



مدل‌سازی عددی جریان عبوری از درون و پیرامون محیط متخلخل در اعداد رینولدز پایین به روش اشباع نسبی

سیاوش هنری^۱، سید احسان سیدی حسینی نیا^۲

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

esevedi@um.ac.ir

خلاصه

کاربرد گسترده‌ی محیط‌های متخلخل در حوزه‌های گوناگون و رفتار پیچیده‌ی آن‌ها شناخت هرچه بیشتر جریان سیال درون و پیرامون محیط‌های متخلخل را ایجاب می‌کند. معمولاً این محیط‌ها بصورت ریزمقیاس با مدل‌سازی مستقیم اجزای تشکیل‌دهنده‌ی محیط متخلخل، و یا پس از تخمین نفوذپذیری محیط بصورت بزرگ‌مقیاس شبیه‌سازی می‌شوند. برای کاهش هزینه‌های محاسباتی مدل‌های ریزمقیاس از یک سو و بی‌نیازی به تخمین نفوذپذیری محیط متخلخل از سوی دیگر، در پژوهش حاضر روش اشباع نسبی در ترکیب با روش شبکه‌ی بولتزمن در چارچوبی نوین برای شبیه‌سازی جریان سیال در محیط متخلخل استفاده می‌شود. براساس نتایج مدل‌سازی، دقت کیفی نتایج روش عددی تأیید شده و روند تغییرات برخی پارامترها مانند ضریب پسا (درگ)، نفوذپذیری و توزیع خطوط جریان درون و پیرامون محیط متخلخل با نتایج مطالعات پیشین قابل مقایسه است. در اعداد رینولدز بالاتر، مقدار ضریب پسا مدل‌های متخلخل از مدل ناتراوا بیشتر است. با افزایش تخلخل تعداد خطوط جریان گذرنده از محیط متخلخل و مقدار ضریب نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد. با کاهش مقدار تخلخل، محیط متخلخل مشابه محیط ناتراوا عمل کرده و در اعداد رینولدز نسبتاً بالا، دنباله‌های چرخان در پشت محیط متخلخل تشکیل می‌شود. با افزایش مقدار تخلخل این دنباله‌ها از بین رفته و خطوط جریان حالت یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد.

کلمات کلیدی: جریان سیال، محیط متخلخل، ضریب پسا، روش شبکه‌ی بولتزمن، روش اشباع نسبی

۱. مقدمه

در چند دهه‌ی اخیر، محیط متخلخل کاربردهای متنوعی در حوزه‌های گوناگون نظیر ژئوتکنیک زیست‌محیطی [۱]، هیدرولوژی و اصلاح آب‌های زیرزمینی، صنایع نفت و گاز [۲]، انرژی هسته‌ای [۳]، فیلترهای شیمیایی و بیولوژیکی [۳] و صنایع سرمایه‌گذاری [۴] پیدا کرده است. همچنین، محیط متخلخل در محیط‌های طبیعی متنوعی مانند جریان‌های آب زیرزمینی، فرسایش و ته‌نشینی آبرفت‌های رودخانه‌ای [۵]، گرده‌افشانی و جابجایی گیاهان کوچک [۶]، پرواز حشرات با بال‌های مجوف [۷] و نیز لخته شدن جریان خون [۸] یافت می‌شود. گسترش حضور محیط متخلخل از یک سو و دانش ناکامل جریان سیال در محیط متخلخل [۹] از سوی دیگر سبب افزایش اهمیت بررسی رفتار جریان عبوری از محیط متخلخل گردیده و تاکنون مطالعات متنوعی در این رابطه انجام شده است.

بطور کلی، دو دیدگاه عمده در مطالعه‌ی این نوع جریان‌ها وجود دارد. در دیدگاه اول، محیط متخلخل بصورت مجموعه‌ای از اجزای جامد در ریزمقیاس مدل شده و عبور جریان سیال از میان و پیرامون این محیط بررسی می‌شود. در دیدگاه دوم، محیط متخلخل بعنوان یک مجموعه‌ی واحد نیمه‌تراوا بصورت بزرگ‌مقیاس در نظر گرفته می‌شود.

در چارچوب دیدگاه اول، عبور معمولاً جریان‌های با عدد رینولدز پایین از میان موانع استوانه‌ای با تعداد کم مورد مطالعه قرار گرفته است که علی‌رغم شبیه‌سازی غیردقیق محیط‌های متخلخل کاربردی، به دلیل ساختار و فرمولاسیون ساده اطلاعات مفیدی در رابطه با سازوکار پایه‌ای موانع موجود در جریان سیال بدست می‌دهد [۱۰]. در بیشتر مطالعات ریزمقیاس جریان سیال با اعداد رینولدز کم، نیروی پسا (درگ) وارده بر هر یک از موانع بررسی شده و در نتیجه، اثر جریان سیال پیرامون مجموعه‌ی موانع و همچنین نیروی پسا وارده بر آن مورد مطالعه قرار نگرفته است [۱۱]. ماسلیا و پولیکار [۱۲]

آزمایش‌هایی بر روی یک گرهی متخلخل با تخلخل (نسبت حجم حفرات به حجم کل مجموعه) ۹۷/۵۷ درصد در اعداد رینولدز بالا و پایین انجام داد. ایشان نتیجه گرفتند که در اعداد رینولدز پایین، گرهی متخلخل نیروی پسا کوچکتری نسبت به گرهی توپر (ناتراوا) دارد؛ اما با افزایش مقدار عدد رینولدز، ضریب پسا^۱ (ضریب درگ) گرهی متخلخل بزرگ‌تر از مقدار این ضریب در گرهی توپر است.

مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بر روی جریان‌های با اعداد رینولدز کوچک نادر است. چنین جریان سیالی معمولاً با دیدگاه دوم مطالعات محیط متخلخل یعنی مدل‌های بزرگ‌مقیاس محیط متخلخل^۲ (PMM) و مقادیر دلخواه نفوذپذیری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نویمر و همکاران [۱۳] نیروی پسا وارده بر استوانه‌ی دایروی متخلخل را به کمک رابطه‌ی داریسی مطالعه نمودند. در مقادیر بسیار کم نفوذپذیری، ضریب پسا محاسبه شده مشابه با مقدار این ضریب برای استوانه‌ی جامد (بدون تخلخل) بدست آمد. در مقابل، برای مقادیر زیاد نفوذپذیری، ضریب پسا محاسباتی بصورت مجانب به صفر نزدیک شد. برای مقادیر نفوذپذیری متوسط، وابستگی شدیدی میان ضریب پسا و عدد رینولدز مشاهده گردید [۱۴، ۱۵]. با بررسی دنباله‌های چرخان^۳ پشت اجسام متخلخل با مقادیر مختلف نفوذپذیری در اعداد رینولدز گوناگون مشخص شد که رفتار دنباله وابستگی فراوانی به این اعداد دارد. کامینز و همکاران [۶] جریان سیال عبوری از درون و پیرامون دیسک متخلخل را با استفاده از مدل داریسی - برینکمن مطالعه کردند. ایشان نتیجه گرفتند که نیروی پسا دیسک متخلخل در اعداد رینولدز نسبتاً بالا و مقادیر مشخص نفوذپذیری بزرگ‌تر از نیروی پسا دیسک جامد (بدون تخلخل) است.

مطالعات بزرگ‌مقیاس PMM از این جهت حائز اهمیت است که می‌تواند درکی کلی از نحوه‌ی تأثیرگذاری مقدار نفوذپذیری محیط متخلخل بر جریان عبوری از درون و پیرامون این محیط ارائه دهد. همچنین، امکان مدل‌سازی جریان در محیط متخلخل با نسبت‌های جامد بسیار کوچک و بسیار بزرگ در این دسته از مطالعات به آسانی فراهم می‌شود. با این حال، نتایج بدست آمده از مطالعات PMM ممکن است دقت کافی نداشته باشد زیرا نتایج آن وابستگی زیادی به پارامتر تجربی نفوذپذیری دارد که تعیین مقدار دقیق آن به آسانی میسر نیست. جهت صحت‌سنجی نتایج مطالعات بزرگ‌مقیاس محیط متخلخل تحت اثر جریان با اعداد رینولدز نسبتاً کم، تنگ و همکاران [۳] نیروی پسا وارد بر مجموعه‌ای از استوانه‌ها را بصورت مستقیم به روش حجم محدود مورد شبیه‌سازی عددی قرار دادند. برای این منظور، تعداد ۱۰۰ عدد استوانه دایروی بصورت منظم در ۱۰ ردیف و ۱۰ ستون در کنار یکدیگر چیده شدند تا محیط متخلخل مربع‌شکل تشکیل گردد. برای ایجاد مقادیر مختلف تخلخل در این محیط مربعی، استوانه‌ها با قطرهای گوناگون مدل شدند و مقدار نسبت‌های جامد (ϕ) در هر حالت بصورت نسبت حجم استوانه‌های جامد به حجم کل محیط متخلخل محاسبه گردید. علی‌رغم پاسخ‌های مناسب مدل تنگ و همکاران [۳]، روش مدل‌سازی ایشان با موانع جدی مانند هزینه‌ی محاسباتی بالای مدل‌سازی مستقیم (ریزمقیاس) محیط متخلخل مواجه بود. همچنین در این روش، امکان شبیه‌سازی محیط متخلخل با نسبت‌های جامد بسیار بالا بدلیل عدم امکان عبور سیال و نسبت‌های تخلخل بسیار پایین بدلیل ناچیز شدن ابعاد استوانه‌ها وجود نداشت.

در مطالعه‌ی حاضر، روش اشباع نسبی^۴ برای مدل‌سازی بزرگ‌مقیاس محیط متخلخل بکار گرفته می‌شود که ضمن استفاده از مزایای روش مدل‌سازی بزرگ‌مقیاس مانند هزینه‌ی محاسباتی کم و سادگی مدل، نیازی به تخمین نفوذپذیری محیط متخلخل نداشته و مستقیماً مقدار نسبت جامد محیط متخلخل (و یا بطور متناظر، مقدار تخلخل محیط) را مورد استفاده قرار می‌دهد. از طرف دیگر، روش پیشنهادی این پژوهش محدودیت‌های مدل‌سازی مستقیم محیط متخلخل را نداشته و می‌تواند جریان سیال درون و پیرامون محیط متخلخل را حتی برای مقادیر بسیار زیاد یا بسیار کم نسبت جامد شبیه‌سازی نماید. در پژوهش حاضر تلاش می‌گردد تا کاربرد روش اشباع نسبی، که با نام روش مرز متحرک مستغرق^۵ نیز شناخته شده و معمولاً برای محاسبه‌ی دقیق‌تر اندرکنش جریان سیال و ذرات جامد متحرک بکار گرفته می‌شود [۱۶] در مدل‌سازی جریان در محیط متخلخل بررسی گردد.

۲. روش پژوهش

مدل بکار رفته در پژوهش حاضر در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل مشابه با مدل عددی پژوهش تنگ و همکاران [۳] است با این تفاوت که برای کاهش اثرگذاری مرزهای جانبی بر جریان سیال، عرض کانال افزایش یافته است. همانطور که در شکل ۱-الف دیده می‌شود، خروجی جریان سیال مرز فشار صفر ($P = 0$) بوده و ورودی جریان مرز سرعت در نظر گرفته شده است که مقدار سرعت افقی جریان در آن مطابق با عدد رینولدز جریان تعیین می‌گردد. در این پژوهش، مشابه با مطالعه‌ی تنگ و همکاران [۳]، عدد رینولدز جریان بصورت زیر تعریف می‌شود:

¹ drag coefficient

² macroscopic porous media model

³ recirculating wake

⁴ partially saturated method

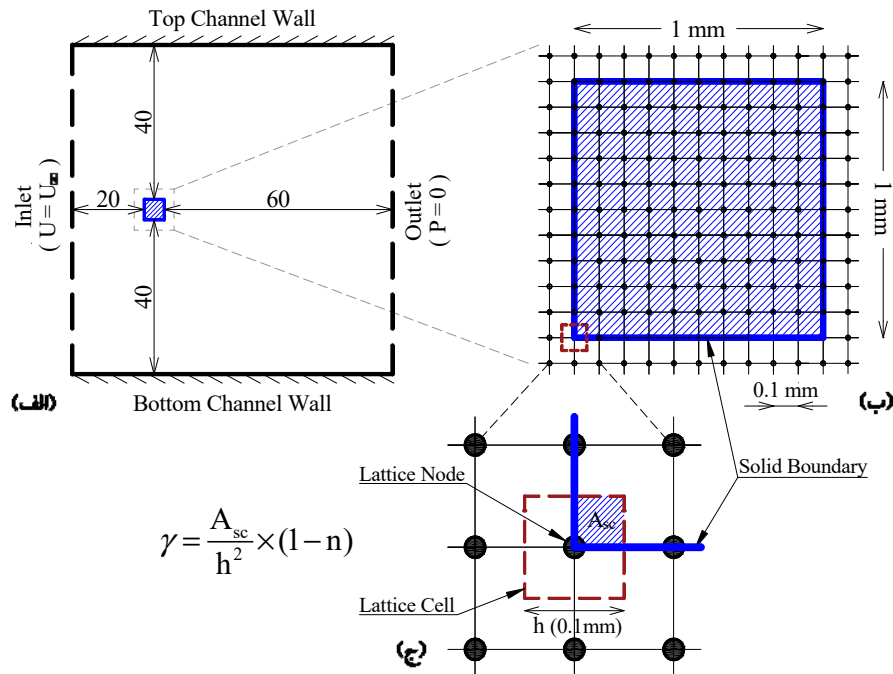
⁵ immersed moving boundary method

$$Re = \frac{U_{\infty} D}{\nu} \quad (1)$$

در این رابطه، U_{∞} سرعت جریان ورودی، D طول مشخصه برابر با بُعد محیط متخلخل مربعی و ν لزجت سینماتیکی سیال است. سیال مورد مطالعه آب در نظر گرفته شده و جداره‌های بالا و پایین کانال دیواره‌های جامد بدون امکان لغزش (با سرعت صفر) فرض شده‌اند. جریان آب در کانال با استفاده از روش شبکه‌ی بولتزنن شبیه‌سازی می‌شود. برای انجام مدل‌سازی، مطابق شکل ۱-ب، محیط مدل به شبکه‌هایی مربعی به ابعاد ۰/۱ میلی‌متر تقسیم‌بندی شده و بُعد مربع متخلخل برابر با ۱ میلی‌متر فرض گردید ($D = 1\text{mm}$). بدین ترتیب، محیط متخلخل به ۱۰۰ سلول محاسباتی تقسیم‌بندی شده و طول و عرض مرکز محیط متخلخل به ترتیب ۲۰/۵ و ۴۰/۵ میلی‌متر انتخاب گردید. نحوه‌ی تعریف محیط متخلخل و شبیه‌سازی اندرکنش آن با جریان سیال براساس روش اشباع نسبی در شکل ۱-ج نشان داده شده است. در این روش، کمیتی به نام سهم جامد (γ) برای هر سلول محاسباتی تعریف می‌شود که نسبت بخش جامد تحت پوشش هر سلول محاسباتی به کل سطح سلول را در نظر می‌گیرد. برای لحاظ نمودن اثر تخلخل محیط (n) بر جریان سیال، رابطه‌ی تعیین سهم جامد در هر سلول بصورت زیر پیشنهاد شد:

$$\gamma = \frac{A_{sc}}{h^2} \times (1 - n) \quad (2)$$

پس از محاسبه‌ی مقدار سهم جامد برای هر سلول محاسباتی مطابق رابطه‌ی ۲، اندرکنش جریان سیال و محیط متخلخل براساس معادلات روش شبکه‌ی بولتزنن در چارچوب روش اشباع نسبی شبیه‌سازی می‌شود. برای انجام مدل‌سازی از برنامه‌ی رایانه‌ای توسعه‌یافته توسط هنری و سیدی حسینی‌نیا [۱۶] استفاده گردید که این برنامه پیش‌تر در همبستگی با روش اجزای مجزا^۱ برای مدل‌سازی فرسایش ذرات جامد و تولید ماسه در دیواره‌های چاه‌های نفت بکار رفته است. مبانی محاسباتی روش شبکه‌ی بولتزنن و روش اشباع نسبی بطور کامل در پژوهش هنری و سیدی حسینی‌نیا [۱۶] توضیح داده شده است.



شکل ۱. نمایش (الف) هندسه‌ی مدل عددی، مرزهای مدل و موقعیت قرارگیری محیط متخلخل (مربع آبی هاشورخورده)، (ب) ابعاد محیط متخلخل و نحوه‌ی شبکه‌بندی آن، (ج) سلول محاسباتی یک گره شبکه و نحوه‌ی محاسبه‌ی نسبت جامد در هر سلول با تخلخل معلوم (n)

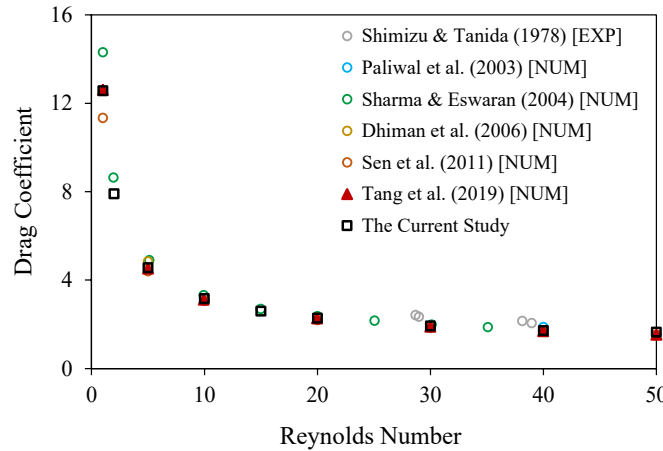
۳. نتایج مدل‌سازی: ضریب پسا

برای اطمینان از مناسب بودن هندسه‌ی مدل و مقدار پارامترهای انتخاب شده، تغییرات ضریب پسا استوانه‌ی مربعی جامد (ناتراوا) برای مقادیر مختلف عدد رینولدز محاسبه شده و با نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی پیشین مقایسه گردید. ضریب پسا مجموعه بصورت زیر تعریف می‌شود:

¹ discrete element method

$$C_D = \frac{F_D \cdot \hat{x}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 D} \quad (3)$$

در رابطه‌ی ۳، F_D نیروی پسا کل وارد بر محیط متخلخل، \hat{x} بردار بیکه در راستای افق (همراستا با جهت جریان) و U_∞ سرعت بالادست است. نتایج مقایسه‌ی ضرایب پسا در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق این شکل، ضرایب بدست آمده انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی [۱۷] و عددی [۳، ۲۱-۱۸] در محدوده‌ی اعداد رینولدز یک تا ۵۰ دارد. در نتیجه، دقت مدل عددی بکار رفته تأیید گردید.

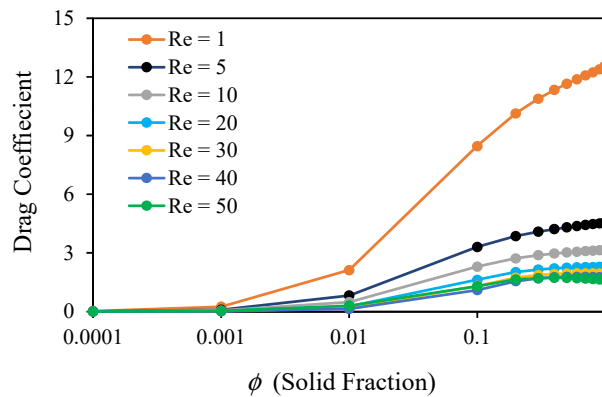


شکل ۲. تغییرات مقدار ضریب پسا محیط ناتراوا (بدون تخلخل) نسبت به عدد رینولدز در مقایسه با نتایج سایر مطالعات

برای مطالعه‌ی جریان سیال از درون و پیرامون محیط متخلخل، تعداد ۱۱۹ شبیه‌سازی عددی با اعداد رینولدز گوناگون (از یک تا ۵۰) و مقادیر مختلف نسبت جامد (از ۰/۰۰۱ تا یک) انجام شد. همانطور که بیان شد، برخلاف ضرایب نفوذپذیری استفاده شده در مطالعات محیط متخلخل به روش بزرگ‌مقیاس، نسبت جامد محیط متخلخل به آسانی و بدون استفاده از روابط تجربی براساس مقدار تخلخل^۱ (پوکی) محیط متخلخل قابل محاسبه است:

$$\phi = 1 - n = 1 - \frac{V_v}{V} = \frac{V_s}{V} \quad (4)$$

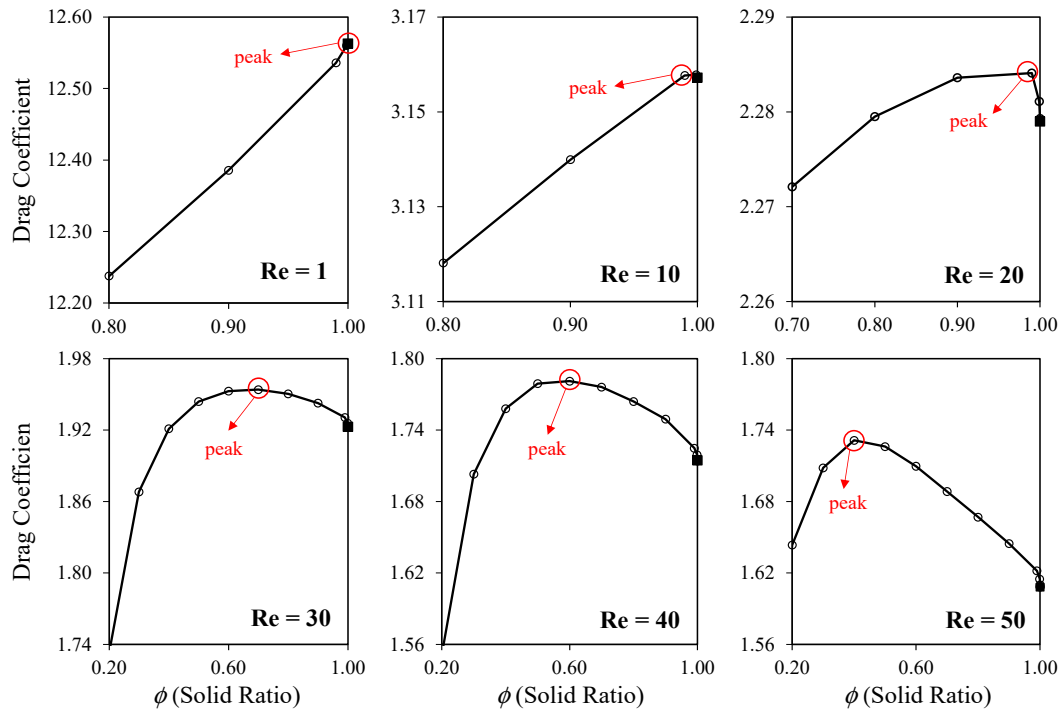
در رابطه‌ی ۴، n تخلخل محیط متخلخل، V حجم کل محیط، V_v حجم حفرات محیط و V_s حجم بخش جامد آن است. نتایج مدل‌های عددی پژوهش حاضر، برای ضرایب پسا در برابر نسبت جامد محیط متخلخل در شکل ۳ ارائه شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، با افزایش عدد رینولدز و همچنین با کاهش نسبت جامد محیط متخلخل، بطور کلی، مقدار ضریب پسا کاهش می‌یابد. این روند مشابه با نتایج گزارش شده در مطالعات پیشین [۱۳، ۱۴، ۲۲] است. همچنین، مشابه با نتیجه‌ی بدست آمده در مطالعه‌ی عددی نویمر و همکاران [۱۳]، در مقادیر بسیار کم نسبت جامد محیط متخلخل (معادل با مقادیر بالای تخلخل و ضریب نفوذپذیری)، ضریب پسا بصورت مجانب به صفر میل می‌کند.



شکل ۳. مقدار ضریب پسا محیط متخلخل با مقادیر مختلف تخلخل در اعداد رینولدز گوناگون

¹ porosity

با نگاه دقیق‌تر به روند تغییرات ضریب پسا با نسبت جامد مشخص می‌شود که در برخی موارد، با افزایش تخلخل (کاهش نسبت جامد) محیط، مقدار ضریب پسا تا حدودی افزایش می‌یابد. برای تحقیق این موضوع، در شکل ۴ بخش‌هایی از نمودارهای شکل ۳ برای اعداد رینولدز متفاوت ارائه گردید. در هر نمودار این شکل، مقدار بیشینه ضریب پسا و محل وقوع آن مشخص شده است. همانطور که دیده می‌شود، بجز جریان با عدد رینولدز یک، در سایر موارد قله نمودار در محلی غیر از $\phi = 1$ رخ می‌دهد. به بیان دیگر، استوانه‌ی مربعی در اعداد رینولدز بالا، در برخی مقادیر تخلخل مقاومت بیشتری در برابر جریان نسبت به حالت جامد (بدون تخلخل) نشان می‌دهد. افزایش ضریب پسا محیط متخلخل نسبت به حالت جامد در برخی مطالعات پیشین نیز دیده شده [۳، ۲۳، ۲۴] و دلیل آن رفتار پیچیده دنباله^۱ی جریان عبوری از محیط متخلخل عنوان شده است [۲۴]. همچنین براساس نمودارهای ارائه شده در شکل ۴، مشابه با نتیجه‌ی بدست آمده در مطالعه‌ی تنگ و همکاران [۳]، با افزایش عدد رینولدز مقدار بیشینه ضریب پسا در نسبت‌های جامد کوچک‌تری رخ می‌دهد.

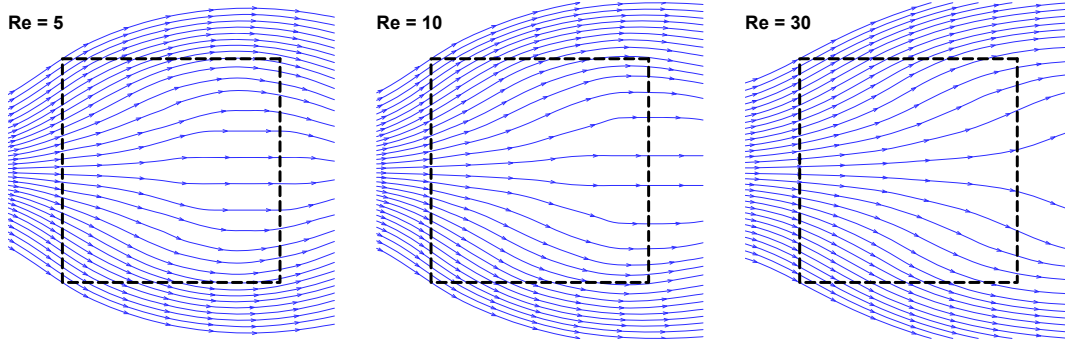


شکل ۴. تغییرات مقدار ضریب پسا برای اعداد رینولدز متفاوت و نمایش محل وقوع مقدار بیشینه

۴. نتایج مدل‌سازی: خطوط جریان از محیط متخلخل

شکل ۵ توزیع خطوط جریان وارد شونده به محیط متخلخل (مربع خط‌چین) با نسبت جامد $\phi = 0.3$ را برای اعداد رینولدز 5، 10، 30 نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش عدد رینولدز تعداد خطوط جریان گذرنده از انتهای محیط متخلخل کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، در اعداد رینولدز بالاتر، خطوط جریانی بیشتری از لبه‌های بالا و پایین محیط متخلخل خارج می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی افزایش مقاومت محیط متخلخل در برابر جریان سیال است. این افزایش مقاومت در برابر جریان را می‌توان نشانه‌ی کاهش نفوذپذیری محیط متخلخل در اعداد رینولدز بالا دانست که در تطابق با نتیجه‌ی ارائه شده در برخی مطالعات پیشین است [۲۵-۲۸]. باید توجه نمود که نحوه‌ی تأثیرگذاری تغییرات عدد رینولدز بر ضریب نفوذپذیری محیط متخلخل بیش از هر چیز تابع ساختار ریزمقیاس محیط متخلخل است [۲۹]. از این رو، بررسی تأثیر تغییر عدد رینولدز بر نفوذپذیری محیط متخلخل نیازمند مطالعات بیشتری است. با این وجود، مدل ارائه شده بازتوزیع جریان سیال در داخل محیط متخلخل را تحت تأثیر تغییرات عدد رینولدز بخوبی شبیه‌سازی می‌نماید.

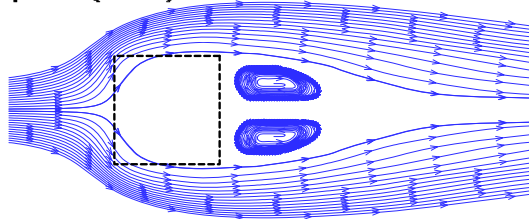
¹ wake



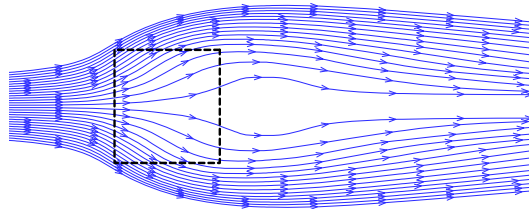
شکل ۵. خطوط جریان در محیط متخلخل با نسبت جامد $\phi = 0.3$ و اعداد رینولدز گوناگون

شکل ۶ توزیع خطوط جریان درون و پیرامون محیط متخلخل (مربع خط‌چین) با نسبت‌های جامد گوناگون را در عدد رینولدز $Re = 20$ نشان می‌دهد. با کاهش نسبت جامد (با افزایش تخلخل) محیط متخلخل، تعداد خطوط جریان گذرنده از محیط بیشتر شده و در نتیجه، ضریب نفوذپذیری افزایش می‌یابد [۲۵، ۲۷، ۲۸]. همچنین، در نسبت‌های جامد بالا، با توجه به شباهت محیط متخلخل با محیط کاملاً جامد (ناتراوا)، دنباله‌های چرخان در پشت محیط متخلخل تشکیل می‌شود. در تخلخل‌های بالاتر (نسبت‌های جامد کمتر)، به تدریج دنباله‌ها از بین رفته و خطوط جریان حالت یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد. مطالعات دیگری نیز بطور مشابه نتیجه گرفتند که افزایش نفوذپذیری محیط متخلخل (متناظر با افزایش تخلخل محیط یا کاهش نسبت جامد آن) بیش از حد مشخص سبب حذف دنباله‌های چرخشی می‌شود [۶، ۱۳-۱۵]. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود، مطابق انتظار، در مقادیر بسیار زیاد تخلخل، جریان بصورت آرام و با انحراف جزئی از محیط متخلخل عبور می‌کند.

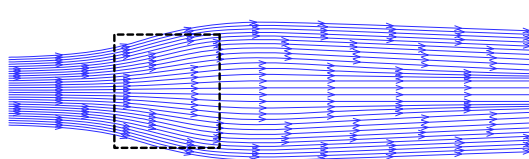
$\phi = 0.9$ ($n = 0.1$)



$\phi = 0.3$ ($n = 0.7$)



$\phi = 0.1$ ($n = 0.9$)



شکل ۶. خطوط جریان در محیط متخلخل با عدد رینولدز $Re = 20$ و نسبت‌های جامد گوناگون



۵. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روش اشباع نسبی، از روش‌های مدل‌سازی اندرکنش سیال و ذرات جامد در روش شبکه‌ی بولتزمن، برای اولین بار در تحلیل جریان در محیط متخلخل بکار گرفته شد. با استفاده از این روش، می‌توان محیط متخلخل را بدون نیاز به مدل‌سازی ریزمقیاس اجزای آن شبیه‌سازی نمود. از سوی دیگر، در روش بکار رفته در مطالعه‌ی حاضر، برخلاف سایر مدل‌سازی‌های بزرگ‌مقیاس محیط متخلخل نیازی به تعیین مقدار نفوذپذیری نبوده و مدل‌سازی تنها با دانستن مقدار تخلخل، و با بطور معادل، مقدار نسبت جامد محیط متخلخل قابل انجام است. نتایج زیر برای این پژوهش قابل بیان است:

- علی‌رغم هزینه‌ی محاسباتی نسبتاً کم، دقت کیفی نتایج بدست آمده از روش اشباع نسبی تأیید شده و روند تغییرات برخی پارامترها مانند ضریب پسار (درگ)، نفوذپذیری و توزیع خطوط جریان درون و پیرامون محیط متخلخل با نتایج مطالعات پیشین قابل مقایسه است.
- در اعداد رینولدز بزرگ‌تر، مقدار ضریب پسار محیط با تخلخل مشخص ممکن است بیشتر از محیط کاملاً جامد (ناتراوا) باشد. با افزایش مقدار عدد رینولدز، ضریب پسار در تخلخل‌های بزرگ‌تری به مقدار بیشینه‌ی خود می‌رسد.
- با افزایش عدد رینولدز، جریان خروجی از لبه‌های بالا و پایین محیط متخلخل افزایش یافته و محیط متخلخل مقاومت بیشتری در برابر جریان سیال می‌کند. همچنین تحت تأثیر تغییرات عدد رینولدز، خطوط جریان سیال در داخل محیط متخلخل بازتوزیع می‌شود.
- با افزایش مقدار تخلخل، تعداد خطوط جریان گذرنده از محیط متخلخل و در نتیجه مقدار ضریب نفوذپذیری آن افزایش می‌یابد. همچنین، در تخلخل‌های اندک، محیط متخلخل مشابه محیط ناتراوا عمل کرده و در اعداد رینولدز بالا، دنباله‌های چرخان در پشت محیط متخلخل تشکیل می‌شود. با افزایش مقدار تخلخل محیط این دنباله‌ها از بین رفته و خطوط جریان حالت یکنواخت‌تری به خود می‌گیرد.

۶. مراجع

1. Kiørboe, T., H. Ploug, and U.H. Thygesen, Fluid motion and solute distribution around sinking aggregates. I. Small-scale fluxes and heterogeneity of nutrients in the pelagic environment. *Marine Ecology Progress Series*, 2001. 211: p. 1-13.
2. Choi, H.G. and D.D. Joseph, Fluidization by lift of 300 circular particles in plane Poiseuille flow by direct numerical simulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001. 438: p. 101-128.
3. Tang, T., et al., Investigation of drag properties for flow through and around square arrays of cylinders at low Reynolds numbers. *Chemical Engineering Science*, 2019. 199: p. 285-301.
4. Vainshtein, P., M. Shapiro, and C. Gutfinger, Mobility of permeable aggregates: effects of shape and porosity. *Journal of Aerosol Science*, 2004. 35(3): p. 383-404.
5. Happel, J. and H. Brenner, *Low Reynolds number hydrodynamics: with special applications to particulate media*. Vol. 1. 2012: Springer Science & Business Media.
6. Cummins, C., et al., The effect of permeability on the flow past permeable disks at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 2017. 29(9): p. 097103.
7. Ellington, C.P., *Wing Mechanics and Take-Off Preparation of Thrips (Thysanoptera)*. *The Journal of Experimental Biology*, 1980. 85(1): p. 129-136.
8. Panah, M. and F. Blanchette, Simulating flow over and through porous media with application to erosion of particulate deposits. *Computers & Fluids*, 2018. 166: p. 9-23.
9. Browne, C.A., A. Shih, and S.S. Datta, Pore-Scale Flow Characterization of Polymer Solutions in Microfluidic Porous Media. *Small*, 2020. 16(9): p. 1903944.
10. Drummond, J.E. and M.I. Tahir, Laminar viscous flow through regular arrays of parallel solid cylinders. *International Journal of Multiphase Flow*, 1984. 10(5): p. 515-540.
11. Tamada, K. and H. Fujikawa, The Steady Two-Dimensional Flow of Viscous Fluid at Low Reynolds Numbers Passing Through an Infinite Row of Equal Parallel Circular Cylinders. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, 1957. 10(4): p. 425-432.
12. Masliyah, J.H. and M. Polikar, Terminal velocity of porous spheres. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1980. 58(3): p. 299-302.



13. Noymer, P.D. and L.R. Glicksman, Cluster motion and particle-convective heat transfer at the wall of a circulating fluidized bed. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998. 41(1): p. 147-158.
14. Bhattacharyya, S., S. Dhinakaran, and A. Khalili, Fluid motion around and through a porous cylinder. *Chemical Engineering Science*, 2006. 61(13): p. 4451-4461.
15. Yu, P., et al., Steady flow around and through a permeable circular cylinder. *Computers & Fluids*, 2011. 42(1): p. 1-12.
16. Honari, S. and E. Seyedi Hosseininia, Particulate Modeling of Sand Production Using Coupled DEM-LBM. *Energies*, 2021. 14(4): p. 906.
17. Shimizu, Y. and Y. Tanida, Fluid forces acting on cylinders of rectangular cross section. *JSME*, 1978. 44(384): p. 2699-2706.
18. Paliwal, B., et al., Power law fluid flow past a square cylinder: momentum and heat transfer characteristics. *Chemical Engineering Science*, 2003. 58(23): p. 5315-5329.
19. Sharma, A. and V. Eswaran, HEAT AND FLUID FLOW ACROSS A SQUARE CYLINDER IN THE TWO-DIMENSIONAL LAMINAR FLOW REGIME. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2004. 45(3): p. 247-269.
20. Dhiman, A.K., et al., Effects of Reynolds and Prandtl Numbers on Heat Transfer Across a Square Cylinder in the Steady Flow Regime. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2006. 49(7): p. 717-731.
21. Sen, S., S. Mittal, and G. Biswas, Flow past a square cylinder at low Reynolds numbers. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2011. 67(9): p. 1160-1174.
22. Das, S., N.G. Deen, and J.A.M. Kuipers, Immersed boundary method (IBM) based direct numerical simulation of open-cell solid foams: Hydrodynamics. *AIChE Journal*, 2017. 63(3): p. 1152-1173.
23. Chang, K. and G. Constantinescu, Numerical investigation of flow and turbulence structure through and around a circular array of rigid cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015. 776: p. 161-199.
24. Taddei, S., C. Manes, and B. Ganapathisubramani, Characterisation of drag and wake properties of canopy patches immersed in turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016. 798: p. 27-49.
25. Jones, B.D. and Y.T. Feng, Effect of image scaling and segmentation in digital rock characterisation. *Computational Particle Mechanics*, 2016. 3(2): p. 201-213.
26. Sukop, M.C., et al., Evaluation of permeability and non-Darcy flow in vuggy macroporous limestone aquifer samples with lattice Boltzmann methods. *Water Resources Research*, 2013. 49(1): p. 216-230.
27. Lee, S.L. and J.H. Yang, Modeling of Darcy-Forchheimer drag for fluid flow across a bank of circular cylinders. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1997. 40(13): p. 3149-3155.
28. Rocha, R.P.A. and M.E. Cruz, Calculation of the permeability and apparent permeability of three-dimensional porous media. *Transport in Porous Media*, 2010. 83(2): p. 349-373.
29. Yang, Z., et al., Reynolds number-dependent permeability of wastewater sludge flocs. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 2007. 38(2): p. 135-141.

شماره: 12ICCE/GE-04-885

تاریخ: 23 تیر 1400

دوازدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران
۲۱ الی ۲۳ تیرماه ۱۴۰۰ دانشگاه فردوسی مشهد



گواهی ارائه مقاله

بدین وسیله گواهی می شود که مقاله با عنوان:

**مدل سازی عددی جریان عبوری از درون و پیرامون محیط متخلخل در اعداد رینولدز پایین به
روش اشباع نسبی**

تهیه شده توسط:

سیاوش هنری و سید احسان سیدی حسینی نیا

در دوازدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران که در تاریخ ۲۱ الی ۲۳ تیرماه ۱۴۰۰ در دانشگاه فردوسی مشهد برگزار گردید، پذیرش و ارائه شده است.

دکتر جعفر بلوری بزاز
دبیر علمی کنگره

دکتر احمد شوشتری
دبیر کنگره

این گواهی به صورت الکترونیکی صادر شده است.

جهت اعتبار سنجی گواهی، از لینک های زیر استفاده کنید یا

QR Code گواهی را اسکن کنید.

<https://certificate.confdirector.com>

<https://certificate.12icce.ir>



SN: 8165513949

12th International Congress on Civil Engineering

12-14 July 2021 | Ferdowsi University of Mashhad

Serial Number: 8165513949