

Numerical study of the effect of gradual clogging on the function of permeable concrete

Rasoul Soufi Noughabi¹, Ali Ebrahim Zadeh², Fereydoun Khosravi^{3*}

1- Ph.D. candidate, Engineering faculty, Shahid Bahonar university, Kerman, Iran

2-Researcher, Civil engineering faculty, Emam Hossein university, Tehran, Iran

3- Associate professor, Civil engineering faculty, Emam Hossein university, Tehran, Iran

ABSTRACT

Permeable concrete, which has recently been used as a new flooring in pavements, parking lots, roadways, and shoulders, has played an important role in surface runoff control, designed storage, avoiding surface pollution spread, and even noise pollution reduction. Researchers in this field have noted clogging of the pores of permeable concrete as one of the most significant challenges in the application of such pavements, significantly reducing their efficiency. Since there seems to be no numerical work studying the effect of gradual clogging of permeable concrete on the velocity field, tortuosity, or how pollutant is transported and dispersed, the effect of gradual clogging on these parameters is explored in this study. Two-dimensional geometry was created as a non-clogging permeable concrete that gradually got clogged as the geometry was changed in five levels. Simulations for the five mentioned models were carried out by discretizing the computational domain as well as the equations of momentum and mass transfer using the computational fluid dynamics method. The results show that as the level of clogging increases, the porosity of the permeable concrete decreases, and the velocity field distribution, tortuosity, and pollutant concentration distribution in the fluid flow change in such a way that low velocity areas are formed and increased. Tortuosity, as well as the entrapment and storage of pollutants within the concrete, expand. The findings also show that as clogging grows, permeable concrete becomes more susceptible to full blockage, as does the rate of clogging, and its performance declines dramatically.

ARTICLE INFO

Receive Date: 09 May 2022

Revise Date: 22 November 2022

Accept Date: 31 August 2023

Keywords:

permeable concrete
fluid flow simulation
solute transport
clogging of permeable concrete
pollutant spreading

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.336182.2768>

*Corresponding author: Fereydoun Khosravi
Email address: fr.khosravi@aut.ac.ir

مطالعه عددی اثر گرفتگی تدریجی در بتن نفوذپذیر بر الگوی جریان سیال و پخش آلودگی حل شده در آن

رسول صوفی نوقابی^۱، علی ابراهیمزاده^۲، فریدون خسروی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

۲- پژوهشگر، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر، بتن نفوذپذیر بعنوان روسازی جدید در پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، راه‌ها و شانه جاده‌ها در کنترل روان‌آب، جمع‌آوری هدفمند آن و همچنین جلوگیری از گسترش آلودگی‌های سطحی و حتی کاهش آلودگی صوتی نقش قابل توجهی داشته‌است. از مهمترین چالش‌هایی که در کاربرد اینگونه روسازی‌ها باعث تغییر عملکرد و کاهش بازدهی آن شده که کمتر مورد توجه قرار گرفته، ایجاد گرفتگی در منافذ بتن نفوذپذیر به سبب وجود آلودگی‌ها در روان‌آب‌ها است. ایجاد گرفتگی در بتن نفوذپذیر به شکل قابل ملاحظه‌ای الگوی جریان و همچنین نحوه پخش مواد حل شده در آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. با وجود اهمیت فراوان این موضوع در شناخت عمیق نحوه عملکرد این نوع بتن تاکنون مطالعه جامعی برای بررسی اثر گرفتگی تدریجی بتن نفوذپذیر بر الگوی جریان و میدان سرعت، تغییر پیچ و خم مسیر عبور جریان^۱ و همچنین چگونگی پخش آلودگی انجام نشده است لذا در این مطالعه اثر ایجاد گرفتگی تدریجی بر عوامل مذکور مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این هدف هندسه‌ای دوبعدی بعنوان مدلی از بتن نفوذپذیر در حالت بدون گرفتگی ایجاد شد و با تغییر هندسه در پنج مرحله گرفتگی تدریجی بتن نفوذپذیر مدل‌سازی شد. با گسسته‌سازی دامنه محاسباتی و معادلات انتقال مومنتم و انتقال جرم به روش دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی برای مدل‌های مذکور انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش تدریجی گرفتگی و کاهش تخلخل بتن نفوذپذیر، توزیع میدان سرعت، پیچ و خم مسیر و همچنین توزیع غلظت آلودگی در جریان سیال به نحوی تغییر کرد که سبب ایجاد و همچنین افزایش نواحی کم سرعت، افزایش طول پیچ و خم مسیر و همچنین به‌دام افتادن و تجمع آلودگی در داخل بتن نفوذپذیر شد. علاوه بر این، نتایج نشان داد با افزایش گرفتگی، پتانسیل بتن نفوذپذیر برای انسداد کامل افزایش یافته و عملکرد آن را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد.

کلمات کلیدی: بتن نفوذپذیر، شبیه‌سازی جریان سیال، گرفتگی در بتن نفوذپذیر، پخش آلودگی، کاهش عملکرد بتن

| شناسه دیجیتال: | | سابقه مقاله: | | | | |
|---------------------------------------|---|--------------|---------------|------------------------------------|------------|------------|
| doi: | https://doi.org/10.22065/jsce.2023.336182.2768 | چاپ | انتشار آنلاین | پذیرش | بازنگری | دریافت |
| | 10.22065/jsce.2023.336182.2768 | ۱۴۰۳/۰۲/۳۱ | ۱۴۰۲/۰۶/۰۹ | ۱۴۰۲/۰۶/۰۹ | ۱۴۰۱/۰۵/۰۱ | ۱۴۰۲/۰۲/۱۹ |
| فریدون خسروی fr.khosravi@aut.ac.ir | | | | *نویسنده مسئول: پست الکترونیکی: | | |

¹ Tortuosity

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش تراکم جمعیت در برخی مناطق شهری، بتن نفوذپذیر که تحت عنوان بتن متخلخل نیز شناخته می‌شود، در روسازی پیاده‌روها، پارکینگ‌ها، جاده‌ها و شانه جاده‌ها خصوصاً در مناطقی که بارندگی سالانه بالایی دارند، کاربردهای فراوانی یافته است. مزیت این نوع بتن نسبت به بتن‌های رایج در قابلیت انتقال آب به سطوح زیرین سطح زمین است. این نوع بتن می‌تواند با فضاهای متخلخل به هم پیوسته‌ای^۲ که دارد قابلیت عبور جریان سیال داشته و لذا از تجمع روان‌آب و تشکیل سیلاب‌های مخرب و در پی آن گسترش آلودگی‌های سطحی پیشگیری نماید. علاوه بر این، کاهش آلودگی‌های صوتی در مناطق پرتراکم شهری و نیز سایر مشکلات زیست محیطی نیز جلوگیری نماید [۱]. علاوه بر این از نگاه مدیریت منابع آب، بتن نفوذپذیر با جلوگیری از تبخیر روان‌آب و همچنین تصفیه و هدایت هدفمند آن به مخازن جمع‌آوری یا منابع زیرزمینی، نقشی کلیدی در استفاده بهینه از روان‌آب را دارد. در این نوع بتن از مصالح ریزدانه استفاده نمی‌شود و مصالح درشت دانه با ملات سیمان مخلوط می‌گردد تا علاوه بر اینکه مصالح، به هم چسبیده و استقامت مناسبی را ایجاد کند، در عین حال فضای خالی بین درشت دانه‌ها برای عبور جریان ایجاد شود. یکی از مهمترین مواردی که تاکنون در کاربرد بتن‌های نفوذپذیر در برخی مناطق مشکل‌ساز بوده و گاهی از میزان عملکرد آن می‌کاهد، ایجاد گرفتگی مسیر جریان آب در بتن نفوذپذیر بوده که ممکن است به سبب وجود ذرات جامد و گل‌ولایی که در روان‌آب وجود دارد اتفاق بیفتد. پاکسازی مسیر جریان آب در این نوع بتن با استفاده از تجهیزات مکش ذرات جامد یا تمیزکاری بوسیله فشار آب، هزینه نگهداری از این نوع روسازی را بالا برده و حتی گاهی با صرف این هزینه بازهم مقدار قابل توجهی از عملکرد آن قابل بازیابی نخواهد بود [۲]. به همین دلیل شناخت عمیق مشکل گرفتگی در بتن نفوذپذیر خصوصاً در مقیاس‌های کوچک در ابعاد حفره‌های بتن نفوذپذیر، روزبه‌روز توجه محققان این حوزه را بیشتر به خود جلب کرده است.

با توجه به اینکه بتن نفوذپذیر در دهه اخیر کاربردهای فراوانی یافته است لذا در چند سال گذشته تحقیقاتی هرچند محدود برای مطالعه آن انجام شده است. تحقیقات اولیه صورت گرفته به مطالعه خواص مکانیکی آن پرداخته است که می‌توان به عنوان نمونه به تحقیقات مراجع [۱]-[۳] اشاره نمود. در این تحقیقات که عموماً به خواص مکانیکی بتن نفوذپذیر و همچنین روش‌هایی برای افزایش استحکام مکانیکی آن پرداخته شده است [۳] با پیشرفت تجهیزات و روش‌های تصویربرداری [۴] به سمت بررسی جزئیات ساختاری دقیق‌تر گرایش داشته است. افزایش مقاومت و استحکام بتن نفوذپذیر با تغییر سایز دانه‌ها، نسبت اختلاط بتن و همچنین نقش افزودنی‌ها در بتن نفوذپذیر از جمله سایر تحقیقات صورت گرفته در خصوص بررسی مکانیکی این نوع بتن است [۵] و [۶]. یکی از چالش‌های کاربرد بتن نفوذپذیر ایجاد گرفتگی فضاهای خالی داخل بتن نفوذپذیر است که از کارآمدی آن به شدت می‌کاهد. در تحقیقات [۶] و [۷] به کمک روش‌های تصویربرداری نمونه‌ای استوانه‌ای شکل از بتن نفوذپذیر برداشت شده و از تصاویر بازسازی شده آن مقدار گرفتگی ایجاد شده مورد مطالعه قرار گرفت و رابطه‌ای برای میزان گرفتگی و میزان تخلخل ارائه شد در حالی که این مطالعه محدود به همین مسئله بوده و شرایط جریان سیال در آن مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق مروری نیز به تمامی سازوکارهای ایجاد گرفتگی در بتن نفوذپذیر پرداخته است که می‌توان مهمترین آن را مقدار پیچ و خم مسیر بیان نمود که هرچه مقدار پیچ و خم مسیر جریان سیال در بتن نفوذپذیر بیشتر باشد مقدار گرفتگی با هر سازوکاری افزایش می‌یابد. بخش دیگری از تحقیقات انجام شده در این موضوع به بررسی مسایل مربوط به عبور جریان سیال و همچنین عوامل تاثیرگذار بر جریان سیال در داخل بتن نفوذپذیر پرداخته است. در تحقیق [۸] نمونه‌ای سه‌بعدی از بتن نفوذپذیر توسط تصویربرداری برای شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفت که نشان داد با اعمال گرادیان فشاری یکسان، افزایش تخلخل به شدت مقدار نفوذپذیری را افزایش خواهد داد در صورتی که در این مطالعه با وجود هندسه سه‌بعدی که جزئیات زیادی از بتن نفوذپذیر را نشان می‌دهد اما جزئیات بیشتری از نحوه عبور جریان سیال مورد بررسی قرار نگرفت.

² Inter-connected

بررسی تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که عمده‌ی مطالعات نسبتاً محدود صورت گرفته برای بررسی بتن نفوذپذیر به دهه اخیر باز می‌گردد و تاکنون بیشتر تمرکز پژوهشگران این حوزه بر شناخت خواص مکانیکی و خواص کلی جریان سیال بوده است و مطالعات کافی در بررسی جزییات وابسته به جریان سیال در مقیاس حفره ۳ و خصوصاً اثر میزان گرفتگی بتن نفوذپذیر بر جریان سیال و انتقال آلودگی‌ها در آن انجام نشده است. افزایش روز افزون کاربرد بتن نفوذپذیر، چالش‌های جدیدی در کاربرد آن مطرح شده که یکی از مهمترین آن ایجاد گرفتگی در منافذ بتن نفوذپذیر است که به شدت کارایی آن در جمع‌آوری روان‌آب و کنترل پخش آلودگی موجود در آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد که تاکنون در تحقیقات گذشته به‌طور جامعی مورد بررسی قرار نگرفته است. در واقع در پژوهش‌های گذشته پاسخی برای چگونگی تغییر الگوی جریان سیال و همچنین تغییر نحوه پخش آلودگی‌های حل شده در آن بر اثر ایجاد گرفتگی در این نوع بتن وجود ندارد. در این مطالعه نحوه اثر گرفتگی بتن نفوذپذیر در عملکرد بتن آن بررسی شد، به این صورت که ابتدا یک مدل دوبعدی از یک نمونه بتن نفوذپذیر ایجاد شده و سپس با افزایش تدریجی گرفتگی در آن این موضوع مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در تمام این شبیه‌سازی‌ها، سرعت متوسط بین دانه‌ها ثابت بوده است تا کمیت‌های مورد بررسی از جمله توزیع سرعت محلی، مقدار آلاینده باقیمانده و غیره قابل مقایسه باشد. لذا به دلیل آن که هدف از این مطالعه بررسی و تحلیل چگونگی تغییر مسیر جریان سیال و همچنین چگونگی تغییر نحوه پخش آلاینده در داخل بتن نفوذپذیر بوده است، سرعت ورودی سیال به بتن متخلخل متناسب با میزان گرفتگی طوری تنظیم شده است که سرعت متوسط بین دانه‌ای در تمامی شبیه‌سازی‌ها ثابت بماند و بتوان کمیت‌های مذکور را مورد مقایسه قرار داد. با افزایش تدریجی گرفتگی و به تبع آن کاهش میزان تخلخل بتن نفوذپذیر، عوامل مهمی همچون توزیع میدان سرعت، پیچ و خم مسیر، میزان انباشتگی ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها در نواحی دچار گرفتگی و احتمالاً سایر عوامل تغییر می‌کند که روند گرفتگی بتن نفوذپذیر را سرعت بخشیده و به تبع آن کاهش شدید عملکرد آن را به دنبال خواهد داشت.

۲- معادلات حاکم و روش حل عددی

برای بررسی جریان سیال و انتقال جرم (آلودگی‌های محلول در آب) در فضای متخلخل در مقیاس حفره، دو روش شناخته شده وجود دارد: روش مدل‌سازی شبکه ای^۴ و روش مدل‌سازی مستقیم^۵. گرچه روش مدل‌سازی شبکه‌ای از لحاظ هزینه محاسباتی^۶ بسیار مورد توجه است اما در این روش بسیاری از جزییات مسئله به دلیل آن که هندسه فضای متخلخل با شبکه‌ای از حفره‌ها و گلوگاه‌هایی^۷ جایگزین می‌شود، از دست می‌رود. لذا با توجه به امکانات مدل‌سازی محاسباتی موجود می‌توان از روش دقیق‌تر مدل‌سازی مستقیم استفاده نمود. در این روش فضای خالی موجود در مدل بتن نفوذپذیر گسسته‌سازی شده و معادلات حاکم بر جریان سیال و انتقال جرم نیز بصورت گسسته شده به روش دینامیک سیالات محاسباتی^۸ برای آن به کار می‌رود. چنانچه فرض شود سیال از نوع نیوتنی و جریان سیال غیرقابل تراکم و هم دما باشد، معادلات بقاء جرم و بقاء مومنتوم را می‌توان بصورت زیر ساده نمود و برای بدست آوردن توزیع جریان سیال در بتن نفوذپذیر استفاده کرد.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \mathbf{E}) + \mathbf{f}_b \quad (2)$$

که در این معادلات \mathbf{U} سرعت، p فشار، μ ویسکوزیته سیال، ρ دانسیته سیال $\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$ است. همچنین مقدار نیروی حجمی وارده بر سیال \mathbf{f}_b معادل صفر در نظر گرفته می‌شود. در این شبیه‌سازی، قسمت اول معادله ۲ نیز به دلیل آن که فرض بر پایا بودن جریان سیال است صفر در نظر گرفته می‌شود. برای حل معادله‌ی انتقال آلودگی^۹ در جریان سیال، لازم است معادله ۳ نیز گسسته‌سازی شده و در آن از

³ Pore-scale

⁴ Network modelling

⁵ Direct numerical modelling

⁶ Computational cost

⁷ Pore and throat

⁸ Computational fluid dynamic

⁹ Solute (passive scalar)

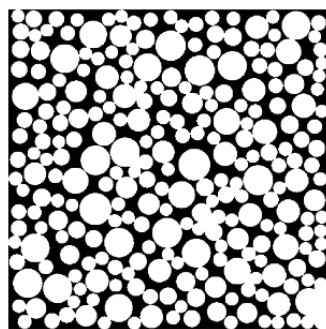
میدان سرعت به دست آمده از معادلات ۱ و ۲ استفاده شود. از آنجا که جریان سیال در این شبیه‌سازی بصورت پایا حل می‌شود لذا نیازی به حل معادله ۱ و ۲ بصورت همزمان در هر گام زمانی نیست و ابتدا معادلات ۱ و ۲ بصورت پایا حل شده و سپس برای حل غیرپایا، معادله ۳ در آن قرار داده می‌شود.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C - \nabla \cdot (D_m \nabla C) = 0 \quad (3)$$

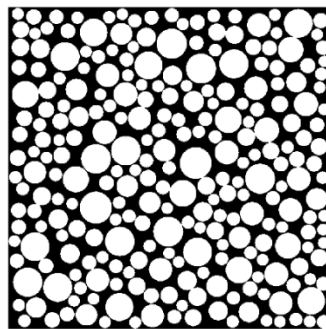
در این معادله C غلظت ناخالصی، \mathbf{u} سرعت موضعی سیال و D_m مقدار ضریب پخش ناخالصی در سیال است. ترم جابجایی معادلات ۱ و ۲ و ۳ با استفاده از روش درجه اول و صریح آپ ویند^{۱۰} و ترم دیفیوژن آن نیز به روش مرتبه دوم گوسی خطی اصلاح شده^{۱۱} گسسته‌سازی می‌شود. برای گسسته‌سازی ترم زمانی معادله غیرپایای ۳ نیز از روش مرتبه اول اویلر^{۱۲} استفاده شده است. برای جزئیات بیشتر معادلات حاکم بر جریان سیال و همچنین معادله انتقال آلودگی می‌توان به مرجع [۹] مراجعه نمود.

۲-۱- دامنه محاسباتی و گسسته‌سازی آن

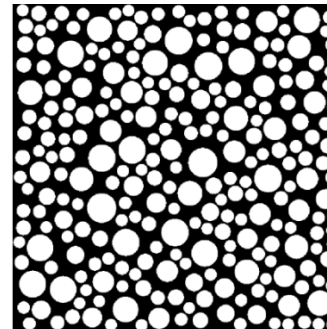
برای دستیابی به هدف ذکر شده در مقدمه برای انجام این مطالعه، ابتدا هندسه اولیه‌ای به عنوان نمونه‌ای از بتن نفوذپذیر در نظر گرفته شد. لذا هندسه‌ای دوبعدی با ابعاد کلی ۱۵ سانتی‌متر در ۱۵ سانتی‌متر و تعداد ۲۶۰ دانه با قطر تصادفی در بازه چهار تا ده میلی‌متر به کمک نرم‌افزار متلب ۱۳ ایجاد شد. برای مدل‌سازی ایجاد گرفتگی در مدل اولیه و با توجه به این‌که مدل اولیه بدون گرفتگی بوده و به صورت تدریجی بدون تغییر جانمایی دانه‌ها دچار افزایش قطر و به تبع آن ایجاد گرفتگی در مدل می‌شود. در مدل دوم ۳۰ درصد دانه‌ها بصورت تصادفی انتخاب شده، و افزایش قطر ۱۰ درصدی برای آن لحاظ شد. در مدل سوم، چهارم و پنجم عدد ۳۰ درصد به ترتیب به اعداد ۶۰، ۹۰ و ۱۰۰ تغییر کرد. در شکل ۱ سه مدل از پنج مدل ایجاد شده قابل مشاهده است که از سمت راست به چپ مقدار گرفتگی افزایش داشته است. لازم است بیان شود که مقدار افزایش قطر در تمام مدل‌ها فقط ۱۰ درصد بوده و تعداد دانه‌هایی که دچار این افزایش قطر شده‌اند از مقدار صفر تا ۱۰۰ درصد کل دانه‌ها بصورت تصادفی افزایش یافته است.



(پ)



(ب)



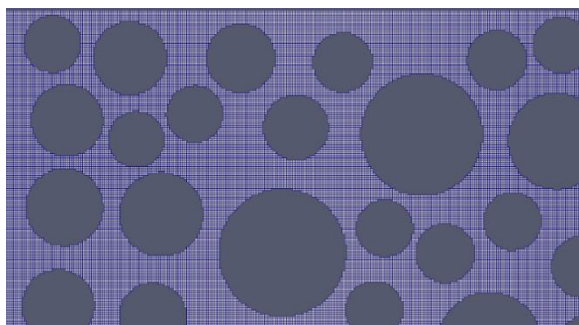
(الف)

¹⁰ Upwind scheme

¹¹ Gaussian linear corrected scheme

¹² Euler scheme

¹³ MATLAB



(ت)

شکل ۱) دامنه محاسباتی در نظر گرفته شده (الف) بدون افزایش قطر (ب) با افزایش قطر ۶۰ درصد و (پ) با افزایش قطر ۱۰۰ درصد تعداد دانه‌ها

(ت) نمونه‌ای از مش ساختاریافته ایجاد شده برای دامنه محاسباتی بدون گرفتگی در snappyHexMesh

برای شبیه‌سازی جریان سیال و انتقال جرم لازم است که فضای مابین دانه‌ها که با رنگ مشکی در شکل الف، ب و پ مشخص شده است و به صورت نمونه در شکل ۱) نمایش داده شده است مش‌بندی شود. برای بررسی عدم وابستگی شبیه‌سازی به تعداد مش ایجاد شده چند نمونه مدل‌سازی برای هندسه شماره یک با تعداد متفاوت مش شامل $2/56 \times 10^5$ ، $4/05 \times 10^5$ و $5/04 \times 10^5$ شبیه‌سازی شد. بدلیل آنکه تفاوت مقدار کمیت نفوذپذیری^{۱۴} محاسبه شده برای آن‌ها کمتر از پنج درصد بود، لذا در انتها تعداد مش اولیه برای شبیه‌سازی تمام مدل‌ها انتخاب شد. در این مقاله موارد شبیه‌سازی با گرفتگی صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۰۰ تحت عنوان شبیه‌سازی اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم یاد شده است.

۲-۲- شرایط مرزی و خواص فیزیکی

نوع شرایط مرزی در همه موارد شبیه‌سازی یکسان در نظر گرفته شده است و فقط سرعت ورودی به مدل‌ها به گونه‌ای افزایش یافت که سرعت بین دانه‌ای در تمامی مدل‌های با تخلخل متفاوت عدد ثابتی باقی بماند. در جدول شماره ۱ شرایط مرزی در نظر گرفته شده خلاصه شده است.

جدول ۱) مقادیر سرعت ورودی در تمامی مدل‌ها شبیه‌سازی شده

| مورد یک (بدون گرفتگی) | مورد دو (۳۰ درصد) | مورد سه (۶۰ درصد) | مورد چهار (۹۰ درصد) | مورد پنج (۱۰۰ درصد) | |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| 5×10^{-4} | $4/4 \times 10^{-4}$ | $4/1 \times 10^{-4}$ | $3/9 \times 10^{-4}$ | $3/8 \times 10^{-4}$ | سرعت ورودی (m/s) |

جدول ۲) نوع شرایط مرزی و خواص فیزیکی در نظر گرفته شده در تمامی مدل‌ها

| سرعت بین دانه‌ای (seepage flow velocity) | شرط مرزی خروجی | شرط مرزی طرفین | گرانروی دینامیکی (مترمربع بر ثانیه) | ضریب دیفیوژن (کیلوگرم بر متر ثانیه) |
|---|---------------------|----------------|--|--|
| ۰/۰۰۱۲ m/s | Fixed zero pressure | No flux | 10^{-3} | 10^{-9} |

¹⁴ Permeability

در این مدل‌سازی‌ها چگالی سیال و گرانش دینامیکی آن به ترتیب ۹۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب و 10^{-3} کیلوگرم بر متر ثانیه در نظر گرفته شد. و برای مدل‌سازی انتقال آلودگی نیز مقدار ضریب دیفیوژن معادل 10^{-9} مترمربع بر ثانیه در نظر گرفته شد.

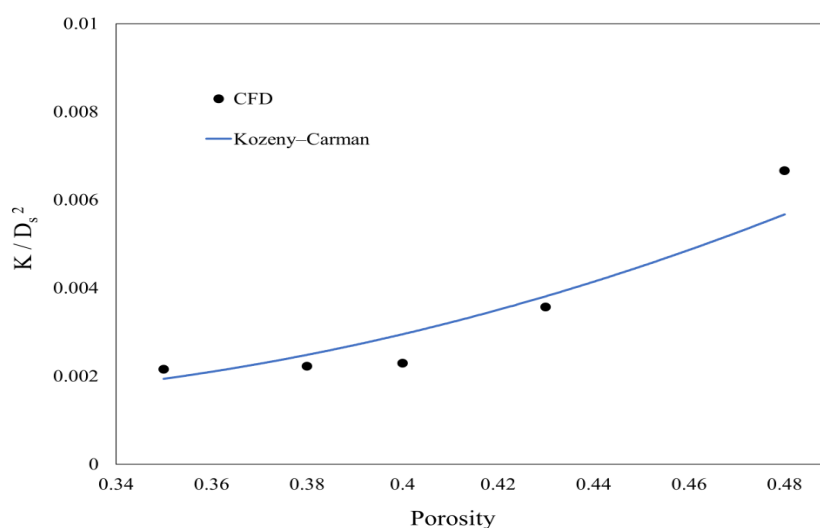
۳- اعتبارسنجی

برای مطالعه اثر ایجاد گرفتگی تدریجی بر عملکرد بتن نفوذپذیر، جریان غیرقابل تراکم و پایا در پنج مورد گرفتگی تدریجی که در بخش قبل معرفی شد، به کمک حلگر simpleFoam در کدمتن باز OpenFOAM انجام شد. قبل از آنکه به نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته پرداخته شود، لازم است برای اطمینان از صحت و اعتبار نتایج نهایی شبیه‌سازی تعدادی از پارامترهای بدست آمده مورد مقایسه با سایر روش‌های مطالعه در مراجع و پژوهش‌های سایر محققان قرار گیرد. در این مطالعه برای انجام این کار مقادیر نفوذپذیری هر پنج هندسه با مقدار تخلخل متفاوت حاصل از نتایج عددی و با کمک معادله شماره ۴، معادله دارسی^{۱۵} [۱۰]، مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این معادله مقدار دبی Q (m^3/s)، مقدار اختلاف فشار Δp (Pa)، مقدار طول نمونه L (m)، سطح مقطع عبور جریان A (m^2) و k مقدار نفوذپذیری (m^2) و μ مقدار گرانش دینامیکی (Pa.s) است. مقدار نفوذپذیری محاسبه شده از نتایج عددی بوسیله معادله ۴، با مقدار محاسبه شده از معادله شماره ۵، معادله کوزنی-کارمن^{۱۶} [۱۱]، که یکی از شناخته شده‌ترین معادلات تجربی محاسبه نفوذپذیری بوسیله عدد تخلخل ϵ است مقایسه می‌شود. در معادله ۵، علاوه بر عدد تخلخل نیاز است قطر میانگین ساوتر^{۱۷} D_s توسط معادله شماره ۶ [۱۲] محاسبه گردد. در این معادله قطر d_i هر دانه و n_i تعداد دانه‌های با قطر d_i است. لازم بذکر است یکی از دلایلی که ممکن است در اختلاف موجود بین نتایج معادله ۴ و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۲ موثر باشد، هندسه دوبعدی و همچنین دانه‌های کروی شکل هندسه شبیه‌سازی شده است.

$$Q = \frac{kA}{\mu L} \Delta p \quad (4)$$

$$k = \frac{D_s^2}{180} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \quad (5)$$

$$D_s = \frac{\sum_{i=1}^n n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2} \quad (6)$$



شکل ۲) مقایسه مقدار نفوذپذیری بدست آمده توسط شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی با مقدار بدست آمده از معادله تجربی ۵

¹⁵ Darcy Equation

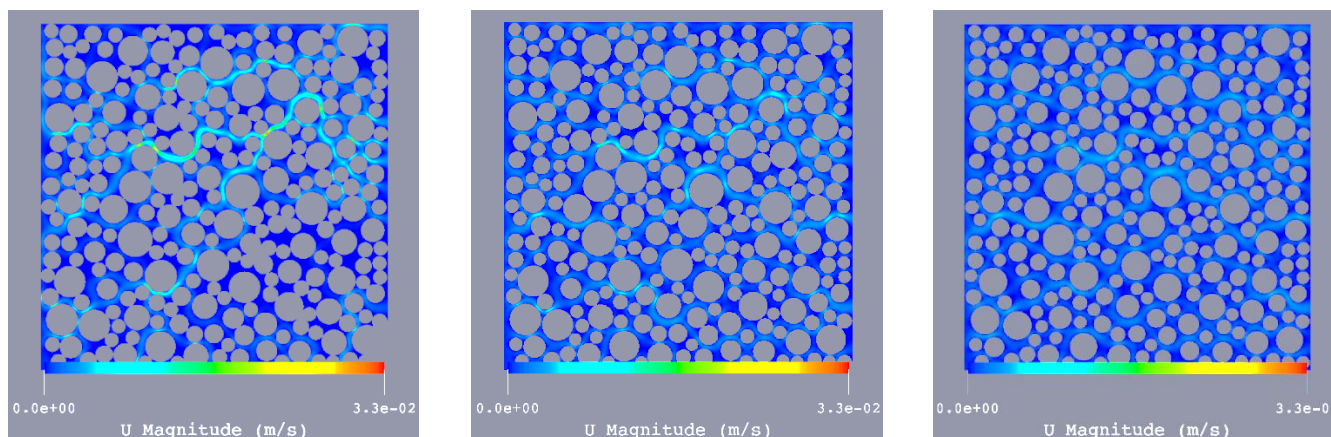
¹⁶ Kozeny-Carman equation

¹⁷ Sauter mean diameter

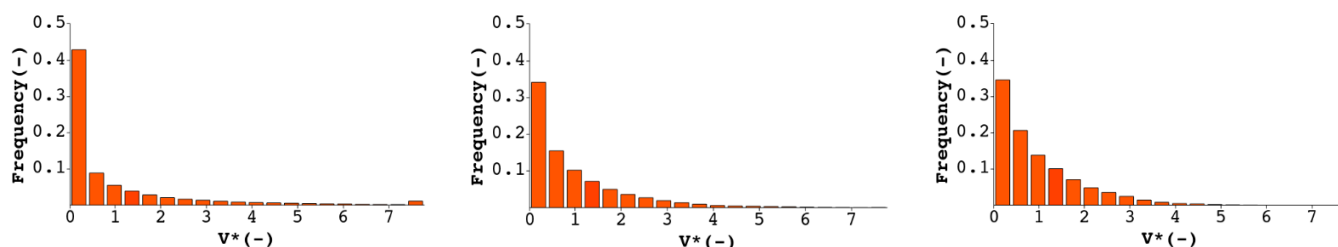
۴- نتایج و بحث

پس از مطالعه استقلال نتایج از تعداد مش و همچنین اعتبارسنجی شبیه‌سازی، نتایج جریان سیال و همچنین انتقال آلودگی آن به‌عنوان ماده‌ای محلول در آب، در این بخش ارائه می‌شود. در شکل ۳ الف کانتورهای توزیع سرعت به‌ترتیب برای سه مورد شبیه‌سازی یک، سه و پنج از راست به چپ نشان داده شده است. مشاهده شد با افزایش تدریجی گرفتگی از مورد یک تا مورد پنج، با وجود یکسان بودن سرعت متوسط بین دانه‌ای در کل مدل‌ها، بزرگی سرعت در برخی مسیرهای عبور جریان افزایش یافت. هرچه میزان این گرفتگی‌ها بیشتر بود، مقدار افزایش سرعت نیز نسبت به نمونه اولیه بیشتر شد و البته بدلیل قانون بقاء جرم، نواحی کم سرعت نیز در نمونه‌های با گرفتگی بیشتر افزایش یافت. در واقع به دلیل آنکه در اثر افزایش تدریجی گرفتگی فاصله بین دانه‌ها در برخی مسیرها کمتر شده و حتی ممکن است به هم متصل شوند و مسیر جریان را ببندد و بخش بیشتری از جریان سیال از مسیرهای باقیمانده که هنوز باز است، عبور کند. مشاهده می‌شود که بطور کلی الگوی کانتورهای سرعت مشابه است ولی دبی عبوری بیشتر به سمت مسیرهای بازتر هدایت می‌شود و سیال در کل بتن نفوذپذیر بصورت تقریباً یکنواختی که در بتن بدون گرفتگی جریان دارد، نخواهد بود.

در شکل ۲ ب هیستوگرام سرعت محلی در این سه مدل نشان داده شده است. چنانکه در مقایسه نمودارها از راست به چپ مشاهده می‌شود درحالی‌که سرعت متوسط بین دانه‌ای در کل دامنه یکسان بوده است ولی توزیع آن عوض شده است. هرچه مقدار گرفتگی مدل افزایش می‌یابد، با وجود آنکه سرعت‌های بالاتری در مدل پنج مشاهده می‌شود ولی تعداد نقاطی که این مقادیر بالای سرعت را دارند، بسیار کم بوده و عمده نقاط دارای سرعت‌های بسیار کم و نزدیک به صفر است. توزیع سرعت در مدل با گرفتگی کمتر نسبت به مدل با گرفتگی بیشتر، یکنواخت‌تر است. به عبارتی این نمودارها نشان می‌دهد که نواحی زیادی در مدلی که دارای بیشترین گرفتگی است، سیال تقریباً ساکن بوده و این خود می‌تواند باعث تنشینی ذرات و مواد معلق یا بعبارتی آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها در جریان سیال عبوری از آن باشد. در واقع می‌توان گفت گرفتگی موضعی در هر مکانی از مدل سبب بوجود آمدن نواحی کم سرعت می‌شود و این خود باعث گسترده‌گی گرفتگی می‌شود.



(الف)

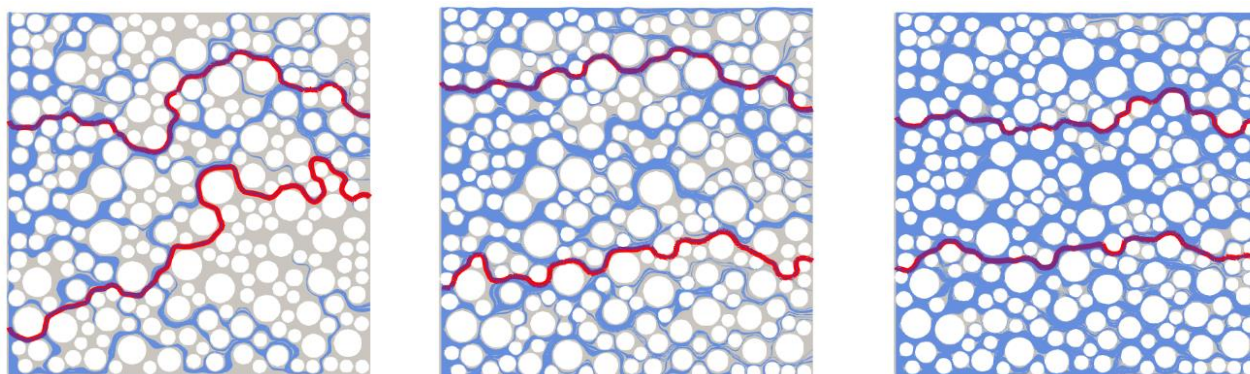


(ب)

شکل ۳) حل جریان سیال در سه مورد یک، سه و پنج (الف) کانتور سرعت جریان سیال با کاهش میزان تخلخل (افزایش گرفتگی) از راست به چپ. از یکنواختی مقادیر سرعت کاسته شده و عمده جریان از مسیرهای مشخصی عبور می‌کند (ب) هیستوگرام سرعت سیال با کاهش میزان تخلخل از راست به چپ. در هر مدل فراوانی مقادیر سرعت نسبت به تعداد کل نقاط همان مدل نرمال شده است. با افزایش گرفتگی عمده مقادیر سرعت به سمت سرعت‌های صفر میل می‌کند و از تعداد نقاط با سرعت بالا کاسته می‌شود.

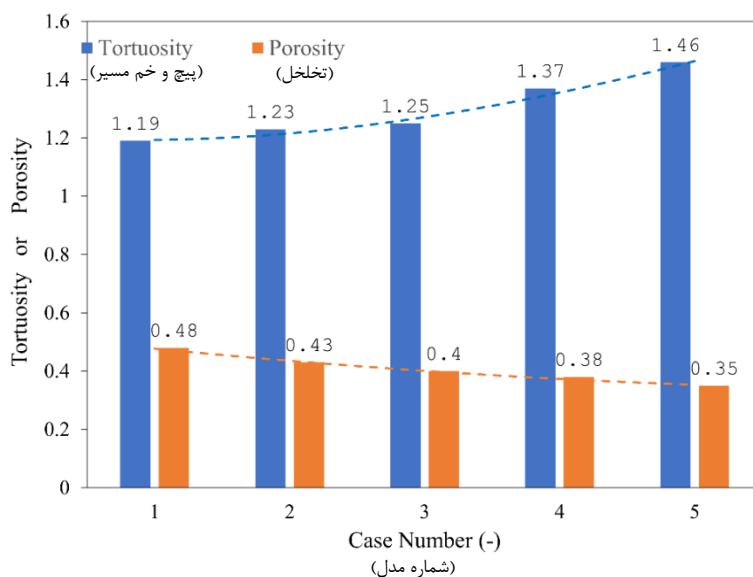
شکل ۴) تغییر مسیر جریان عبوری از مدل‌های مختلف تعداد مشخصی از خطوط جریان^{۱۸} را نشان می‌دهد که بدلیل پایا بودن شبیه‌سازی جریان با خطوط مسیر^{۱۹} یکسان است هرچه مقدار گرفتگی بیشتر شود، مسیر عبوری جریان بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد و به سمت مسیرهای بازتر برای خروج از مدل هدایت می‌شود. بدلیل این تغییر مسیری که در مدل‌های با گرفتگی بیشتر اتفاق می‌افتد، سیال مجبور می‌شود برای یافتن مسیری به سمت خروجی مسیر بسیار طولانی‌تری را طی کند که این نتیجه علاوه بر مشاهده در این تحقیق، توسط سایر محققان نیز گزارش شده است [۲]. به همین دلیل در این قسمت پیچ و خم^{۲۰} مسیر در هر مدل بررسی شده و در شکل ۳ دو نمونه از این مسیرها برای هرمدل با رنگ قرمز نشان داده شده است. در واقع می‌توان گفت هرچه طول مسیر سیال از ورودی تا خروجی مدل افزایش یابد، شانس بیشتری برای ته‌نشینی آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها در داخل بتن نفوذپذیر بیشتر می‌شود.

¹⁸ Streamline¹⁹ Path line²⁰ Tortuosity



شکل ۴) تعدادی از خطوط جریان سیال به رنگ آبی و دو نمونه از مسیر عبوری سیال برای هر مدل به رنگ قرمز. افزایش مقدار پیچ و خم مسیر با افزایش تدریجی مقدار گرفتگی در مدل‌ها از راست به چپ احتمال ته‌نشینی آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها را در مدل بیشتر می‌کند.

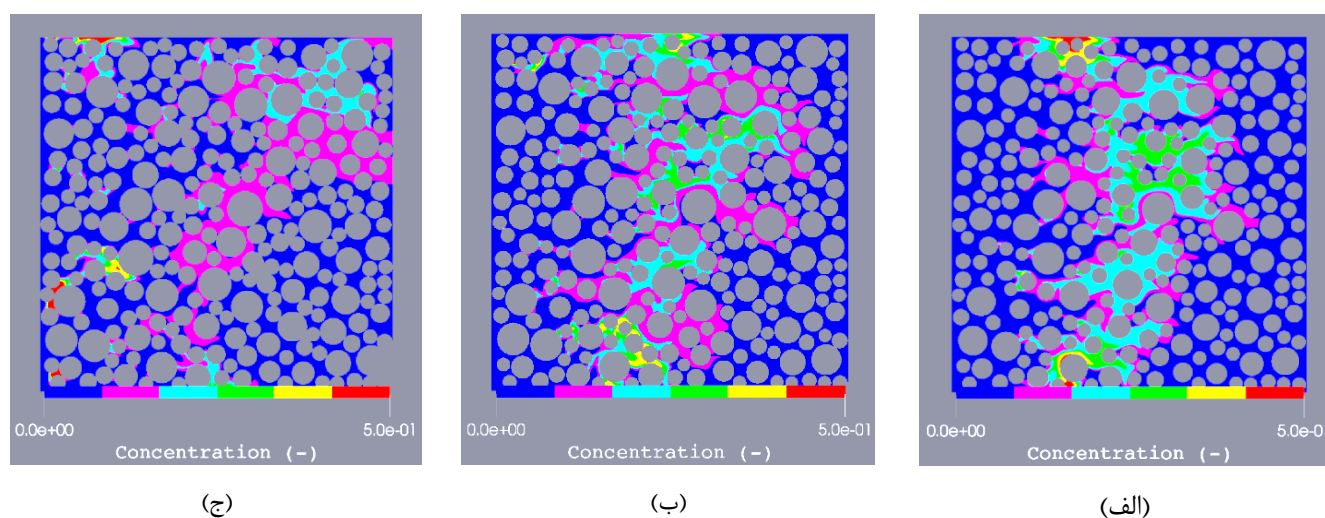
با محاسبه طول مسیر عبوری هر ذره سیالی که وارد شده و به خروجی می‌رسد و محاسبه میانگین طول این مسیرها برای هر مدل، عددی تحت عنوان پیچ و خم مسیر محاسبه شده و در نمودار شکل ۴ این اعداد برای مدل‌های اول تا پنجم مقایسه شده است. در نمودار شکل ۵ مشاهده می‌شود که هرچه میزان گرفتگی در مدل بیشتر می‌شود و به تبع آن مقدار تخلخل آن مدل کاهش یابد، مقدار عدد پیچ و خم برای آن نمونه افزایش یافته است. عبارتی با افزایش گرفتگی‌ها و به تبع آن کاهش مقدار تخلخل هر مدل میانگین طول میانگین مسیرهای عبوری ذرات سیال از ورودی به خروجی افزایش می‌یابد. شایان ذکر است همانطور که در سایر تحقیقات گذشته نیز ذکر شده است افزایش عدد پیچ و خم در نمونه‌های بتن نفوذپذیر، احتمال ته‌نشینی آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها و به تبع آن افزایش گرفتگی‌ها بیشتر اتفاق افتاده و می‌تواند باعث افت شدید بازدهی بتن نفوذپذیر گردد [۲].



شکل ۵) نمودار افزایش مقدار پیچ و خم مسیر با افزایش عدد تخلخل مدل‌ها

تاکنون با کمک نتایج شبیه‌سازی جریان سیال در مدل‌های با گرفتگی‌های مختلف، اثر ایجاد گرفتگی تدریجی در بتن نفوذپذیر مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این قسمت با شبیه‌سازی انتقال آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها موجود در روان‌آب که در این مطالعه فرض می‌شود که این آلودگی‌ها قابل حل شدن در آب است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ورودی مدل‌ها، نواری باریک از آلودگی‌ها و

ناخالصی‌ها^{۲۱} مقداردهی اولیه شده و شبیه‌سازی گذرای انتقال آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها در هر پنج مدل انجام شد. در شکل ۶ یک تصویر در زمانی یکسان از پخش آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها در مدل‌های یک، سه و پنج نشان داده شده است. علاوه بر اینکه شکل ۶ نیز هدایت جریان به سمتی که مسیر عبوری جریان بازتر بوده است را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود که در مورد سمت راست شکل ۶ که مربوط به مدل بتن نفوذپذیر بدون گرفتگی است، نواحی کمتری وجود دارد که غلظت آلودگی در آن به رنگ صورتی که نشان دهنده مقادیر بسیار کم غلظت در آن است، می‌باشد. در صورتی که هر چه مقدار گرفتگی در مدل بیشتر می‌شود، مساحت نواحی دارای غلظت‌های پایین که به رنگ صورتی نمایش داده شده است، بیشتر و بیشتر می‌شود. در واقع می‌توان این موضوع را اینگونه تفسیر کرد که به دلیل آنکه هر چه مقدار گرفتگی در مدل‌ها افزایش می‌یابد نواحی با سرعت کمتر در مدل بیشتر شده و جریان سیال مجبور به عبور از مسیرهای محدودی است و این عامل باعث می‌شود که پدیده‌ی غالب انتقال جرم در نواحی کم سرعت دیفیوژن^{۲۲} باشد و جابجایی^{۲۳} نقش کمتری در معادله شماره ۳ داشته باشد. در واقع این بدان معناست که هر چه نواحی با سرعت بالا در مدل بیشتر باشد، انتقال جرم از نوع جابجایی غالب بوده و فرصت زمانی انتقال، بوسیله دیفیوژن وجود نخواهد داشت. نکته قابل توجه دیگری که براساس نتایج شبیه‌سازی انتقال جرم در مدل‌ها می‌توان بیان نمود، آن است که با افزایش گرفتگی‌ها ممکن است حفره‌های انتها-بسته‌ای^{۲۴} بوجود آید که می‌تواند باعث شود تا مقداری آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها بوسیله سازوکار دیفیوژن به داخل آن راه یافته و در آنجا تجمع کرده و ته‌نشین شود. این اتفاق به‌وضوح در مدل‌های با گرفتگی بالاتر از جمله تصویر سمت چپ شکل ۶ قابل مشاهده است که باعث افزایش سرعت گرفتگی در مدل شده و بازده بتن نفوذپذیر را بشدت کاهش دهد.



شکل ۶ توزیع آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها در تمامی مدل‌ها که از موقعیت ثابتی در ورودی رها شده است با افزایش گرفتگی از راست به چپ

در شرایطی که مقدار آلودگی رها شده و همچنین سرعت بین‌دانه‌ای متوسط تمامی مدل‌ها یکسان در نظر گرفته شده است، با اندازه‌گیری مجموع مقدار آلودگی خارج شده از خروجی برحسب زمان که تحت عنوان نمودار بریکترو^{۲۵} شناخته می‌شود، می‌توان به بررسی مقدار آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها که هرگز از مدل خارج نمی‌شود، پرداخت. شکل ۷ نشان می‌دهد که با افزایش گرفتگی‌ها، مقدار پیک نمودارها کاهش یافته و این مقدار کاهش در آخرین مدل که تعداد زیادی از مسیرها بسته شده و مقدار زیادی آلودگی را به دام می‌اندازد بسیار بیشتر شده است. نکته دارای اهمیت دیگری که در نمودار شکل ۷ مشاهده می‌شود آن است که در زمان‌های کم که هنوز جرمی به انتهای مدل نرسیده است که بتواند در خروجی رصد شود، مقدار غلظت در خروجی صفر نشان داده می‌شود و به محض اینکه اولین مقادیر

²¹ Strip of solute (passive scalar)

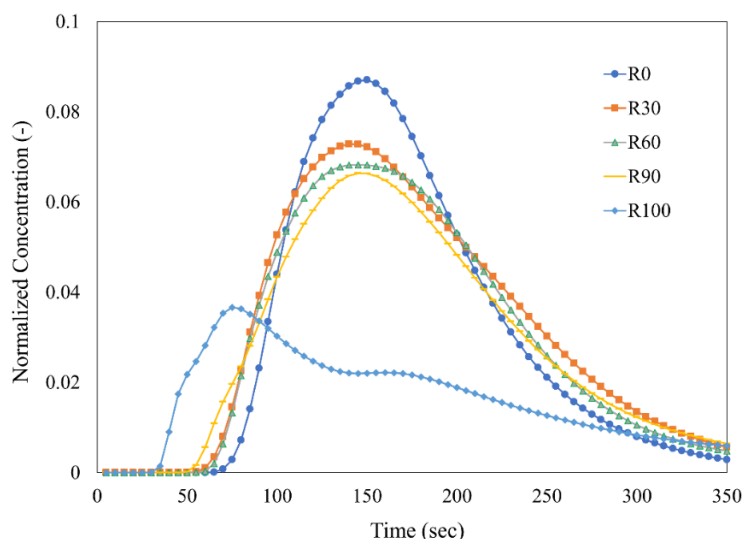
²² Diffusion

²³ Advection

²⁴ Dead-End

²⁵ Breakthrough curve (BTC)

آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها به خروجی رسید، نمودار شروع به بالا رفتن می‌کند که همانطور که از مقایسه زمان خیزش نمودارهای شکل ۷ مشخص می‌شود، هر چه مقدار گرفتگی بیشتر شود این زمان اولیه خیزش نمودار کاهش می‌یابد و با وجود آنکه در مدل با گرفتگی بیشتر، آلودگی‌ها و ناخالصی‌ها در مدل بیشتر پراکنده می‌شود، ولی خود را سریعتر به خروجی نیز می‌رساند که دلیل آن در قسمت‌های قبل مطالعه توضیح داده شد.



شکل ۷) نمودار BTC مربوط به تمامی مدل‌ها

۵- نتیجه گیری

با هدف بررسی اثر میزان گرفتگی تدریجی در بتن نفوذپذیر، بعنوان نوعی روسازی متخلخل، چند نمونه بتن نفوذپذیر با مقدار گرفتگی متفاوت، مدلسازی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. علاوه بر مدل بدون گرفتگی، چهار مدل دیگر با میزان ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد گرفتگی که نشانگر درصد دانه‌هایی است که دچار افزایش قطر تدریجی به مقدار ۱۰ درصد شده است، در نظر گرفته شد. جریان سیال و همچنین غلظت آلودگی در آن بوسیله کد متن باز OpenFOAM شبیه‌سازی شد و مقدار نفوذپذیری هر مدل به عنوان پارامتری برای مقایسه با مقادیر تجربی بدست آمده و مورد مقایسه قرار گرفت. بطور کلی مهمترین نتایج بدست آمده در این تحقیق را می‌توان بشرح زیر خلاصه نمود.

۱- افزایش گرفتگی سبب انسداد یا حداقل تنگ شدگی برخی مسیرها شده و به تبع آن مقدار تخلخل از عدد ۴۸ به ۳۵ درصد در نمونه پنجم کاهش یافت. این عامل سبب افزایش سرعت سیال در مسیرهای باقیمانده و البته کاهش سرعت در عمده نواحی بتن نفوذپذیر شد و عبارتی توزیع سرعت تغییر کرد. بطوریکه با افزایش گرفتگی، فراوانی سرعت‌های کم در بتن افزایش یافته و احتمال ته‌نشینی ذرات و آلودگی‌ها را در آن کمتر می‌کند. این تغییر توزیع سرعت در کانطور و هیستوگرام سرعت نمایش داده شد.

۲- محاسبه میانگین طول مسیر سیال از ورودی تا خروجی این مدل‌ها نشان داد که با افزایش گرفتگی، این طول متوسط افزایش یافته و سیال بایستی بطور میانگین مسیر طولانی‌تری را تا خروجی بپیماید که خود عاملی مهم در افزایش احتمال ته‌نشینی و ایجاد و گسترش گرفتگی بوده و در سایر تحقیقات گذشته نیز گزارش شده است [۲]. عدد پیچ و خم مسیر از ۱/۱۹ در نمونه بدون گرفتگی به ۱/۴۵ در نمونه پنجم افزایش یافت که در نمودار شکل ۵ بررسی شده است.

۳- علاوه بر این با شبیه‌سازی غلظت آلودگی محلول در آب نیز نشان داده شد که هرچه میزان گرفتگی بیشتر شود نواحی بیشتری تحت آلودگی (هرچند با مقادیر غلظت کم) بوجود خواهد آمد. این عامل بر اثر افزایش فراوانی سرعت‌های کم و همچنین غلبه مکانیزم دیفیوژن بر جابجایی در انتقال آلودگی در این نواحی بوجود آمده و بر شدت گرفتگی تدریجی و گسترش آن در بتن نفوذپذیر می‌افزاید که این موضوع بخوبی در مقایسه کانتورهای غلظت و همچنین نمودارهای بریکترو نیز قابل مشاهده است.

مراجع

- [1] V. V. Hung, S. Y. Seo, H. W. Kim, and G. C. Lee, "Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material," *Sustain.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/su13010426.
- [2] H. Cho *et al.*, "Mechanical and microscopic characteristics of polyurethane-based pervious pavement composites," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 16, 2021, doi: 10.3390/ma14164365.
- [3] A. Kia, J. M. Delens, H. S. Wong, and C. R. Cheeseman, "Structural and hydrological design of permeable concrete pavements," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. May, p. e00564, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00564.
- [4] A. Jagadeesh, G. Ong, and Y.-M. Su, "Digital sieving of pervious concrete air voids using X-ray computed tomography," no. September, 2019, doi: 10.2991/apte-18.2019.7.
- [5] A. K. Chandrappa and K. P. Biligiri, "Relationships between structural, functional, and X-Ray microcomputed tomography parameters of pervious concrete for pavement applications," *Transp. Res. Rec.*, vol. 2629, no. 1, pp. 51–62, 2017, doi: 10.3141/2629-08.
- [6] X. Cui, X. Zhang, J. Wang, J. Zhang, H. Qi, and J. Li, "X-ray CT based clogging analyses of pervious concrete pile by vibrating-sinking tube method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120075, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120075.
- [7] "X-ray Computed Tomography and Nondestructive Evaluation of Clogging in Porous Concrete Field Samples Kalehiwot Nega Manahiloh 1 , Dr. Balasingam Muhunthan (Corresponding author) 2 , Dr. Masoud Kayhanian 3 , and Dr. Seyoum Yami Gebremariam 4," no. 530, pp. 1–17.
- [8] J. Zhang, G. Ma, R. Ming, X. Cui, L. Li, and H. Xu, "Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging," *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 468–478, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.149.
- [9] Frank M. White, "Viscous Fluid Flow." McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, p. 616, 1991..
- [10] G. O. Brown, "The History of the Darcy-Weisbach Equation for Pipe Flow Resistance," *Environ. Water Resour. Hist.*, pp. 34–43, 2003.
- [11] A. Costa, "Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, no. 2, pp. 1–5, 2006, doi: 10.1029/2005GL025134.
- [12] P. B. Kowalczyk and J. Drzymala, "Physical meaning of the Sauter mean diameter of spherical particulate matter," *Part. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 645–647, 2016, doi: 10.1080/02726351.2015.1099582.