

کنترل جریان سیال با محیط متخلخل: روش شبکه بولتزمن

علی کردانی

پوریا امیدوار*

احد زرغامی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

محقق، گروه تحقیقاتی پدیده‌های انتقال، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی دلفت، هلند

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش شبکه بولتزمن و ترکیب آن با مدل برینکمن-فورچایمر به مطالعه جریان اطراف مانع مربعی پوشیده شده توسط محیط متخلخل پرداخته می‌شود. در این مدل، اثرات نیروی پسا ناشی از حضور محیط متخلخل به صورت یک عبارت نیرو در معادله‌ی شبکه بولتزمن وارد می‌شود. در ابتدا جریان پواری صفحه‌ای کاملاً متخلخل، جریان حفره کاملاً متخلخل و جریان کوئت کاملاً متخلخل شبیه‌سازی شده و نتایج عددی حاصل با نتایج موجود در پژوهش‌های پیشین اعتبار سنجی می‌گردد. سپس با افزودن یک لایه محیط متخلخل با ضخامت مشخص به اطراف مانع مربعی درون کانال، به تأثیر حضور این لایه بر هیدرودینامیک جریان برای اعداد رینولدز ۲۰ تا ۲۵۰ و اعداد دارسی 10^{-2} تا 10^{-6} پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب پارامترهای محیط متخلخل می‌توان جدایش جریان را به تأخیر انداخت و در نتیجه عدد استروهال و نیروی پسا وارد بر مانع را به طور قابل توجهی کم کرد. بر اساس نتایج حاصل، در اعداد دارسی بزرگتر و ضخامت‌های کمتر محیط متخلخل، کاهش ضریب پسا و عدد استروهال، بیشتر خواهد بود. در اعداد رینولدز کوچکتر از ۶۰ به دلیل آنکه جدایش جریانی وجود ندارد، افزودن محیط متخلخل تأثیری بر ضریب پسا مانع مربعی ندارد، ولی با افزایش عدد رینولدز از آن جایی که محیط متخلخل جدایش جریان را به تأخیر می‌اندازد، کاهش ضریب پسا محسوس می‌گردد. همچنین نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در یک ضخامت و عدد دارسی ثابت، تغییر در ضریب تخلخل محیط، تأثیر اندکی بر پارامترهای جریان مانند ضریب پسا دارد.

کلمات کلیدی: روش شبکه بولتزمن، محیط متخلخل، مدل برینکمن-فورچایمر، ضریب پسا، جریان اطراف مانع مربعی.

Fluid Flow Control Using Porous Media: Lattice Boltzmann Method

A. Kardani

P. Omidvar

A. Zarghami

Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

Researcher, Transport Phenomena Group, Department of Chemical Eng., TU Delft, Netherlands

Abstract

In this paper the Lattice Boltzmann Method based on Brinkman-Forchheimer equation is applied to simulate flow past a square cylinder covered by a porous layer. The porous media effect is incorporated as a force term in the lattice Boltzmann equation. The method is tested against fully porous Poiseuille, Couette and lid-driven cavity flows. Upon comparing the results with the analytical and numerical data available in the literature, a satisfactory agreement is observed. Then, a detailed investigation on the flow past a porous covering square cylinder is presented. The Reynolds number ranges from 20 to 250 and Darcy number from 10^{-2} to 10^{-6} . The numerical results shows that selecting appropriate porous parameters can postpone vortex shedding and reduce Strouhal number and drag coefficient. Results show that the drag coefficient and Strouhal number are smaller for large Darcy number and small porous layer thickness. For low Reynolds number ($Re < 60$) there is not any vortex shedding, so inserting the porous layer have little effect on drag coefficient. As Reynolds increases, porous layer delay vortex shedding and the effect of porous layer on reducing drag coefficient will be obvious. It was found that for a constant Darcy number and porous layer thickness, the effect of porosity in flow parameters such as drag is negligible.

Keywords: Lattice Boltzmann Method, Porous Media, Brinkmann-Forchheimer Model, Drag Coefficient, Flow over Square Obstacle.

است [۴-۱]. در حرکت وسایل نقلیه هوایی، دریایی و زمینی نیز بخش عظیمی از انرژی سوخت صرف غلبه بر نیروی پسا^۲ می‌شود. بنابراین با توجه به بحران اقتصادی کنونی، گرمای جهانی و خطر پایان یافتن سوخت‌های فسیلی پژوهشگران امروزه به دنبال یافتن راهکارهایی جهت کاهش اثر منفی این نیروهای هیدرودینامیکی هستند. از سوی دیگر جریان‌های اطراف اجسام، معمولاً با پدیده جدایش^۳ و رهایی گردابه‌ها^۴ همراه هستند که باعث ایجاد نوسان و ارتعاش در سازه شده و می‌تواند صدمات شدیدی به آن وارد سازد. به همین دلیل تاکنون

۱-مقدمه

مطالعه جریان سیال در اطراف موانع با اشکال گوناگون از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد که دلیل آن اتفاق افتادن این نوع جریان در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند خنک‌کاری اجزای الکتریکی، خطوط انتقال نفت و گاز، مبادله‌کن گرما، دودکش‌ها، سازه‌های دریایی و غیره می‌باشد. به عنوان نمونه در مهندسی دریا^۱ بررسی جریان اطراف لوله‌های انتقال نفت و گاز و یافتن راهکاری برای کاهش نیروهای هیدرودینامیکی وارد بر این لوله‌ها بسیار حائز اهمیت

^۲ Drag Force^۳ Separation^۴ Vortex Shedding^۱ Offshore Engineering

روش‌های مختلفی برای کنترل چنین جریان‌هایی و تضعیف اثرات ناشی از جدایش، به کار گرفته شده است.

کنترل جریان به طور معمول به دو صورت انجام می‌گیرد، کنترل فعال^۱ و کنترل غیر فعال^۲. روش‌های کنترل فعال نیازمند صرف انرژی هستند اما روش‌های غیر فعال به صرف انرژی نیازی نداشته و در آن‌ها با ایجاد تغییر در ساختار و هندسه، جریان را به صورت دلخواه کنترل می‌کنند [۵]. در دهه‌های اخیر با رشد شگرفی که در تکنولوژی رخ داده، استفاده از روش‌های کنترل فعال ممکن شده است. به عنوان نمونه می‌توان با افزودن حسگرهایی^۳ در مقیاس میکرو و نانو در داخل جریان، به راحتی جریان را کنترل کرد، اما این کار از لحاظ اقتصادی نیازمند صرف هزینه زیادی است. بنابراین امروزه استفاده از روش‌های کنترل غیرفعال به دلیل سادگی و ارزان بودن، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است [۶].

تاکنون روش‌های غیرفعال بسیاری مانند استفاده از سطوح شیاردار [۸ و ۷]، ریبلت‌ها^۴ [۱۰ و ۹]، صفحات شکافنده^۵ [۱۱]، موج دار و زبر ساختن سطوح [۱۲]، افزودن مانع کوچک در پشت مانع بزرگتر [۱۳] و ... به منظور تضعیف رهايش گردابه‌ها^۶ و در نتیجه کاهش نیروی پسا و ناپایداری‌های هیدرودینامیکی مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از روش‌های مؤثر در کنترل غیرفعال جریان، افزودن لایه متخلخل به سطح خارجی مانع می‌باشد. ژائو و همکاران [۵] جریان اطراف استوانه پوشیده شده توسط یک لایه محیط متخلخل را با روش المان محدود شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که افزودن محیط متخلخل با یک ضخامت مناسب، گردادیان‌های سرعت در مجاورت مانع را کاهش می‌دهد و این امر سبب کاهش فرکانس رهايش گردابه‌ها و کم شدن نیروی پسا وارد بر مانع می‌گردد. جو و همکاران [۱۴] به مطالعه عددی جریان اطراف مانع مربعی کاملاً متخلخل با روش حجم محدود پرداختند و به این نتیجه رسیدند که اثرات تغییر در عدد دارسی بر جریان بیش از اثرات تغییر در تخلخل می‌باشد. برونو و مرتضوی [۴] با افزودن دو لایه محیط متخلخل به سطوح بالا و پایین مربع واقع در جریان آزاد به بررسی کنترل جریان برای اعداد رینولدز ۳۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۰۰۰۰ به روش عددی پنالیزیشن^۷ پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن محیط متخلخل به مانع مربعی می‌تواند ارتعاشات القایی ناشی از رهايش گردابه‌ها را تضعیف کرده و در نتیجه نیروی پسا را کاهش دهد. میمائو و همکاران [۱۵]، نشان دادند که افزودن لایه متخلخل با ضخامت کم و نفوذپذیری متوسط در اطراف اجسام نیم دایره‌ای، سبب کاهش ضریب پسا می‌گردد. کوت و همکاران [۱۶] با بکارگیری روش فعال و غیر فعال به بررسی گردابه‌های ایجاد شده در پشت موانع دایره‌ای و نیم دایره‌ای و راه‌های کاهش ضریب پسا در این اجسام پرداختند و به عنوان یک مسأله کاربردی نشان دادند که با افزودن محیط متخلخل

به آینه‌های خارجی^۸ اتومبیل‌ها می‌توان ضریب پسا و در نتیجه مصرف سوخت را کاهش داد.

نکته قابل توجه این است که در پژوهش‌های گذشته فقط به بررسی اثرات عدد رینولدز به عنوان پارامتر مؤثر بر جریان پرداخته شده است. در حالی که پارامترهای دیگری از جمله ضخامت محیط متخلخل، عدد دارسی و ضریب تخلخل نیز ممکن است اثرات قابل توجهی بر هیدرودینامیک جریان داشته باشند. در روش به کار رفته توسط برونو و مرتضوی از قانون دارسی برای مدل کردن جریان درون محیط متخلخل استفاده شده است. اما در قانون دارسی رابطه‌ی بین افت فشار ناشی از پسای اصطکاکی و سرعت در محیط متخلخل خطی بوده که فقط در جریان با سرعت‌های کم برقرار است. در سرعت‌های بالا اثرات اینرسی قابل توجه خواهند بود و نیروی پسای شکلی بر پسای اصطکاکی غالب می‌شود [۵]. بنابراین اثرات پسای شکلی نیز باید در معادله مومنوم در نظر گرفته شود که در مطالعات برونو و مرتضوی در نظر گرفته نشده است.

بیشتر روش‌های عددی به کار رفته در شبیه‌سازی جریان در اطراف موانع متخلخل بر اساس حل معادلات ناویر-استوکس در ناحیه جریان آزاد و حل معادله دارسی، برینکمن و یا فورچیمر در ناحیه محیط متخلخل طرح ریزی شده‌اند و این کار پیوند این دو ناحیه و اعمال شرط مرزی در سطح مشترک این دو ناحیه را مشکل می‌سازد. استفاده از روش شبکه بولتزمن می‌تواند به حل آسان‌تر این مسأله کمک کند. در این روش می‌توان با استفاده از معادلات یکسان برای هر دو ناحیه جریان آزاد و محیط متخلخل، میدان جریان را حل کرد، تنها تفاوت این دو ناحیه در مقدار عدد دارسی و ضریب تخلخل اختصاص داده شده به هر کدام از این دو ناحیه می‌باشد. برای جسم جامد عدد دارسی و ضریب تخلخل بسیار کوچک، برای ناحیه جریان آزاد عدد دارسی و ضریب تخلخل بسیار بزرگ و برای محیط متخلخل نیز مقادیر متوسط عدد دارسی و ضریب تخلخل در نظر گرفته می‌شود. مزیت‌های دیگر این روش بر سایر روش‌های کلاسیک حل معادلات ناویر-استوکس، حجم اندک محاسبات، توانایی بالا در پردازش موازی، محاسبه ساده‌تر فشار و ساده بودن کدنویسی می‌باشد [۱۷].

شبیه‌سازی جریان درون محیط متخلخل در مقیاس منفذی^۹، از دیر باز مورد توجه پژوهشگران بوده و کارهای زیادی در این زمینه انجام گرفته است [۲۰-۱۸]. در سال‌های اخیر توجه پژوهشگران به شبیه‌سازی جریان درون محیط متخلخل در مقیاس^{۱۰} REV جلب شده است [۲۴-۲۱]. REV کوچکترین حجم ممکن است که در آن از لحاظ آماری، میانگین‌گیری با معنی است. در این مقیاس برای شبیه سازی محیط متخلخل یک عبارت اضافی به معادلات استاندارد شبکه بولتزمن اضافه می‌گردد [۲۴ و ۲۵]. مدل‌های رایج شبیه‌سازی در مقیاس REV عبارتند از دارسی^{۱۱}، برینکمن-دارسی^{۱۲}، فورچیمر-دارسی^{۱۳} که هر کدام محدودیت‌های خاص خود را دارد. در پژوهش

⁸ External Mirrors

⁹ Pore Scale

¹⁰ Representative Elementary Volume

¹¹ Darcy

¹² Brinkman-Darcy

¹³ Forchheimer-Darcy

¹ Active Control

² Passive Control

³ Sensor

⁴ Riblets

⁵ Splitter

⁶ Vortex Shedding

⁷ Penalization

۱- مرحله جاری شدن^۳: که در آن توابع توزیع جدید در هر گره از گره مجاور به صورت زیر محاسبه می‌شود:

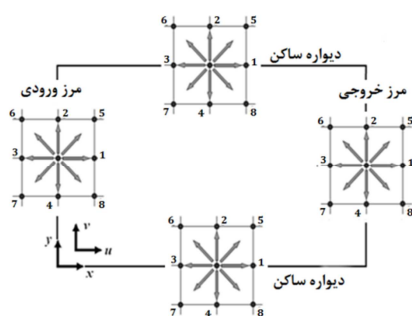
$$f_i(\vec{x} + \vec{v}_i dt, t + dt) = \tilde{f}_i(\vec{x}, t) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} 2- \text{مرحله برخورد}^4: \text{ در این مرحله برخورد ذرات با یکدیگر رخ می‌دهد.} \\ \tilde{f}_i(\vec{x} + \vec{v}_i dt, t + dt) - f_i(\vec{x}, t) \\ = -\frac{1}{\tau} [f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)] \end{aligned} \quad (5)$$

۱-۲- شرایط مرزی

اولین گام در شبیه‌سازی روش شبکه بولتزمن مشخص کردن شرط مرزی و معلوم کردن توابع توزیع در گره‌های مرزی می‌باشد. در هندسه نشان داده شده در شکل ۱، شرایط مرزی در دیواره‌های ساکن و مرزهای ورودی و خروجی می‌بایست معرفی شوند. برای مدل کردن دیواره‌های ساکن یا شرط عدم لغزش از قانون بازگشت آینه‌ای^۵ استفاده می‌شود که در آن توابع توزیع مجهول، از توابع توزیع معلومی که در خلاف جهت آنها می‌باشند، بدست می‌آیند [۱۷]. به عنوان مثال با فرض اینکه دیواره پایینی در شکل ۱، ساکن باشد، توابع توزیع مجهول f_2 و f_5 و f_6 به صورت زیر محاسبه می‌شوند.

$$f_5 = f_7, \quad f_2 = f_4, \quad f_6 = f_8 \quad (6)$$



شکل ۱- شرایط مرزی جریان در دامنه محاسباتی

برای شرط مرزی ورودی نیز (مرز چپ در شکل ۱) از روشی موسوم به زو و هی [۲۹] استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} \rho_w &= \frac{1}{1 - u_w} [f_0 + f_2 + f_4 + 2(f_3 + f_6 + f_7)] \\ f_1 &= f_3 + \frac{2}{3} \rho_w u_w \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} f_5 &= f_7 - \frac{1}{2} (f_2 - f_4) + \frac{1}{6} \rho_w u_w + \frac{1}{2} \rho_w v_w \\ f_8 &= f_6 + \frac{1}{2} (f_2 - f_4) + \frac{1}{6} \rho_w u_w - \frac{1}{2} \rho_w v_w \end{aligned}$$

که در آن u_w و v_w به ترتیب مولفه‌های سرعت در مرز ورودی، در راستای جریان و عمود بر آن و ρ_w چگالی سیال در مرز ورودی می‌باشد. سایر f ها نیز برای $i = 0, 2, 3, 4, 6, 7$ از طریق برونیابی و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$f_i(1, j) = 1.5 f_i(2, j) - 0.5 f_i(3, j) \quad (8)$$

شرط مرزی خروجی نیز به صورت مشابه قابل محاسبه است. برای شرط مرزی تناوبی از این مفهوم استفاده می‌شود که ذرات در مرز خروجی دارای همان خواص ذرات در مرز ورودی هستند. به

حاضر از مدل برینکمن-فورچایمر که کامل‌ترین روش ارائه شده در این مقیاس می‌باشد استفاده می‌شود. ضرغامی و همکاران [۲۶ و ۲۷] با استفاده از این مدل و توسط روش شبکه بولتزمن پیوند شده با حجم محدود به بررسی اثرات افزودن محیط متخلخل بر پارامترهای هیدرودینامیکی و ترموهیدرودینامیکی جریان درون کانال پرداختند. رونگ و همکاران [۲۸] با استفاده از روش شبکه بولتزمن به شبیه‌سازی جریان اطراف مانع مربعی پوشیده شده توسط محیط متخلخل پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود اثرات حضور محیط متخلخل با ضخامت‌های مختلف را بر نیروهای برآ و پسای وارد بر مانع مورد بررسی قرار دادند. اما ایشان هیچ اشاره‌ای به عدد استروهال نداشته‌اند و این در حالی است که این عدد، یکی از مهم‌ترین پارامترهای جریان در حالت ناپایا می‌باشد. همچنین در پژوهش‌های انجام شده تا کنون هیچ حالت بهینه‌ای برای کاهش ضریب پسا ارائه نشده است.

در مطالعه حاضر از روش شبکه بولتزمن و ترکیب آن با مدل برینکمن-فورچایمر^۱ که هم شامل عبارت برینکمن (لزجت) و هم عبارت فرچایمر (اینرسی) می‌باشد برای شبیه‌سازی جریان درون محیط متخلخل استفاده می‌شود. سپس به بررسی دقیق تأثیر عدد دارسی Da ، ضخامت لایه متخلخل h و ضریب تخلخل ε بر جریان پرداخته و در نهایت حالت بهینه‌ای برای کاهش نیروی پسا وارد بر مانع مربعی واقع در یک کانال پیشنهاد می‌گردد.

۲- روش شبکه بولتزمن

معادله شبکه بولتزمن با استفاده از اپراتور خطی و زمان آرامش یگانه^۲ بصورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{v}_i \cdot \nabla f_i = -\frac{1}{\tau} (f_i - f_i^{eq}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

که در آن، f تابع توزیع ذرات، τ زمان آرامش و f^{eq} نیز تابع توزیع تعادلی ماکسول بولتزمن می‌باشد. n جهت و $\vec{v}_i$ سرعت را در راستای جهت‌های مدل انتخابی نشان می‌دهد که برای مدل دو بعدی D_2Q_9 عبارتند از:

$$\vec{v}_i = \begin{cases} (0, 0) & i = 0 \\ [\cos(\frac{i-1}{2}\pi), \sin(\frac{i-1}{2}\pi)]c & i = 1, 2, 3, 4 \\ \sqrt{2}[\cos(\frac{i-5}{2}\pi + \frac{1}{4}\pi), \sin(\frac{i-5}{2}\pi + \frac{1}{4}\pi)]c & i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (10)$$

که در آن $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ سرعت شبکه، Δx طول المان‌های شبکه و Δt گام زمانی می‌باشد. تابع توزیع تعادلی برای شبکه D_2Q_9 به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۷]:

$$f_i^{eq} = w_i [1 + \frac{3}{c^2} \vec{v}_i \cdot \vec{u} + \frac{9}{2c^4} (\vec{v}_i \cdot \vec{u})^2 - \frac{3}{2c^2} \vec{u}^2] \quad (11)$$

w_i ضرایب وزنی بوده و برابر ۴/۹ برای $i = 0$ ، ۱/۹ برای $i = 1 \sim 4$ و ۱/۳۶ برای $i = 5 \sim 8$ می‌باشد. چگالی و سرعت به ترتیب از روابط $\rho = \sum_{i=0}^8 f_i$ و $\vec{u} = \sum_{i=0}^8 f_i \vec{v}_i / \rho$ محاسبه می‌شوند. همچنین، فشار از رابطه $P = \rho c_s^2$ و لزجت سینماتیکی از رابطه $\nu = c_s^2 \Delta t (\tau - 0.5)$ محاسبه می‌شوند که $c_s = c/\sqrt{3}$ سرعت صوت در شبکه می‌باشد. حل معادله شبکه بولتزمن در دو مرحله صورت می‌گیرد:

³ Streaming

⁴ Collision

⁵ Bounce Back

¹ Brinkmann-Forchheimer

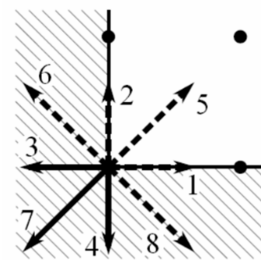
² Single Relaxation Time

عنوان مثال اگر فرض شود که شرایط مرزی ورودی و خروجی به صورت تناوبی هستند، آنگاه در مرز ورودی توابع توزیع در سه جهت ۱، ۵ و ۸ و در مرز خروجی توابع توزیع در جهت‌های ۳، ۶ و ۷ مجهول می‌باشند، که به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$f_1^{inlet}=f_1^{outlet}, f_5^{inlet}=f_5^{outlet}, f_8^{inlet}=f_8^{outlet} \quad (9)$$

$$f_3^{outlet}=f_3^{inlet}, f_6^{outlet}=f_6^{inlet}, f_7^{outlet}=f_7^{inlet} \quad (10)$$

برای بررسی شرط مرزی در گوشه‌ها شکل ۲ را در نظر بگیرید، سطح هاشور خورده بیانگر فضای خارج از دامنه محاسباتی می‌باشد. توابع توزیع معلوم f_3 و f_4 و f_7 که از داخل دامنه محاسبه می‌شوند با خطوط ممتد نشان داده شده‌اند و دیگر توابع توزیع مجهول با خط چین مشخص گردیده‌اند. بعد از مرحله جاری شدن توابع توزیع f_3 و f_4 و f_7 و همچنین چگالی معلوم هستند، از طرفی با توجه به شرط مرزی عدم لغزش در گوشه $\vec{u} = 0$ می‌باشد [۲۹].



شکل ۲- شرط مرزی در گوشه

بنابراین توابع توزیع مجهول به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} f_1 &= f_3 \\ f_2 &= f_4 \\ f_5 &= f_7 \\ f_6 &= f_8 = 0.5(\rho - (f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_7)) \end{aligned} \quad (11)$$

۲-۲- مدل برینکمن-فورچیمر

در مطالعه حاضر جریان درون محیط متخلخل به کمک مدل برینکمن-فورچیمر^۱ ترکیب شده با روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی می‌شود. به عبارت دیگر معادله شبکه بولتزمن در حضور نیروی خارجی به صورت زیر خواهد بود [۲۴]:

$$\vec{f}_i(\vec{x} + \vec{v}_i dt, t + dt) - \frac{1}{\tau} [f_i(\vec{x}, t) - f_i^{eq}(\vec{x}, t)] + \Delta t \vec{F}_i \quad (12)$$

بردار نیروی $\vec{F}_i$ در معادله (۱۲) نشان‌دهنده کل نیروهای حجمی خارجی است و مقدار آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$\vec{F}_i = w_i \rho \left(1 - \frac{1}{2\tau} \right) \left[\frac{3\vec{v}_i \cdot \vec{E}}{c^2} + \frac{9[(\vec{u} \cdot \vec{v}_i)(\vec{E} \cdot \vec{v}_i)]}{\varepsilon c^4} - \frac{3\vec{u} \cdot \vec{E}}{\varepsilon c^2} \right] \quad (13)$$

که در آن، $\vec{u}$ سرعت جریان، ε ضریب تخلخل محیط و $\vec{E}$ نیروی خارجی به دلیل حضور محیط متخلخل و سایر نیروهای خارجی می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب تخلخل، نشان‌دهنده نسبت حجم فضای خالی به حجم کل در یک محیط متخلخل می‌باشد.

نیروی خارجی $\vec{E}$ توسط معادله ارگان^۲ [۳۰] به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\vec{E} = -\frac{\varepsilon v}{k} \vec{u} - \frac{\varepsilon F_\varepsilon}{\sqrt{k}} |\vec{u}| \vec{u} + \varepsilon \vec{G} \quad (14)$$

در رابطه فوق، $F_\varepsilon = 1.75/\sqrt{150\varepsilon^3}$ تابع هندسی و $\vec{G}$ شتاب به دلیل نیروی خارجی می‌باشند. نفوذپذیری محیط نیز به صورت $k = Da \cdot H^2$ تعریف می‌شود که در آن H طول مشخصه جریان و Da عددی بدون بعد دارسی می‌باشد که نشان‌دهنده توانایی یک سیال در عبور از محیط متخلخل است. نفوذپذیری نیز به طور مرسوم یک خاصیت ثابت ماده تعریف می‌شود که تابعی از شکل و اندازه منافذ محیط است. گفتنی است که بردار نیروی $\vec{E}$ خود نیز مطابق رابطه (۱۴) شامل سه بخش است: نیروی لزجت (عبارت اول)، نیروی اینرسی به دلیل حضور محیط متخلخل (عبارت دوم) و نیروهای خارجی (عبارت سوم).

با توجه به موارد گفته شده، تابع توزیع تعادلی به صورت زیر محاسبه تصحیح می‌شود:

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left[1 + \frac{3}{2} (\vec{v}_i \cdot \vec{u}) + \frac{9}{2\varepsilon} (\vec{v}_i \cdot \vec{u})^2 - \frac{3}{2\varepsilon} |\vec{u}|^2 \right] \quad (15)$$

که $\vec{u}$ سرعت ماکروسکوپی بوده و از رابطه (۱۶) محاسبه می‌گردد [۲۴]:

$$\vec{u} = \frac{\vec{q}}{c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1 |\vec{v}|}} \quad (16)$$

که در آن:

$$c_0 = 0.5[1 + \varepsilon \Delta t v/2k] \quad (17)$$

$$c_1 = 0.5 \varepsilon \Delta t F_\varepsilon / \sqrt{k} \quad (18)$$

$$\vec{q} = \frac{1}{\rho} \sum_i \vec{v}_i f_i + \frac{\Delta t}{2} \vec{G} \varepsilon \quad (19)$$

۳- نتایج

در ابتدا به منظور اعتبارسنجی^۳ روش مورد استفاده، سه جریان کاملاً متخلخل پوازی صفحه‌ای^۴، کوئت^۵ و حفره با درپوش متحرک^۶ شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل با نتایج عددی و تحلیلی موجود ارزیابی می‌گردد. سپس به بررسی کنترل جریان در اطراف مانع مربعی پوشیده شده توسط یک لایه محیط متخلخل پرداخته خواهد شد.

۳-۱- جریان پوازی صفحه‌ای کاملاً متخلخل

جریان بین دو صفحه موازی ساکن را جریان پوازی صفحه‌ای یا جریان درون کانال می‌گویند. برای شبیه‌سازی جریان درون کانال کاملاً متخلخل، طول کانال L و عرض آن H و نسبت جانبی $\frac{L}{H} = 8$ در نظر گرفته شده است. تراکم شبکه‌بندی به صورت $N_x \times N_y = 640 \times 80$ و ضریب تخلخل $\varepsilon = 0.1$ می‌باشد. عدد رینولدز نیز به صورت $Re = U_0 \cdot H/\nu$ تعریف شده است که H عرض کانال و U_0 ماکزیمم سرعت در ورودی کانال و ν لزجت سینماتیکی سیال می‌باشند.

² Ergun

³ Validation

⁴ Fully Porous Poiseuille Flow

⁵ Fully Porous Couette Flow

⁶ Fully Porous Lid Driven Cavity Flow

¹ Brinkman-Forchheimer

۲-۳- جریان کوئت کاملاً متخلخل

جریان کوئت جریانی است که در آن، روی سطح آزاد سیال، یک صفحه‌ی جامد متحرک با سرعت U_0 قرار دارد که با توجه به شرط مرزی عدم لغزش، ذرات سیال به آن صفحه چسبیده و با سرعتی برابر با سرعت آن به حرکت در می‌آیند.

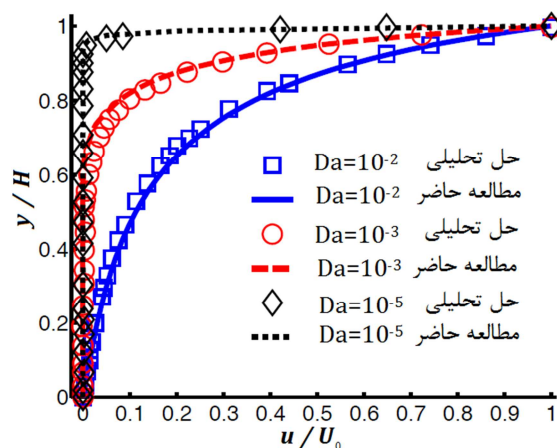
در مطالعه حاضر شرط مرزی تناوبی بر ورودی و خروجی جریان اعمال شده و عدد رینولدز نیز به صورت $Re = U_0 \cdot H / \nu$ تعریف شده است که H فاصله بین دو صفحه می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن ترم اینرسی برای $\varepsilon = 0.1$ و $Re = 10$ و $Da = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-5}$ در شکل ۴ نشان داده شده است. در این حالت حل تحلیلی جریان در حالت پایا به صورت زیر خواهد بود [۲۴]:

$$u = u_0 \exp \left[r \left(\frac{y}{H} - 1 \right) \right] \frac{\sinh \left(\varphi \cdot \frac{y}{H} \right)}{\sinh(\varphi)}, \quad v = v_0 \quad (21)$$

که در آن r و φ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$r = \frac{Re}{2\varepsilon\nu/v_e}, \quad \varphi = \frac{1}{2\varepsilon\nu/v_e} \sqrt{Re^2 + \frac{4\varepsilon\nu/v_e}{Da}} \quad (22)$$

مقایسه نتایج در شکل ۴ تأییدکننده دقت روش عددی مورد استفاده می‌باشد.



شکل ۴ - پروفیل سرعت افقی در جریان کوئت متخلخل برای $Re = 10$ ، $\varepsilon = 0.1$ و اعداد دارسی $10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-5}$ و نتایج حل تحلیلی [۲۴]

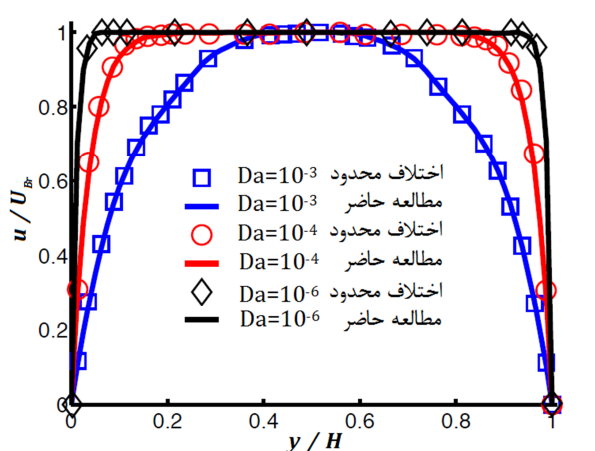
۳-۳- جریان حفره با درپوش متحرک کاملاً متخلخل

در این بخش جریان درون حفره با درپوش متحرک تشکیل شده از ماده متخلخل شبیه‌سازی می‌شود. عدد رینولدز به صورت $Re = U_0 \cdot H / \nu$ تعریف شده که H طول ضلع حفره مربعی و U_0 سرعت درپوش متحرک می‌باشد. ابتدا جریان درون محیط متخلخل با ضریب تخلخل $\varepsilon = 0.99$ شبیه‌سازی شده است که مانند حالتی است که محیط متخلخل وجود ندارد. این شبیه‌سازی برای $Da = 10^4$ و اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۱۰۰۰ انجام شد. در شکل ۵، پروفیل سرعت افقی و عمودی در مرکز حفره با نتایج گیا و همکاران [۳۱] مقایسه شده‌است که تطابق خوبی بین دو روش ملاحظه می‌شود. حال به منظور بررسی تغییرات عدد دارسی بر

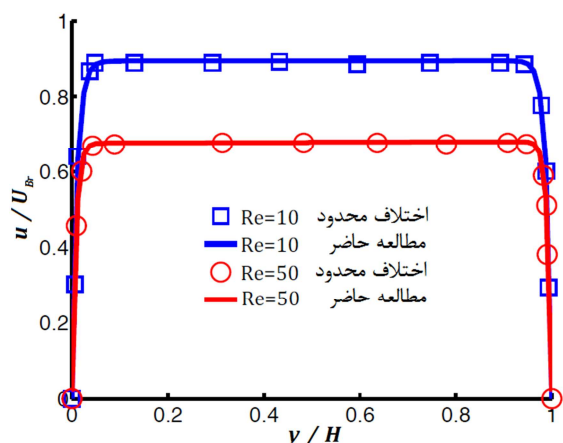
در شکل ۲، پروفیل سرعت افقی جریان با نتایج حاصل از روش اختلاف محدود در مرجع [۲۴] برای عدد رینولدز ۰/۱ و اعداد دارسی مختلف مقایسه شده‌است که بیانگر دقت بالای روش عددی مورد استفاده می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد دارسی، نفوذپذیری k نیز افزایش یافته و شکل پروفیل سرعت به سهمی نزدیک‌تر می‌شود. در شکل ۳، نیز پروفیل سرعت افقی برای جریان پوازی صفحه‌ای متخلخل برای عدد دارسی $Da = 10^{-5}$ و اعداد رینولدز ۱۰ و ۵۰ رسم شده است. در اینجا برای بی بعدسازی سرعت از U_{Br} که به صورت زیر محاسبه می‌شود، استفاده شده است: [۲۴]:

$$U_{Br} = \frac{G_x k}{\nu} [1 - (\cosh(\frac{rH}{2}))^{-1}] \quad (20)$$

که در آن $r = \sqrt{\nu\varepsilon/kv_e}$ ، $G_x = 2\rho\nu u_0/L^2$ می‌باشند. v_e نیز لزجت موثر^۱ بوده که در پژوهش حاضر، برابر با لزجت سینماتیکی ν در نظر گرفته می‌شود.

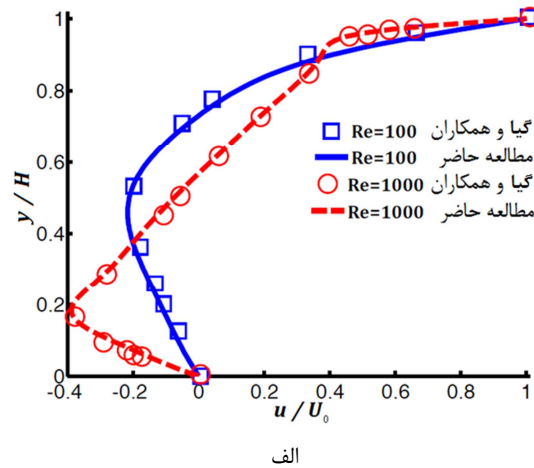
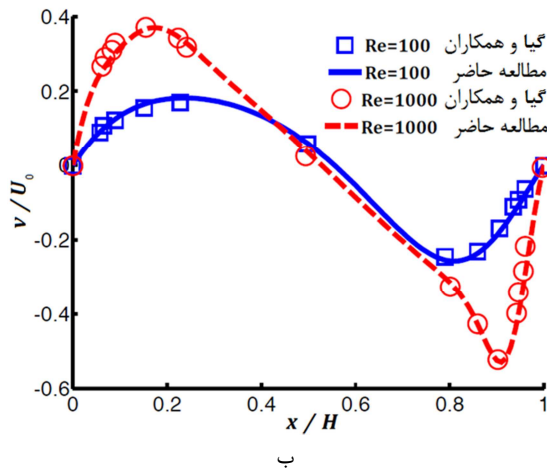


شکل ۲- مقایسه پروفیل سرعت افقی برای جریان پوازی صفحه‌ای متخلخل در $Re = 0.1$ و $Da = 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-6}$ با نتایج حاصل از روش اختلاف محدود [۲۴]

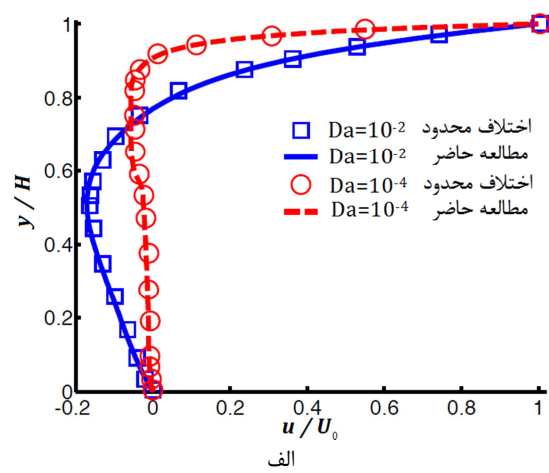
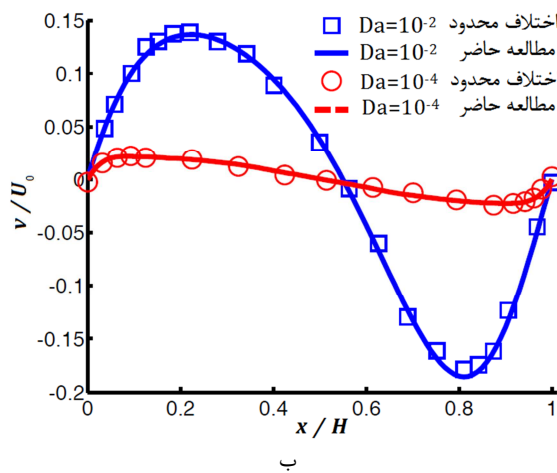


شکل ۳- پروفیل سرعت افقی برای جریان پوازی صفحه‌ای متخلخل برای $Da = 10^{-5}$ و $Re = 10, 50$ و نتایج روش اختلاف محدود [۲۴]

¹ Effective Viscosity



شکل ۵ - پروفیل سرعت (الف) افقی و (ب) عمودی در مرکز حفره برای $Re = 100, 1000$ و $Da = 10^4$ ، $\varepsilon = 0.99$ و نتایج گیا و همکاران [۳۱]



شکل ۶ - پروفیل سرعت (الف) افقی و (ب) عمودی در مرکز حفره برای $Re = 10$ ، $\varepsilon = 0.1$ و $Da = 10^{-2}, 10^{-4}$ و نتایج روش اختلاف محدود [۲۴]

در ابتدا چند شبیه‌سازی برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی انجام می‌شود. جدول ۱، مشخصات شبکه‌بندی‌های انتخابی را نشان می‌دهد که به منظور دستیابی به دقت مطلوب استفاده شده‌اند. عدد استروهل و ضریب پسا موجود در این جدول مربوط به عدد رینولدز 200 ، ضخامت $\frac{h}{D} = 0.1$ و عدد دارسی $Da = 10^{-3}$ می‌باشد.

بنابراین با توجه به داده‌های به دست آمده، شبکه‌بندی 1280×320 به عنوان تراکم شبکه انتخاب می‌گردد. عدد بدون بعد استروهل^۱ که به صورت $St = \frac{\omega D}{u_0}$ تعریف می‌شود، یک پارامتر مهم در بررسی جریان‌های ناپایا می‌باشد که ω فرکانس رهائش گردابه‌ها و u_0 سرعت بیشینه در ورودی کانال می‌باشد.

ضریب پسا نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد. که در آن، F_d نیروی پسا، ρ چگالی سیال، u_0 سرعت بیشینه جریان در ورودی کانال و D طول ضلع مربع می‌باشد. نیروی پسا نیز با استفاده از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود:

که در رابطه (۲۴)، l محیط مانع، n_x و n_y مولفه‌های افقی و عمودی بردار نرمال بر سطح سیلندر، u_t مولفه مماسی سرعت و P فشار می‌باشد.

جریان، شبیه‌سازی برای $\varepsilon = 0.1$ و $Re = 10$ و $Da = 10^{-2}, 10^{-4}$ انجام می‌گیرد. در شکل ۶، نتایج شبکه بولتزمن با نتایج حاصل از مرجع [۲۴] مبتنی بر روش اختلاف محدود مقایسه شده است.

۳-۴- جریان اطراف مانع مربعی پوشیده شده با محیط متخلخل

در ادامه نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان اطراف مانع مربعی که

یک

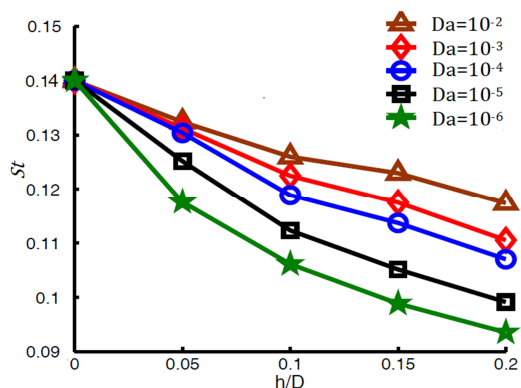
$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho u_0^2 D} \quad (23)$$

لایه محیط متخلخل به ضخامت h اطراف آن اضافه شده ارائه می‌شود.

$$F_d = \int (\rho v \frac{\partial u_t}{\partial n} n_y + P n_x) dl \quad (24)$$

شکل ۷، هندسه مسئله مورد بررسی را نشان می‌دهد. جریان با سرعت یکنواخت u_0 وارد کانالی با نسبت انسداد $BR = 1/8$ می‌شود. عدد رینولدز به صورت $Re = u_0 \cdot D / \nu$ و عدد دارسی به صورت $Da = k/D^2$ تعریف می‌شود که D طول ضلع مربع می‌باشد.

¹ Strouhal Number

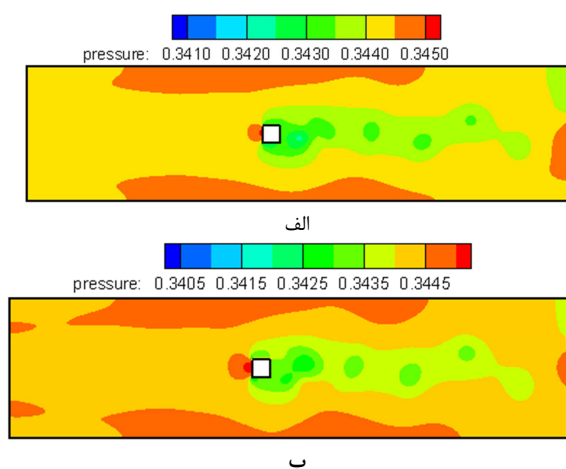


شکل ۹ - عدد استروهل بر حسب ضخامت لایه متخلخل در $Re = 200$ و $\varepsilon = 0.4$ اعداد دارسی مختلف

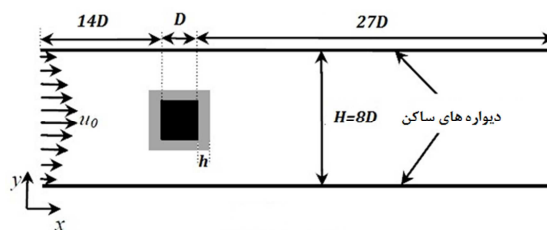
جدول ۱ - تراکم شبکه در جریان اطراف مربع پوشیده شده از محیط متخلخل

اعداد استروهل St	ضریب پسا Cd	ابعاد شبکه بندی در میدان جریان
۰/۱۳۰۰	۱/۳۴	320×80
۰/۱۲۴۵	۱/۳۰	640×160
۰/۱۲۲۶	۱/۲۸	960×240
۰/۱۲۲۵	۱/۲۷	1280×320

همچنین نتایج شکل ۹، نشان می‌دهد که در یک عدد دارسی ثابت، افزایش ضخامت باعث کاهش عدد استروهل می‌گردد. شکل ۱۰، کانتورهای فشار را در عدد رینولدز ۲۰۰ برای حالت‌های بدون تخلخل و با تخلخل (ضخامت $h/D = 0.1$ و $Da = 10^{-3}$) نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشهود است وجود نقطه سکون در جلوی مانع، سبب بیشینه شدن فشار در این ناحیه شده است. همچنین کمینه مقدار فشار نیز در نواحی تشکیل گردابه‌ها مشاهده می‌شود. در شکل ۱۱، خطوط جریان در $h/D = 0.1$ و تخلخل $\varepsilon = 0.4$ رسم شده است.



شکل ۱۰ - کانتور فشار در $Re = 200$
(الف) بدون لایه متخلخل (ب) با لایه متخلخل با ضخامت $h/D = 0.1$ و $Da = 10^{-3}$



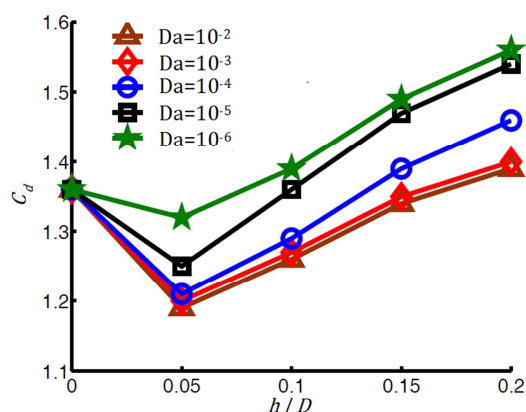
شکل ۷ - طرحواره مانع مربعی پوشیده شده با یک لایه محیط متخلخل درون کانال

۳-۴-۱ بررسی تغییرات ضخامت محیط متخلخل بر جریان

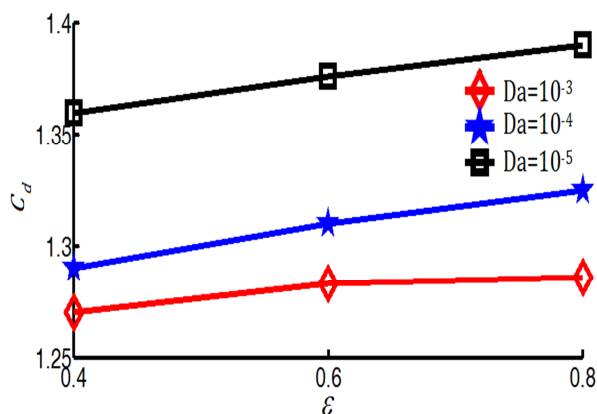
در ابتدا به بررسی اثرات تغییر در ضخامت لایه متخلخل بر جریان پرداخته می‌شود. برای این منظور شبیه‌سازی در عدد رینولدز ۲۰۰ و ضخامت‌های بدون بعد $h/D = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$ و $Da = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}$ انجام شد.

در شکل ۸، تغییرات ضریب پسای وارد بر مانع مربعی بر اساس ضخامت بدون بعد لایه متخلخل برای اعداد دارسی مختلف نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۸، مشخص است با افزایش عدد دارسی و کاهش ضخامت، ضریب پسا کاهش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که کمترین ضریب پسا در ضخامت $h/D = 0.05$ و عدد دارسی $Da = 10^{-2}$ رخ می‌دهد که نسبت به مربع بدون لایه متخلخل ۱۲٪ نیروی پسا کاهش یافته است. علت آن که در اعداد دارسی بزرگتر کاهش ضریب پسا بیشتر است این است که با افزایش عدد دارسی، جریان راحت‌تر از درون محیط متخلخل عبور می‌کند.

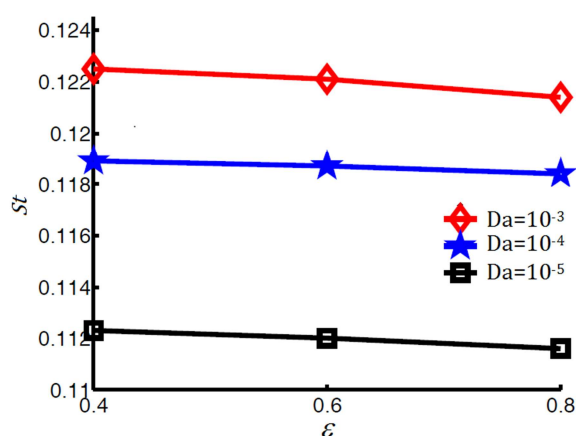
شکل ۹، تغییرات عدد استروهل بر حسب ضخامت در اعداد دارسی مختلف نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشخص است افزودن محیط متخلخل به مانع مربعی در تمام اعداد دارسی و ضخامت‌های مورد بررسی باعث کاهش عدد استروهل شده است. در واقع افزودن محیط متخلخل باعث کاهش فرکانس جدایش گردابه‌ها شده و رفتار نوسانی جریان را کند می‌کند.



شکل ۸ - ضریب پسا بر حسب ضخامت لایه متخلخل در $Re = 200$ و $\varepsilon = 0.4$ اعداد دارسی مختلف



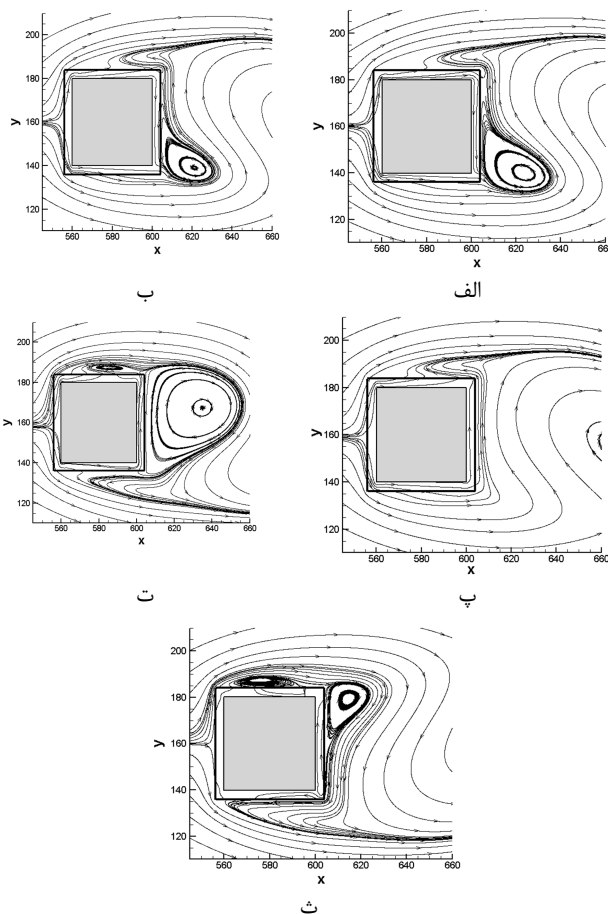
شکل ۱۲- ضریب پسا بر حسب تخلخل محیط در $Re = 200$ و $\frac{h}{D} = 0.1$ و اعداد دارسی مختلف



شکل ۱۳ - عدد استروهل بر حسب تخلخل محیط در $Re = 200$ و $\frac{h}{D} = 0.1$ و اعداد دارسی مختلف

۳-۴-۳ بررسی اثرات تغییر در عدد رینولدز بر جریان

در ادامه تاثیر عدد رینولدز بر جریان اطراف مانع مربعی پوشیده شده توسط محیط متخلخل بررسی می‌شود. بدین منظور عدد رینولدز از ۲۰ تا ۲۵۰ تغییر داده می‌شود. ضخامت و عدد دارسی مورد استفاده در این مطالعه و $\frac{h}{D} = 0.05$ و $Da = 10^{-3}$ می‌باشند. همانطور که در شکل ۱۵، مشاهده می‌شود در اعداد رینولدز کوچک به دلیل پایا بودن جریان، جدایش جریان وجود نداشته و در نتیجه افزودن محیط متخلخل به جسم تاثیر چندانی بر ضریب پسا ندارد. اما با افزایش عدد رینولدز به مقادیر بالاتر از ۶۰ جریان از حالت متقارن خارج شده و ناپایا می‌گردد و رهائش گردابه‌ها درون جریان رخ می‌دهد. در این حالت افزودن محیط متخلخل به جسم به دلیل تضعیف رهائش گردابه‌ها بر ضریب پسا مؤثر بوده و با افزایش عدد رینولدز، اثر افزودن محیط متخلخل بر کاهش ضریب پسا مشهودتر می‌گردد.



شکل ۱۱ - خطوط جریان در ضخامت $\frac{h}{D} = 0.1$ و ضریب تخلخل $\varepsilon = 0.4$

(الف) $Da = 10^{-2}$ (ب) $Da = 10^{-3}$ (پ) $Da = 10^{-4}$ (ت) $Da = 10^{-5}$

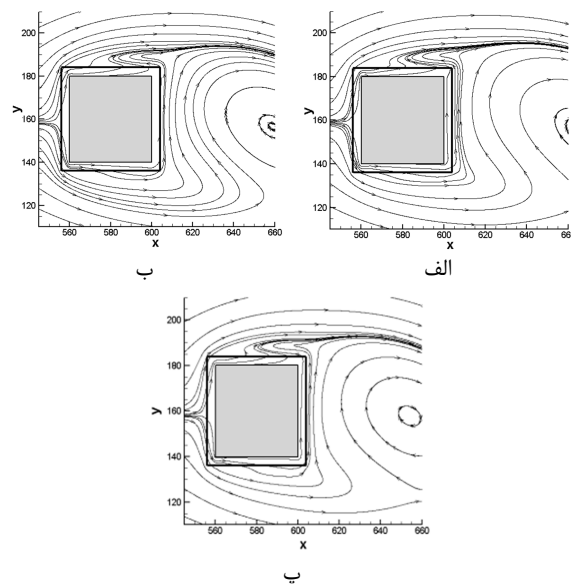
۳-۴-۲ بررسی تغییرات تخلخل بر جریان

به منظور بررسی اثرات تخلخل بر جریان، شبیه‌سازی در ضخامت $\frac{h}{D} = 0.1$ و $Da = 10^{-2}, 10^{-3}, 10^{-4}$ و عدد رینولدز ۲۰۰ انجام می‌شود. تغییرات ضریب پسا نسبت به تخلخل در شکل ۱۲، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ضریب تخلخل در یک عدد دارسی و ضخامت یکسان باعث افزایش اندک ضریب پسا می‌گردد که با نتایج به دست آمده توسط جو و همکاران [۱۴] همخوانی دارد. شکل ۱۳، نیز نشان می‌دهد که تغییر در تخلخل، تاثیر بسیار کمی بر عدد استروهل دارد. خطوط جریان برای ضخامت $\frac{h}{D} = 0.1$ و عدد دارسی $Da = 10^{-4}$ و پس از ۶۵۰۰۰ تکرار در شکل ۱۴، رسم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود خطوط جریان برای سه ضریب تخلخل ۰/۴ و ۰/۶ و ۰/۸ بسیار مشابه هم است و این امر بیانگر این مطلب است که تغییر در ضریب تخلخل تاثیر اندکی بر جریان دارد.

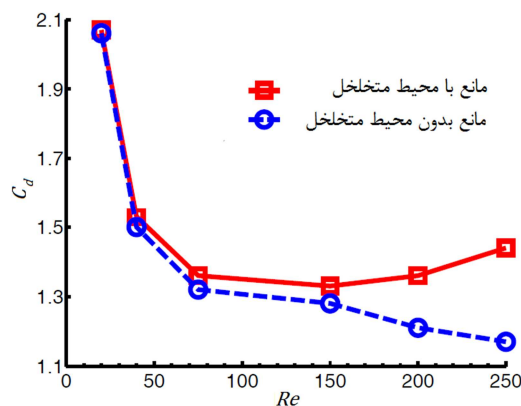
بدون لایه متخلخل ۱۲٪ نیروی پسا کاهش یافته است. در اعداد رینولدز کوچکتر از ۶۰ به دلیل آنکه جدایش جریانی وجود ندارد، افزودن محیط متخلخل تاثیر چندانی بر جریان ندارد، ولی با افزایش عدد رینولدز تاثیر حضور محیط متخلخل بر جریان بیشتر می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در یک ضخامت و عدد دارسی ثابت، تغییر در ضریب تخلخل محیط، تاثیر بسیار اندکی بر جریان دارد.

۵- مراجع

- [1] Davis R. W., Moore E. F., "Numerical Study of Vortex Shedding from Rectangles, Journal Of Fluid Mechanics", Vol. 116, pp. 475-506, 1982.
- [2] Suzuki H., Inoue Y., Nishimura T., Fukutani F., Suzuki K., "Unsteady Flow in a Channel Obstructed by a Square Rod (Crisscross Motion of Vortex)", International Journal Of Heat Fluid Flow, Vol. 14, No. 1, pp. 2-9, 1993.
- [3] Mukhopadhyay A., Biswas G., Sundararajan T., "Numerical Investigation of Confined Wakes behind a Square Cylinder in a Channel, International Journal of Numerical Methods in Fluids", Vol. 14, pp. 1473-1484, 1992.
- [4] Bruneau C., Mortazavi I., "Passive control of the Flow around a square cylinder using porous media", International Journal of Numerical Methods in Fluids, Vol. 46, pp. 416-433, 2004.
- [5] Zhao M., Cheng L., "Finite element analysis of flow control using porous media", Journal of Ocean Engineering, Vol. 37, pp. 1357-1366, 2010.
- [6] Altaf A., Ashraf A., Asrar W., "Review Of Passive Drag Reduction Techniques For Bluff Road Vehicles", IIUM Engineering Journal, Vol. 15, No. 1, pp. 61-69, 2014.
- [7] Wiplier O., Ehrenstein U., "Numerical Simulation of Linear and non Linear Disturbance evolution in a boundary layer with complaint walls", Journal of Fluids and Structures, Vol. 14, pp. 157-182, 2000.
- [8] Davis C., Carpenter P. W., "Instabilities in a Plane Channel Flow between Complaint walls", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 352, pp. 205-243, 1997.
- [9] Ehrenstein U., "On the linear stability of channel flow over riblets", Journal of Physics of Fluids, Vol. 8, pp. 3194-3196, 1996.
- [10] Luchini P., "Asymptotic analysis of laminar Boundary-Layer Flow over Finely Grooved Surfaces", European Journal of Mechanics B, Vol. 14, No. 2, pp. 169-195, 1995.
- [11] Berman P.W., "Investigation of the Flow Behind a two Dimensional model with a blunt trailing edge with splitter plates", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 21, No. 2, pp. 241-255, 1965.
- [12] Zdrakovich M. M., "Review and Classification of various aerodynamic means for suppressing vortex shedding", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 7, No. 2, pp. 145-189, 1981.
- [13] Strykowski P. J., Sreenivasan K. R., "On the formation and suppression of vortex shedding at low Reynolds number", Journal of Fluids Mechanics, Vol. 218, pp. 71-107, 1990.
- [14] Jue T. C., "Numerical analysis of vortex shedding behind a porous cylinder", International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Vol. 14, No. 5, pp. 649-663, 2004.
- [15] Mimeau C., Mortazavi I., Cottet G. H., "Passive flow control around a semi-circular cylinder using porous coatings", Journal of Flow Control, Vol. 6, No. 1, pp. 43-60, 2014.
- [16] Cottet G. H., Hildebrand R., Koumoutsakos P., Mimeau C., Mortazavi I., "Passive and active flow control using vortex methods", 6th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, Nagoya, Japan, Nov 2014.
- [17] Succi S., "the Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond", Oxford University Press, 2001.
- [18] Cancelliere A., Chang C., Foti E., Rothman D.H. and Succi S., "The Permeability of a Random Medium: Comparison of Simulation with Theory", Journal of Physics of Fluids A, Vol. 2, No. 12, pp. 2085-2088, 1990.



شکل ۱۴ - خطوط جریان در ضخامت $h/D = 0.1$ و $Da = 10^{-4}$
(الف) $\varepsilon = 0.4$ (ب) $\varepsilon = 0.6$ (پ) $\varepsilon = 0.8$



شکل ۱۵ - ضریب پسا بر حسب عدد رینولدز در $h/D = 0.05$ و عدد دارسی $Da = 10^{-3}$

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جریان درون محیط متخلخل با روش شبکه بولتزمن و مدل برینکمن-فورچیمر شبیه‌سازی شد. اثرات محیط متخلخل به صورت یک جمله نیرو در معادله‌ی شبکه بولتزمن وارد شد. مقایسه نتایج حاصل با نتایج پژوهش‌های پیشین نشان دهنده دقت و صحت روش مورد استفاده در شبیه‌سازی جریان درون محیط متخلخل می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی جریان در اطراف مانع مربعی پوشیده شده توسط محیط متخلخل نشان داد که با انتخاب مناسب پارامترهای محیط متخلخل از جمله ضخامت محیط، عدد دارسی و ضریب تخلخل می‌توان رفتار نوسانی جریان را کاهش داد و جدایش جریان را به تاخیر انداخت و در نتیجه نیروی پسا وارد بر مانع را به طور قابل توجهی کم کرد. در اعداد دارسی بزرگتر و ضخامت‌های کمتر محیط متخلخل، کاهش ضریب پسا و منظم ساختن الگوی جریان بیشتر خواهد بود. کمترین ضریب پسا در ضخامت $h/D = 0.05$ و عدد دارسی $Da = 10^{-2}$ رخ می‌دهد که نسبت به مربع

- [19] Martys N., Chen H., "Simulation of Multicomponent Fluids in Complex Three-Dimensional Geometries By The Lattice Boltzmann Method", *Physical Review E*, Vol. 53, pp. 743-750, 1996.
- [20] Succi S., Foti E., Higuera F., "Three Dimensional Flows in Complex Geometries with the Lattice Boltzmann Method", *Euro Physics Letters*, Vol. 10, pp. 433-438, 1989.
- [21] Vafai K., Tien C. L., "Boundary and Inertia Effects on Flow and Heat Transfer in Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 24, No. 2, pp. 195-203, 1981.
- [22] Kang Q., Zhang D., Chen S., "Unified Lattice Boltzmann Method for Flow in Multi Scale Porous Media", *Physical Review E*, Vol. 66, 056307, 2002.
- [23] Anwar S., Sukop M. C., "Regional Scale Transient Ground Water Flow Modeling Using Lattice Boltzmann Method", *Computers and Mathematics with application*, Vol. 58, pp. 1015-1023, 2009.
- [24] Guo Z., Zhao T. S., "Lattice Boltzmann model for incompressible flows through porous media", *Journal of Physical Review E*, Vol. 66, pp. 1-9, 2002.
- [25] Chau J. F., Sukop M. C., "Simulation of Gaseous Diffusion in Partially Saturated Porous Media under Variable Gravity with Lattice Boltzmann Method", *Water Resources Research*, Vol. 41, W08410, 2005.
- [26] Zarghami A., Biscarini C., Succi S., Ubertini S., "Hydrodynamics in porous media: a finite volume Lattice Boltzmann study", *Journal of Scientific Computing*, Vol. 56, No. 2, pp. 1-26, 2013.
- [27] Zarghami A., Di Francesco S., Biscarini C., "Porous substrate effects on thermal flows through a REV scale finite volume Lattice Boltzmann model ", *International Journal of Modern Physics C*, Vol. 25, No. 2, pp. 1-21, 2014.
- [28] Rong F. M., Guo Z. L., Lu J. H., and Shi B. C., "Numerical simulation of the flow around a porous covering square cylinder in a channel via lattice Boltzmann method", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 65, pp.1217-1230, 2010.
- [29] Zou Q., He X., "On Pressure and Velocity Boundary Conditions for The Lattice Boltzmann BGK model", *Journal of Physics of Fluids*, Vol.9, No. 6, pp. 1591-1598, 1977.
- [30] Guo Z., Zheng C., Shi B. C., "Discrete Lattice Effects on the Forcing Term In The Lattice Boltzmann Method", *Physical Review E*, Vol. 65, pp. 1-6, 2002.
- [31] Ghia U., Ghia K. N., Shin C. T., "High-Re Solutions for Incompressible Flow Using the Navier Stokes Equation and a Multi grid Method", *Journal of computational Physics*, Vol. 48, pp. 387-411, 1982.