numerical Experiments on the Simulation of Bernard Convection, Using MAC Method", *Chem. Eng. Comm.*, Vol. 127, No. 1, pp. 1-21, 1994.
14. Yadollahi, R. and Ghasemi, B. "The Investigation of the Effect of a Cavity's Dimension on Mixed Convection Heat Transfer in a Channel", *Int. Mech. Eng. Conf. ISME*, Shiraz, Iran, 2007 (In Persian).

۳- با افزایش نسبت ابعاد محفظه درصد خروج ذرات از محفظه افزایش می‌یابد. همچنین مشخص شد که در حالت‌هایی که عمق محفظه بیشتر است، تأثیر افزایش عدد رینولدز مشهودتر است. بنابراین در مواردی که نیاز به استفاده از محفظه عمیق‌تر است، در انتخاب عدد رینولدز و در نتیجه جریان اجباری داخل کانال باید دقت بیشتری شود.

منابع

1. 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.
2. Karimipour, A. and Ghasemi, B. "Mixed Convection in a Cavity with an Oscillating Moving Wall", *Mech. & Aerospace Eng. J.*, Vol. 3, No. 3, pp. 49-60, 2007 (In Persian).
3. 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.
4. Rahman, M.M., Parvin, S., Saidur, R., and Rahim, N.A., "Magneto-Hydrodynamic Mixed Convection in a Horizontal Channel with an Open Cavity", *Int. Comm. in Heat and Mass Trans.*, Vol. 38, No. 2, pp. 184-193, 2011.
5. Rahman, M.M., Hakan-Öztop, F., Rahim, N.A., Saidur, R., Al-Salem, K., Amin, N., Mamun, M.A.H., and Ahsan, A., "Computational Analysis of Mixed Convection in a Channel with a Cavity Heated from Different Sides", *Int. Comm. in Heat and Mass Trans.*, Vol. 39, No. 1, pp. 78-84, 2012.
6. Lih-Chuan, F. "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.