

Research paper

Simulation and investigation of factors affecting flow behavior in a tube with a porous wall

Sh. Daeijavad¹, A. Maleki^{2*}, M. Baiare³ and M. Naderi Boldaji⁴

Extended Abstract

Introduction:

Porous media, as systems with special properties, consist of porous structures that play an important role in many industrial and natural processes such as filtration, material separation, and fluid transport. Due to their specific physical properties, such as porosity and permeability, these media can exhibit interesting and unpredictable behaviors. Therefore, a detailed understanding of the fluid flow behavior in these media not only helps to improve existing processes, but can also lead to the optimal design of new and more efficient systems. For this reason, accurate simulation and analysis of the flow behavior in porous-walled tubes is of great importance. The main objective of this research was to investigate the effect of various factors on the flow of fluid through a porous-walled tube. This study sought to clarify the flow-related processes in these systems by analyzing the data and results obtained from numerical simulations and to reach reliable results regarding the optimization of tube design and its applications. Also, this research attempts to provide solutions to optimize the performance of filtration and fluid transfer systems.

Materials and Methods:

In this study, the governing equations for flow in porous media, including the continuity equations, Navier-Stokes, and Darcy's law, were introduced. The continuity and momentum equations were thoroughly defined mathematically, along with a detailed examination of boundary conditions and the properties of the fluid and porous media, such as geometry and technical parameters. Fluid flow in a tube with a porous wall was simulated numerically using ANSYS Fluent 2021 software. A tube with a diameter of 2.4 cm and a length of 120 cm was selected, with boundary conditions set for an axial Reynolds number of 500, indicating a transitional flow regime. Air was modeled as the fluid, characterized by a density of 1.29 kg/m³ and a dynamic viscosity of 1.87×10^{-5} Pascal seconds. The porous medium in the tube wall was designed to be 2 mm thick, with a permeability of 1.85×10^{-17} m², based on findings from previous research. A comprehensive mesh convergence analysis was conducted to ensure the accuracy of the simulation results, leading to a selection of 203150 elements that provided an optimal balance between the results accuracy and the computational time required. The study compared flow velocity parameters at two different Reynolds numbers, investigating the effect of wall seepage on flow by varying the porous medium Reynolds number (Re_w) from 0 to 0.1.

1- Ph.D. Student, Mechanical Engineering of Biosystem, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

2- Associated Professor of Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

3- Associated Professor of Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahrood University, Shahrood, Iran.

4- Professor of Department of Mechanical Engineering of Biosystem, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran.

* Corresponding Author: maleki@sku.ac.ir

Received: 2024/12/13

Accepted: 2025/02/29

<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15047.2650>

The axial Reynolds number (Re) was also used as a key criterion to describe flow behavior within the tube. The results were analyzed to understand the influence of porosity, thickness, and tube length on flow velocity. Furthermore, the simulation outcomes were compared with data from previous studies to validate the findings and enhance understanding of flow behavior in porous media.

Result and Discussion:

The results obtained revealed that the Reynolds number had a significant effect on the flow performance in the porous tube. For example, when the Reynolds number associated with fluid seepage through the porous wall was equal to zero, the velocity profile of the flow through the tube showed good agreement with the data in the study of Belhouideg (2017). Also, at a Reynolds number of 0.1, the difference between the simulation results and the reference data was only 0.03%, which indicated the high accuracy of the simulation and proper validation of the results. The study of the effects of different tube wall thicknesses, porosity, and tube length on the velocity profile showed that the wall thickness and the application of different porosities from 0.2 to 0.8 had no significant effect on the fluid flow behavior. In contrast, with the lengthening in tube from 0.6 to 2.4 m, the difference in flow velocity between the regions close to the wall and the tube axis decreased as well as the overall flow velocity. The changes in the axial velocity of the flow were analysed for different Reynolds numbers in the radial direction. In the impermeable state, the velocity at the center of the tube was equal to the initial velocity, whereas in the presence of a porous medium, the flow penetration led to the creation of a compensatory force that prevented a sharp drop in velocity. This research also showed that in tubes especially its length with porous walls, the flow seepage from the wall reduced in the velocity drop, which is clearly evident in comparison with impermeable tubes. The obtained results also emphasized the effect of wall thickness and porosity on the velocity profile and showed that these parameters did not have a significant effect under certain conditions. In addition, the results of the research indicated that the effect of the Reynolds number and the physical characteristics of the tube, especially its length, were factors affecting the behavior of the fluid flow in tubes with porous walls. So that an increase in the tube length leads to a decrease in the flow penetration velocity in the porous wall.

This research clearly shows that the Reynolds number and the physical properties of the tube, especially its length, are factors affecting the fluid flow behavior in porous-walled tubes. The results of this research can help optimize filtration systems and design optimal tubes in industrial and engineering applications. These results can be used as a basis for future studies in the field of design and optimization of fluid transport and filtration systems in porous media. Finally, the importance of this research in improving processes related to material separation and designing more efficient systems is demonstrated. Also, it can be concluded that improving simulation methods and further investigating flow behavior under different conditions can lead to a deeper understanding of flow processes in porous-walled tubes and ultimately help to promote science and technology in this field.

Keywords: Validation, Porosity, Velocity, Simulation, Reynolds number.

Citation: Daeijavad, Sh. Maleki, A. Baiare, M. and Naderi Boldaji, M., 2025. Simulation and investigation of factors affecting flow behavior in a tube with a porous wall. *Iranian Water Research Journal*, 56, pp. 47-57. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15047.2650>



شبیه‌سازی و بررسی عوامل مؤثر بر رفتار جریان در لوله‌ای با دیواره متخلخل

شهره دایی‌جواد^۱، علی ملکی^{۲*}، مرتضی بیاره^۳ و مجتبی بلداجی^۴

چکیده

محیط متخلخل از خلل و فرجی تشکیل شده است که می‌توانند مانند فیلتر در فرآیند جداسازی مواد عمل کنند. شبیه‌سازی رفتار جریان در محیط متخلخل موجب درک بهتری از فرآیند فیلتراسیون می‌شود. بنابراین هدف این پژوهش، بررسی عوامل مؤثر بر جریان عبوری سیال از لوله‌ای با دیواره متخلخل است. شبیه‌سازی این لوله متخلخل به صورت عددی با روش دینامیک سیال محاسباتی در نرم‌افزار Ansys Fluent انجام شده است. برای تحلیل نتایج از معادلات کوپل شده ناویر استوکس و دارسی در لوله متخلخل استفاده شد. نتایج نشان داد که عدد رینولدز تأثیر قابل توجهی بر عملکرد جریان در لوله متخلخل دارد. زمانی که عدد رینولدز مرتبط با تراوش سیال از دیواره متخلخل برابر با صفر بود، پروفیل سرعت جریان عبوری از لوله در شبیه‌سازی و داده‌های حاصل از منبع علمی دیگر تطابق خوبی داشتند. همچنین، در عدد رینولدز ۰/۱، اختلاف بین دو حالت تنها ۰/۳ درصد بود که نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی و اعتبارسنجی مناسب نتایج است. همچنین بررسی اثر ضخامت‌های مختلف دیواره لوله، تخلخل و طول لوله بر پروفیل سرعت نشان داد ضخامت دیواره لوله و اعمال تخلخل‌های مختلف از ۰/۲ تا ۰/۸ برخلاف عدد رینولدز اثر معنی‌داری بر رفتار جریان سیال از لوله ندارد و با اعمال طول‌های مختلف لوله از ۰/۶ تا ۲/۴ متر مشخص شد با افزایش طول لوله اختلاف سرعت جریان بین نواحی نزدیک به دیواره و محور لوله کاهش یافته و در مجموع، سرعت جریان کاهش می‌یابد. در لوله با دیواره نفوذناپذیر، کاهش سرعت در نزدیکی دیواره بیشتر است، در حالی که در لوله با دیواره متخلخل، جریان تراوشی از دیواره باعث ایجاد نیروی جبرانی شده و از افت شدید سرعت جلوگیری می‌کند. همچنین، برخلاف عدد رینولدز، ضخامت‌های مختلف دیواره لوله بر پروفیل سرعت و رفتار جریان سیال، تأثیر قابل توجهی ندارد.

واژه‌های کلیدی: اعتبارسنجی، تخلخل، سرعت، شبیه‌سازی، عدد رینولدز.

ارجاع: دایی‌جواد، شهره، ملکی، علی، بیاره، مرتضی، و نادری بلداجی، مجتبی، ۱۴۰۴. شبیه‌سازی و بررسی عوامل مؤثر بر رفتار جریان در لوله‌ای با دیواره متخلخل. *مجله پژوهش آب ایران*، ۵۶، صص. ۴۷-۵۷. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15047.2650>

۱- دانشجوی دکترای رشته مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد.

۴- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: maleki@sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۳

مقدمه

محیط متخلخل طی ۵۰ سال اخیر به طور گسترده در صنایع غذایی، علوم مهندسی و علوم پزشکی استفاده شده است (Belhouideg and Lagache, 2015; Bense et al., 2015; Kamar et al., 2013). در مهندسی آب، محیط‌های متخلخل نقش کلیدی در فرآیندهای تصفیه آب، فیلتراسیون و جداسازی آلاینده‌ها ایفا می‌کنند. این محیط‌ها به طور گسترده در سیستم‌های تصفیه آب آشامیدنی، فیلترهای شنی، غشاهای اسمز معکوس و سیستم‌های تصفیه فاضلاب استفاده می‌شوند (Bui et al., 1998; Vial and Doussau, 2003b).

یکی از موارد کاربرد محیط متخلخل، استفاده در فرآیندهای فیلتراسیون و جداسازی مواد است. آزمون‌های مختلفی برای ارزیابی غشاهای مختلف از نظر ساختار، تخلخل و زبری سطح انجام شده است تا از این طریق کارایی فیلتراسیون بررسی شود. در مطالعه (Peydayesh et al., 2018) در غشای نوع نانو کامپوزیت با افزایش درصد نانولوله اندازه حفرات و تخلخل افزایش یافت. در مطالعه‌ای دیگر از غشای کامپوزیت برای بهینه کردن عملکرد کلی غشا در فیلتراسیون استفاده شد (Hermans et al., 2015). که این یافته‌ها در طراحی سیستم‌های پیشرفته تصفیه آب، به ویژه در حذف ذرات ریز و آلاینده‌های میکروسکوپی از آب‌های سطحی و زیرزمینی، کاربرد دارند.

(Liu et al., 2019) با مطالعه تجربی و همچنین استفاده از PFM (Porous Flow Model) به بررسی تأثیر ضخامت دیواره کانال بر الگوی جریان آب و هوا در یک محیط متخلخل پرداختند. نتایج نشان می‌دهند که کانال‌هایی با دیواره ضخیم‌تر، به دلیل افزایش مقاومت در برابر جریان، مسیرهای ثانویه جریان هوا را تحت تأثیر قرار می‌دهند. یافته‌های این پژوهش در مدیریت منابع آب و طراحی سیستم‌های فیلتراسیون و تصفیه آب کاربرد دارد.

(Bansal et al., 2011) با استفاده از مواد فیبروس به عنوان بستر فیلتراسیون متخلخل، میزان جداسازی ایزواکتان از امولسیون ایزواکتان در آب را مطالعه کردند. در این آزمایش، اثر خواص بستر فیلتر از جمله اندازه حفرات، تخلخل و ویژگی‌های سطحی مانند انرژی سطحی بر راندمان جداسازی بررسی شد. منظور از انرژی سطحی در این مطالعه، تأثیر محیط خیس‌شده و سطح ویژه ذرات بر

عملکرد فیلتراسیون است. نتایج نشان داد که راندمان جداسازی علاوه بر شرایط عملیاتی و خواص امولسیون، به شدت به اندازه حفرات، میزان ترشوندگی سطح، تخلخل و نفوذپذیری هوا در بستر فیلتر وابسته است. این یافته‌ها در تصفیه آب (طراحی فیلترهای غشایی برای حذف آلاینده‌ها از آب‌های سطحی و زیرزمینی) کاربرد دارد.

در روند فیلتراسیون، با عبور جریان سیال از یک کانال با دیواره متخلخل، الگوهای متفاوتی از سرعت و فشار ایجاد می‌شود. این تغییرات هم در جریان سیال عبوری از داخل کانال و هم در فرآیند نشست سیال از دیواره متخلخل مشاهده می‌شود. جریان عبوری درون کانال تحت تأثیر تغییرات فشار و مقاومت دیواره قرار می‌گیرد؛ درحالی‌که نشست سیال از دیواره به تخلخل، نفوذپذیری و اختلاف فشار بین داخل و خارج کانال وابسته است. این پدیده در طراحی سیستم‌های فیلتراسیون و تصفیه آب، در سیستم‌های اسمز معکوس و اولترافیلتراسیون از اهمیت بالایی برخوردار است. درک رفتار جریان در محیط‌های متخلخل می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد این سیستم‌ها و کاهش مصرف انرژی کمک کند.

محیط‌هایی با دیواره‌ها و مرزهای متخلخل، کاربردهای صنعتی متعددی مانند مهندسی زیست پزشکی (Sussman et al., 1994) و (Moussy, 2003; 2000) و تصفیه آب آشامیدنی (Vial and Doussau, 2003a)، صنایع غذایی و تولید نوشیدنی دارند (Bui et al., 1994; Girard and Fukumoto, 2000).

در فرآیندهای فیلتراسیون، جریان سیال در تماس با دیواره‌های متخلخل حرکت می‌کند و معمولاً با یک افت فشار هدایت می‌شود که بر توزیع سرعت جریان تأثیر می‌گذارد. در مجاری غیرمتخلخل این افت فشار بیشتر به دلیل اصطکاک سیال با دیواره است، اما در مجاری متخلخل، نشست سیال از دیواره و تعامل آن با ساختار متخلخل باعث تغییراتی در الگوی جریان می‌شود که شامل ایجاد گرادیان فشار و تغییر در توزیع سرعت جریان در نزدیکی دیواره متخلخل است. تاکنون در راستای درک بیشتر رفتار جریان در محیط متخلخل مطالعات نظری و آزمون‌های آزمایشگاهی زیادی بر مبنای قانون داری (Darcy) صورت گرفته است، در گذشته پژوهش‌گران از روش‌های تقریبی برای تجزیه و تحلیل مسایل حاکم بر جریان استفاده می‌کردند و مدل‌های تقریبی یک بعدی

متخلخل با رابطه‌های کوپل شده ناولیستوکس و داریسی را تحلیل و بررسی نمودند. آنها اثر پارامترهای مختلف مانند عدد رینولدز محیط متخلخل که مربوط به تراوش سیال از دیواره متخلخل لوله در فرآیند فیلتراسیون است را بر جریان و عملکرد لوله متخلخل بررسی کردند. رابطه عدد رینولدز و پروفیل سرعت نشان داد که با افزایش عدد رینولدز محیط متخلخل، مؤلفه سرعت جریان در راستای محور لوله کاهش و افت فشار محوری در جریان ایجاد می‌شود.

به دلیل عدم شبیه‌سازی مشخص برای بررسی عوامل مؤثر محیط متخلخل بر عبور جریان سیال، این پژوهش با هدف شبیه‌سازی عوامل مؤثر بر رفتار جریان عبوری از محیط متخلخل، مانند عدد رینولدز و ضخامت دیواره متخلخل انجام گرفت و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج مطالعه (Belhouideg (2017) مقایسه شد. اعتبارسنجی لازم از بررسی اثر عوامل مذکور در وضعیت تئوری و شبیه‌سازی نیز انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این بخش، ابتدا معادلات حاکم بر جریان در محیط متخلخل (شامل معادلات پیوستگی، ناولیستوکس^۱ و قانون داریسی) معرفی می‌شود. سپس شرایط مرزی و مشخصات سیال و محیط متخلخل که دیواره لوله تحت جریان را تشکیل می‌دهد، از جمله انتخاب‌های هندسی و پارامترهای فنی، به تفصیل بیان خواهد شد. همچنین برای بهینه‌سازی شبیه‌سازی و اطمینان از دقت نتایج، تحلیل همگرایی مش انجام شده و تعداد المان مناسب برای شبیه‌سازی دقیق و بهینه انتخاب می‌گردد. جزئیات مربوط به شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار Ansys Fluent 2021 نیز در این بخش ذکر شده است.

معادلات حاکم بر مسئله

شماتیک عبور جریان در محیط متخلخل در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شماتیک، خلل و فرج محیط متخلخل و حرکت و جهت جریان در آن مشخص شده است.

به منظور شبیه‌سازی عبور جریان در محیط متخلخل نیاز به تعریف معادلات حاکم بر مسئله است. روابط پیوستگی،

متعددی بدست آورده‌اند (Yuan and Brady, 1984; Blatt et Finkelstein, 1956; Schmitz and Prat, 1995; Moussy and Snider, 2009 al., 1970). ولی با یک تحلیل دقیق‌تر اگر پروفیل سرعت جریان در ابتدا و انتهای لوله متخلخل بررسی شود دو مؤلفه سرعت و یا دو مؤلفه جریان بدست خواهد آمد و اگر رابطه مستقیم میزان دبی سیال با سرعت در نظر گرفته شود می‌توان گفت مدل‌های ریاضی یک بعدی توانایی تحلیل دقیق جریان در محیط متخلخل را ندارند. همچنین مدل‌های دو یا سه بعدی نیز بر اصل حجم کنترل شده محیط شکل گرفته و معادلات دیفرانسیل جریان همراه با حل عددی آن را ارائه می‌دهند که پیچیدگی‌های خاصی را شامل می‌شوند.

به طور کلی به دلیل پیچیدگی‌های جریان درون محیط متخلخل، برای تحلیل این جریان‌ها می‌توان از شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل استفاده کرد. اولین شبیه‌سازی عبور جریان آرام از داخل غشاء کانال با دیواره متخلخل توسط (Berman (1953 انجام شد.

بررسی جریان آرام در یک لوله متخلخل با کاهش مکش متغیر دیواره یا شار جرمی شعاعی متغیر توسط (Galowin et al. (1974) و خلاصه‌ای از پیشرفت‌ها تا سال ۱۹۸۹ در مورد نقش مکانیک سیالات در فیلتراسیون با محیط متخلخل توسط (Belfort (1984 و (Blunt et al. (1992 گزارش شده است.

همانطور که اشاره شد در تحلیل رفتار جریان سیال از محیط متخلخل از رابطه داریسی استفاده می‌شود. رابطه داریسی که ارتباط خطی بین سرعت و گرادیان هیدرولیکی را بیان می‌کند، با فرض آرام بودن جریان در شرایط ماندگار (Steady state) برقرار خواهد بود.

(Nassehi (1998 از رابطه داریسی برای نشان دادن شرایط دیواره متخلخل استفاده کرد و از روش المان محدود در شبیه‌سازی بهره گرفت.

(Gharibi and Ashrafizaadeh (2020 در پژوهش خود از شبکه بولتزن دو بعدی و سه بعدی در رابطه با مدل‌های برخورد ذرات روی یک شبکه منظم و یکپارچه استفاده و داریسی و غیرداریسی بودن جریان سیال در محیط متخلخل را بررسی کردند. آنها برای اندازه‌گیری میزان نفوذپذیری، روش برخورد لحظه‌ای غیرمتعامد و روش BGK (=Bhat nargar-Groos-Krook) را با یکدیگر مقایسه کردند.

در مطالعه (Belhouideg (2017 عبور جریان از محیط

(Bear, 2013; Fetter, 2018). در جریان عبوری از لوله‌های متخلخل، عدد رینولدز محیط متخلخل (R_{ew}) ناشی از تراوش سیال از دیواره متخلخل لوله به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$R_{ew} = \rho D V_w / \mu \quad (۴)$$

که در آن D قطر لوله متخلخل (m) و V_w سرعت نفوذ جریان (m/s) است. برای جریان آرام ($R_{ew} < 10$)، فرضیات قانون دارسی معتبر است، اما در مقادیر بالاتر، اثرات اینرسی نیز باید در نظر گرفته شوند (Bear, 2013). بر اساس عدد رینولدز، سرعت نفوذ جریان در محیط متخلخل به صورت زیر بیان می‌شود (Belhouideg, 2017):

$$V_w = R_{ew} \mu / \rho D \quad (۵)$$

این معادله در تحلیل سیستم‌های فیلتراسیون و تراوش در ساختارهای متخلخل کاربرد دارد (Fetter, 1982; Hazen, 1982). (2018)

ناویراستوکس و دارسی به عنوان معادلات اساسی در نظر گرفته می‌شوند. لذا معادلات پیوستگی و مومنوم به صورت معادله‌های (۱) و (۲) تعریف می‌شوند (Shames, 2017; Bear, 2013):

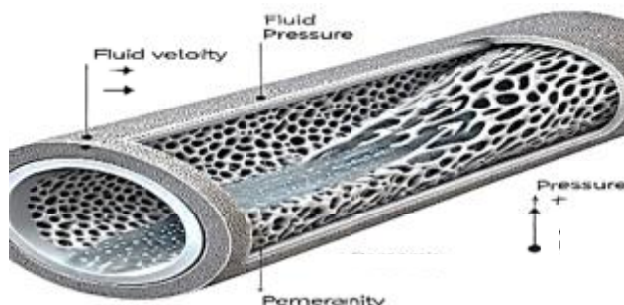
$$\nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (۱)$$

$$\rho d\vec{v}/dt = -\nabla p + \mu \Delta \vec{v} \quad (۲)$$

در این معادلات ∇p گرادیان افت فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)، $\vec{v}$ بردار سرعت جریان (m/s) و ρ دانسیته (kg/m^3) است. برای جریان آرام در محیط متخلخل، معادله بین سرعت و گرادیان فشار بر اساس قانون دارسی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\nabla h = -\frac{\vartheta}{K} \vec{v} \quad (۳)$$

که در آن K ضریب هدایت هیدرولیکی (m/s) و ϑ ویسکوزیته سینماتیکی (m^2/s) است. این معادله در تحلیل جریان‌های زیرسطحی و تراوش از بسترهای متخلخل به کار می‌رود.



شکل ۱ - شماتیک عبور جریان در محیط متخلخل

شبیه‌سازی عبور جریان از لوله متخلخل

شبیه‌سازی عبور جریان سیال در لوله با دیواره متخلخل به روش عددی در نرم‌افزار Ansys Fluent 2021 انجام شد. لوله‌ای با قطر ۲/۴ سانتیمتر و طول ۱۲۰ سانتیمتر (۵۰ برابر قطر لوله) در نظر گرفته شد. برای شرایط مرزی، سرعت جریان در مرکز لوله برابر با ۰/۳۶۲۴ متر بر ثانیه و عدد رینولدز محوری مرتبط با جریان در مرکز لوله برابر با عدد ۵۰۰ تنظیم شد.

هوا به عنوان ماده سیال با چگالی ۱/۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته دینامیکی $10^{-5} \times 1/۸۷$ پاسکال ثانیه، دیواره لوله از یک محیط متخلخل به ضخامت ۲ میلی‌متر و نفوذپذیری ذاتی (Intrinsic Permeability) این

لازم به ذکر است عدد رینولدز محیط متخلخل (R_{ew}) به عنوان یک پارامتر برای توصیف نشت سیال از دیواره متخلخل استفاده می‌شود. قطر لوله به عنوان طول مشخصه در محاسبه این عدد رینولدز به کار رفته است. زیرا این قطر در مدل‌سازی نشت سیال از دیواره متخلخل به عنوان ویژگی اصلی تعیین‌کننده رفتار جریان در نظر گرفته می‌شود و به طور خاص، عدد رینولدز جریان در محیط متخلخل به این شکل تعریف می‌شود. زیرا در این شرایط، رفتار نشت با ویژگی‌های قطر لوله در ارتباط است؛ بنابراین، این معادله برای تحلیل نشت سیال از دیواره متخلخل معتبر است.

و استخراج نتایج تعداد ۲۰۳۱۵ المان برای لوله متخلخل در نظر گرفته شد.

شکل ۲ ویژگی‌های جریان و جهت سرعت محوری (سرعت در مرکز لوله) (V_0) و سرعت شعاعی (سرعت نفوذی جریان در ناحیه متخلخل) (V_w) را نمایش می‌دهد. پس از اجرای مدل در نرم افزار Ansys Fluent نتایج سرعت محوری و سرعت نفوذی جریان عبوری با توجه به موقعیت شعاعی استخراج شد. در این پژوهش نتایج مربوط به پارامترهای سرعت جریان در دو عدد رینولدز در شبیه‌سازی با داده‌های حاصل از مطالعه Belhouideg (2017) مورد مقایسه گرفت.

محیط متخلخل بر اساس مطالعه (2014) and Lagache Belhouideg مقدار $10^{-17} \times 1/85$ مترمربع در نظر گرفته شد.

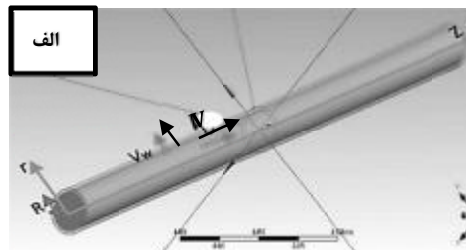
برای انتخاب تعداد المان مناسب به منظور استخراج نتایج خروجی دقیق‌تر، از تحلیل همگرایی مش استفاده شد. مطابق جدول ۱، اندازه‌م‌بندی با ۴ سری تعداد المان در نظر گرفته شد و نتایج سرعت خروجی در این اندازه‌های المان در راستای ضخامت دیواره متخلخل لوله به‌دست آمد. علت انتخاب ۴ ضخامت دیواره، بررسی اثر ضخامت‌های مختلف بر رفتار سیال است. مقادیر سرعت خروجی در تعداد المان‌های ۳۹۴۶۶۷ و ۲۰۳۱۵۰ نزدیک‌تر بودند و با لحاظ صرفه‌جویی در زمان شبیه‌سازی

جدول ۱- نتایج تحلیل همگرایی مش‌بندی

تعداد المان	۳۹۴۶۶۷	۲۰۳۱۵۰	۷۱۱۰۵	۵۰۰۲۳	۵۸۰۶۰
ضخامت دیواره متخلخل لوله (mm)	۰/۶۸	۰/۶۱	۰/۷۸	۰/۹۶	۱/۵
سرعت (m/s)	۰/۵۹	۰/۵۶	۰/۶۷	۰/۸۲	۰/۹۱
	۰/۵۳	۰/۵۷	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۸۷
	۰/۴۶	۰/۴۶	۰/۵۸	۰/۶۹	۰/۷۷

مستقل از هم نیستند، بلکه با هم ترکیب شده و بر ساختار جریان تأثیر می‌گذارند؛ به طوری که جریان می‌تواند تحت تأثیر مقادیر مختلف رینولدز به صورت ناپایدار یا گذرا باشد که این خود روی انتقال جرم و حرارت و همچنین افت فشار تأثیر می‌گذارد. در ادامه مقادیر سرعت جریان در تخلخل‌ها، ضخامت‌ها و طول‌های مختلف لوله استخراج و بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با داده‌های حاصل از مطالعه Belhouideg (2017) مقایسه شد. این مقایسه شامل تجزیه و تحلیل نحوه تأثیر تخلخل، ضخامت و طول لوله بر سرعت جریان است.

دو عدد رینولدز در این پژوهش در نظر گرفته شد. که شامل عدد رینولدز محیط متخلخل (Re_w) ناشی از تراوش سیال از دیواره متخلخل لوله است که به نسبت دبی جرمی تراوشی از دیواره متخلخل به ویسکوزیته سیال و مشخصات لوله بستگی دارد. مقدار Re_w بین صفر و ۰/۱ در نظر گرفته شده تا تأثیر تراوش دیواره‌ای بررسی شود و اثر برهم‌کنش بین جریان محوری و جریان ناشی از تراوش را نشان دهد و دیگری، عدد رینولدز محوری (Re) مربوط به حرکت جریان از لوله است که بر اساس سرعت جریان محوری در لوله و مشخصات سیال محاسبه می‌شود. در این پژوهش مقدار $Re = 500$ که بیانگر یک جریان آرام است، برای آن نظر گرفته شده است. این دو عدد رینولدز



شکل ۲- الف): (V) سرعت محوری جریان، (Vw) سرعت نفوذی جریان، ب): (R) شعاع سطح مقطع لوله در مختصات دکارتی (r-z)

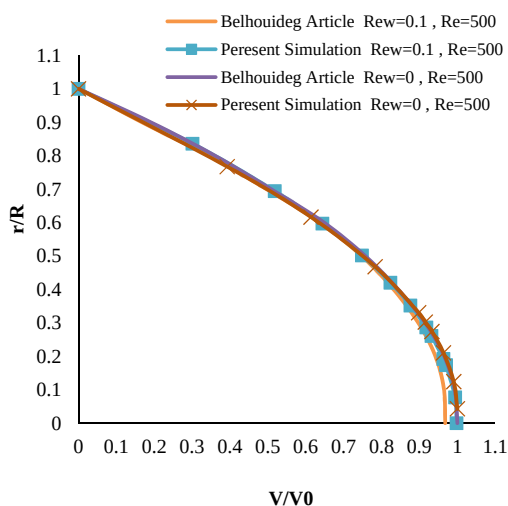
نتایج و بحث

شکل ۳، سرعت محوری عبوری جریان در راستای شعاعی برای عدد رینولدز محیط متخلخل ($R_{ew}=0$ و $R_{ew}=0.1$) (محاسبه عدد رینولدز محیط متخلخل با استفاده از ابعادله‌های ۴ و ۵) و عدد رینولدز محوری ($Re=500$) را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در عدد رینولدز محیط متخلخل صفر که حالتی نفوذناپذیر بدون وجود محیط متخلخل را توصیف می‌کند مقادیر حاصل از شبیه‌سازی این مطالعه و داده‌های حاصل از مطالعه (Belhouideg (2017) بر هم منطبق شده‌اند.

با توجه به این شکل، در مرکز لوله ($r/R=0$) سرعت جریان با سرعت اولیه برابر شده است ($V/V_0=1$) که در اینجا، سرعت اولیه به‌عنوان سرعت حداکثر در مرکز لوله متخلخل در نظر گرفته شده است. علت این پدیده عدم نشتی جریان سیال از دیواره نفوذناپذیر است که منجر به عدم کاهش سرعت در مرکز لوله می‌شود. شکل ۳ با عدد رینولدز محیط متخلخل ۰/۱، وجود ناحیه نفوذناپذیر متخلخل با سرعت نفوذ جریان در این محیط را نتیجه داد که مقادیر شبیه‌سازی و داده‌های حاصل از مطالعه علمی با اختلاف ۰/۳ درصد انطباق مطلوبی داشتند. علت این اختلاف ناچیز را می‌توان خطای دقت محاسبات و تقریب داده‌های نمودار مطالعه (Belhouideg (2017) دانست. در نتیجه می‌توان از یافته‌های مطالعه (Belhouideg (2017) برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی این پژوهش استفاده کرد که مقایسه نتایج، اعتبارسنجی مناسبی را نشان داد. همچنین شکل ۳ نشان می‌دهد در مرکز لوله ($r/R=0$) سرعت جریان کمتر از سرعت اولیه (سرعت حداکثر جریان در مرکز لوله) است. علت این پدیده را می‌توان به نفوذ جریان در دیواره متخلخل لوله و کاهش سرعت نفوذی جریان که در نتیجه آن، سرعت محوری جریان نیز کاهش می‌یابد، نسبت داد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که سرعت جریان عبوری تحت تأثیر عدد رینولدز محیط متخلخل و در نتیجه سرعت نفوذ جریان (طبق معادله (۵)) قرار می‌گیرد. با توجه به نتایج، سرعت نفوذ در امتداد لوله کاهش یافته که این امر به دلیل بالا رفتن عدد رینولدز محیط متخلخل قابل توجیه است. این شکل تغییر سرعت محوری (V) در دو لوله با دیواره متخلخل و دیواره نفوذناپذیر را در راستای شعاعی (r) نشان می‌دهد. همان‌طور که بدیهی است در عدد رینولدز

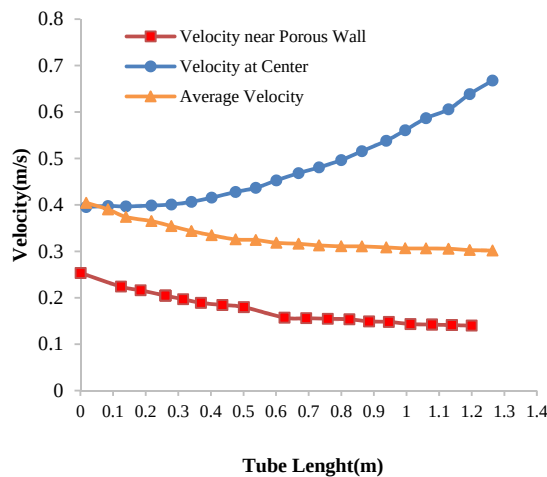
محوری $Re=500$ (جریان آرام) سرعت در نزدیک دیواره ($r=0.01$ m) کاهش و در مرکز ($r=0$) افزایش می‌یابد. به طور کلی، توزیع سرعت در طول لوله به صورت سهموی است و در راستای محور z به تدریج افزایش می‌یابد و در مرز محیط متخلخل کاهش می‌یابد.



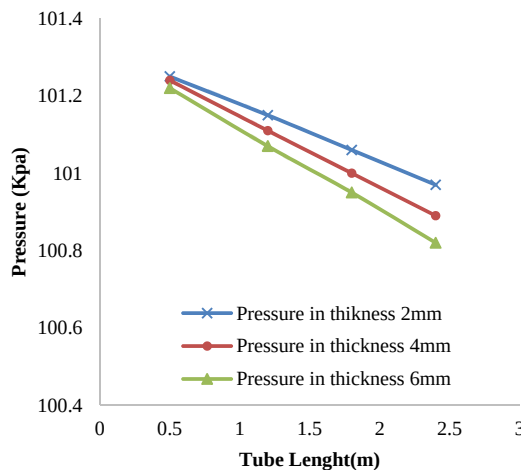
شکل ۳- پروفیل شبیه‌سازی شده سرعت محوری جریان عبوری از لوله با دیواره نفوذناپذیر ($R_{ew}=0$) و با دیواره متخلخل ($R_{ew}=0.1$) در عدد رینولدز محوری ($Re=500$) در پژوهش حاضر و مطالعه (Belhouideg (2017)

کمترین سرعت در نزدیک دیواره و مرز صلب به دلیل شرط عدم لغزش رخ می‌دهد (White, 2011). همچنین دلیل افزایش سرعت در مرکز لوله در راستای محور z ، کاهش فشار در امتداد لوله است. بر اساس معادلات بقا انرژی، این کاهش فشار به عنوان نیروی محرکه عمل کرده و موجب افزایش سرعت جریان در طول لوله می‌شود (Fox et al., 2015). همچنین سرعت محوری جریان در نزدیک دیواره متخلخل با عدد رینولدز محیط متخلخل غیر صفر کاهش کمتری نسبت به سرعت محوری در نزدیک دیواره نفوذناپذیر با عدد رینولدز محیط متخلخل صفر داشته است. دلیل این امر تأثیر جریان تراوشی از دیواره متخلخل است. در لوله با دیواره نفوذناپذیر ($R_{ew}=0$)، جریان تنها تحت تأثیر نیروی برشی ناشی از ویسکوزیته و افت فشار در راستای z قرار دارد که باعث کاهش سرعت در نزدیکی دیواره به دلیل شرط عدم لغزش می‌شود. اما در لوله با دیواره متخلخل ($R_{ew} \neq 0$)، تراوش سیال به داخل جریان اصلی باعث ایجاد یک نیروی

است که سرعت میانگین در طول لوله روند کاهشی دارد و بیانگر اثر مستقیم طول لوله و توزیع سرعت در مقطع لوله بر افت فشار است.



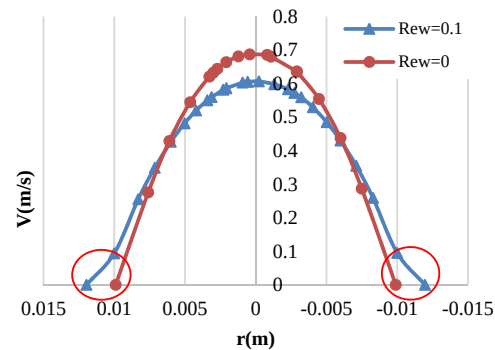
شکل ۵- نمودار سرعت‌های مختلف جریان در طول لوله



شکل ۶- تغییرات فشار در طول لوله برای ضخامت‌های ۲، ۴ و ۶ میلی‌متر

در ادامه پروفیل سرعت در ضخامت‌های مختلف دیواره لوله متخلخل (۲، ۴ و ۶ میلی‌متر) در عدد رینولدز ۵۰۰ و عدد رینولدز محیط متخلخل ۰/۱ بررسی شد (شکل ۷). همانطور که مشاهده می‌شود نمودارهای پروفیل سرعت در ضخامت‌های مختلف روند یکسانی دارند؛ به عبارت دیگر ضخامت بر خلاف عدد رینولدز تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روند تغییر سرعت در طول لوله نداشته و مانند شکل ۲ اختلاف ۰/۳ درصدی بین نتایج حاصل از پروفیل سرعت در مقاله Belhouideg (2017) و پروفیل سرعت در سه

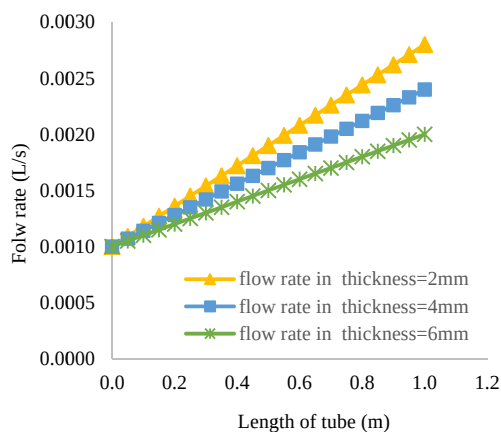
جبرانی در نزدیکی دیواره می‌شود که از کاهش بیش از حد سرعت جلوگیری می‌کند. این موضوع در مطالعه Kaviany (1995) توضیح داده شده است. وی بیان می‌کند تراوش به‌عنوان یک منبع جرم و تکانه در نزدیکی دیواره عمل کرده و پروفیل سرعت را تغییر می‌دهد. به طور کلی در مرز محیط متخلخل، اصطکاک و تراوش باعث کاهش سرعت جریان می‌شوند.



شکل ۴- نمودار تغییرات سرعت جریان (V) با شعاع لوله (r) در حالت دیواره نفوذناپذیر با عدد رینولدز فیلتراسیون صفر ($R_{ew}=0$) و دیواره متخلخل با عدد رینولدز محیط متخلخل غیر صفر ($R_{ew}=0.1$). شعاع سطح مقطع لوله بین ۰/۱ تا ۰/۱۲ متر است.

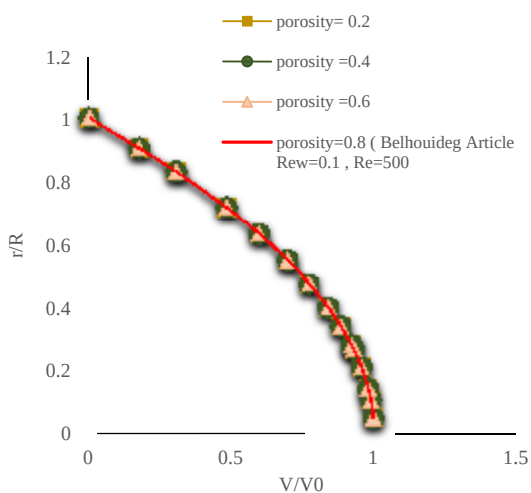
شکل ۵ روند افزایشی سرعت محوری در طول لوله و روند کاهشی آن در نزدیک دیواره‌های لوله را نشان می‌دهد. سرعت در مرکز لوله (خط آبی) به‌صورت سهموی افزایش می‌یابد؛ در حالی که سرعت در نزدیکی دیواره متخلخل (خط قرمز) کاهش کمتری داشته و تقریباً ثابت‌تر باقی می‌ماند. این در حالی است که سرعت متوسط در طول لوله روند کاهشی داشته است.

شکل ۶ تغییرات فشار را در طول لوله به صورت تابعی از طول و شرایط جریان نشان می‌دهد. با افزایش طول لوله، افت فشار ناشی از اصطکاک و نفوذ سیال در محیط متخلخل افزایش یافته است. با افزایش طول لوله، افت فشار به خاطر افزایش نیروی اصطکاک بین سیال و دیواره‌های لوله در طول مسیر به صورت خطی افزایش یافته و در نتیجه فشار در طول لوله کاهش می‌یابد که رفتار مورد نظر با رابطه داری-وایسباخ تطابق دارد. لذا با کاهش فشار، سرعت سیال در مرکز لوله افزایش یافته و با نزدیک شدن به دیواره‌ها کاهش می‌یابد، این در حالی



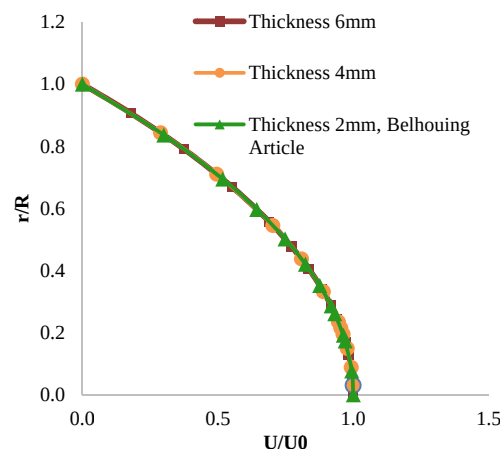
شکل ۸- پروفیل دبی جریان عبوری در طول لوله در ضخامت‌های دیواره لوله ۴ و ۶ میلی‌متر در پژوهش حاضر و در ضخامت دیواره لوله ۲ میلی‌متر مطالعه Belhouideg (2017)

همچنین دیواره لوله با تخلخل‌های مختلف از ۰/۲ تا ۰/۸ بررسی شد. شکل ۹ پروفیل سرعت در تخلخل‌های مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نمودارهای پروفیل سرعت در این تخلخل‌ها روند یکسانی دارند. با افزایش تخلخل (کاهش چگالی دیواره لوله)، سرعت جریان در مرکز لوله افزایش می‌یابد زیرا مقاومت جریان کاهش می‌یابد؛ با این حال، در نزدیکی دیواره سرعت جریان تحت تأثیر تخلخل تغییر قابل ملاحظه‌ای نمی‌کند و تخلخل نیز تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روند تغییر سرعت در طول لوله نداشته است.



شکل ۹- پروفیل سرعت محوری جریان عبوری از لوله متخلخل در تخلخل‌های دیواره لوله ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ در پژوهش حاضر و تخلخل ۰/۸ مطالعه Belhouideg (2017)

ضخامت لوله شبیه‌سازی شده وجود دارد. همچنین افزایش ضخامت بصورت مستقیم بر میزان نشت تأثیر می‌گذارد.



شکل ۷- پروفیل سرعت محوری جریان عبوری از لوله با دیواره متخلخل در ضخامت‌های دیواره لوله ۴ و ۶ میلی‌متر در پژوهش حاضر و در ضخامت دیواره لوله ۲ میلی‌متر مطالعه Belhouideg (2017)

اگر ضخامت افزایش یابد، مسیرهای عبور سیال طولانی‌تر شده و مقاومت هیدرولیکی افزایش می‌یابد، که می‌تواند منجر به کاهش دبی نشت در شرایط یکسانی از اختلاف فشار شود. اگر مقدار دبی نشت به‌عنوان یک مقدار ثابت در نظر گرفته شود، تغییر ضخامت لوله نمی‌تواند به‌طور قابل‌توجهی روی نمودار تأثیر بگذارد. با این حال، در تحلیل‌های انجام‌شده، دبی نشت متغیر در نظر گرفته شده و تغییرات آن در سرعت جریان داخلی تأثیر گذاشته است. تغییرات دبی جریان در شکل ۸ نشان داده شده است.

با توجه به نمودار، افزایش ضخامت دیواره لوله متخلخل باعث کاهش نرخ افزایش دبی جریان (دبی حجمی) در طول لوله می‌شود. به عبارت دیگر، با افزایش ضخامت دیواره لوله، دبی جریان همچنان افزایش می‌یابد، اما این افزایش در ضخامت‌های بیشتر نسبت به ضخامت‌های کمتر، کندتر است. علت این پدیده افزایش مقاومت جریان در برابر عبور سیال است. این مقاومت ناشی از تخلخل دیواره و اصطکاک بین سیال و دیواره لوله است. با وجود این، با افزایش ضخامت دیواره، مقاومت جریان افزایش می‌یابد، اما این افزایش مقاومت به دلیل ساختار متخلخل لوله، به‌طور یکنواخت در سرتاسر لوله توزیع می‌شود. در نتیجه، تغییرات سرعت جریان در طول لوله چندان محسوس نیست.

ایجاد نیروی جبرانی شده و از افت شدید سرعت جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، بررسی اثر ضخامت‌های مختلف دیواره لوله بر پروفیل سرعت نشان داد که برخلاف عدد رینولدز، ضخامت دیواره تأثیر قابل توجهی بر رفتار جریان سیال ندارد.

همچنین تأثیر تخلخل دیواره لوله (در بازه ۰/۲ تا ۰/۸) و طول لوله (در بازه ۰/۶ تا ۲/۴ متر) بر پروفیل سرعت بررسی شد. نتایج حاکی از آن بود که مشابه ضخامت دیواره، تخلخل نیز تأثیر معنی‌داری بر پروفیل سرعت ندارد. در مقابل، افزایش طول لوله موجب کاهش نسبت سرعت کلی سیال به سرعت محوری آن در مرکز لوله شد که به دنبال آن، سرعت نفوذی جریان در دیواره متخلخل نیز کاهش یافت.

به طور کلی، این نتایج نشان می‌دهند که عدد رینولدز و ویژگی‌های فیزیکی لوله، به‌ویژه طول آن، از عوامل مؤثر بر رفتار جریان سیال در لوله‌های با دیواره متخلخل محسوب می‌شوند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه شهرکرد که حامی مالی این تحقیق است، تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تحلیل اولیه داده‌ها

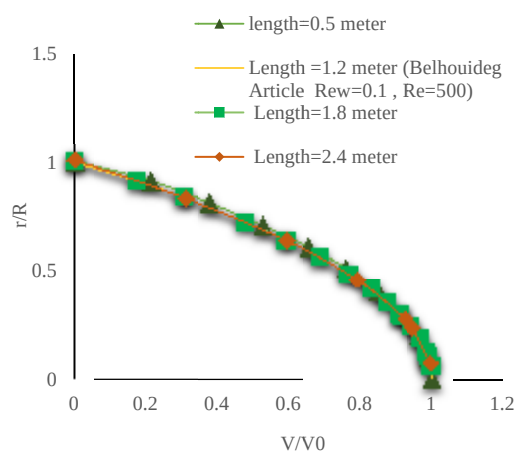
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، راهنمایی، ویرایش و بازبینی

مقاله، کنترل نتایج

نویسنده سوم: راهنمایی، بازبینی متن مقاله

نویسنده چهارم: راهنمایی، بازبینی متن مقاله

در ادامه اثر اعمال طول‌های مختلف لوله به عنوان عامل دیگری بر روند جریان سیال بررسی شد. شکل ۱۰، اثر طول‌های مختلف لوله از ۰/۶ تا ۲/۴ متر را بر پروفیل سرعت جریان عبوری از لوله نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش طول لوله مقادیر نسبت سرعت کلی سیال به سرعت محوری در مرکز لوله کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر با افزایش طول لوله اختلاف سرعت جریان بین نواحی نزدیک به دیواره و محور لوله کاهش یافته و در مجموع، سرعت جریان کاهش می‌یابد. می‌توان چنین استنباط کرد که افزایش طول لوله باعث کاهش سرعت نفوذی جریان در دیواره متخلخل لوله شده است.



شکل ۱۰- پروفیل سرعت محوری جریان عبوری از لوله با دیواره متخلخل در طول‌های لوله ۰/۵، ۱/۲، ۱/۸ و ۲/۴ متر در پژوهش حاضر و Belhouideg (2017)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای جریان تراکم‌ناپذیر عبوری از یک لوله با دیواره متخلخل با نتایج داده‌های حاصل از مطالعه Belhouideg (2017) مقایسه شد و انطباق مطلوبی بین نتایج سرعت محوری جریان عبوری در دو حالت به‌دست آمد. نتایج حاصل از بررسی تأثیر عدد رینولدز محیط متخلخل بر سرعت محوری نشان داد که سرعت تحت تأثیر افزایش عدد رینولدز محیط متخلخل افزایش و در نزدیک دیواره‌های محیط متخلخل کاهش می‌یابد.

همچنین نتایج نشان داد که در لوله با دیواره نفوذناپذیر، کاهش سرعت در نزدیکی دیواره بیشتر است، در حالی که در لوله با دیواره متخلخل، جریان تراوشی از دیواره باعث

separation and filtration performance. *Journal of Hazardous materials*, 190(1-3), 45-5.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.134>

10. Sussman, N. L., Gislason, G. T., Conlin, C. A. and Kelly, J. H., 1994. The Hepatix Extracorporeal Liver Assist Device: Initial Clinical Experience. *Artificial Organs*, 18, PP. 390-396. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.1994.tb02221.x>
11. Moussy, Y., 2000. Bioartificial kidney, II, A Convective Flow Model of a Hollow Fiber Bioartificial Renal tubule, *Journal of Biotechnology and Bioengineering*, 68, 153. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0290\(20000420\)68:2<153::aid-bit4>3.3.co;2-b](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0290(20000420)68:2<153::aid-bit4>3.3.co;2-b)
12. Moussy, Y., 2003. Convective Flow Through a Hollow Fiber Bioartificial Liver. *Journal of Artificial Organs*, 27, 1041-1049. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1594.2003.07074.x>
13. Vial, D. and Doussau, G., 2003b. The Use of Microfiltration Membranes for Seawater Pre-treatment Prior to Reverse Osmosis Membranes. *Journal of Desalination*, 153, 141-147. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(02\)01115-3](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(02)01115-3)
14. Bui, K., Dickey, M. D., and Girard F., 1994. Applications of porous media in food and beverage processing. *Journal of Food Engineering*, 22(1-4), 1-20. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2674-2_214
15. Girard, B. and Fukumoto, L. R., 2000. Membrane Processing of Fruit Juices and Beverages: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40, 91-157. <https://doi.org/10.1080/10408690091189293>
16. Berman A. S., 1953. Laminar Flow in Channels with Porous Walls. *Journal of Applied Physics*, 24. <https://doi.org/10.1063/1.1721476>
17. Yuan, S. W. and Finkelstein, A. B., 1956. Laminar flow with injection and suction through a porous wall. *Trans ASME*, 78, 719-724. <https://doi.org/10.1115/1.4013794>
18. Brady, J. F., 1984. Flow development in a porous channel and tube. *Physics of Fluids*, 27, 1061-1067. <https://doi.org/10.1063/1.864735>
19. Schmitz, P. and Prat, M., 1995. 3-D Laminar stationary flow over a porous surface with suction: Description at pore level. *AIChE Journal*, 41, 2212-2226. <https://doi.org/10.1002/aic.690411005>
20. Moussy, Y. and Snider, A. D., 2009. Laminar flow over pipes with injection and suction through the porous wall at low Reynolds number. *Journal of Membrane*

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها است.

منابع

1. Belhouideg, S. and Lagache, M., 2015. Experimental Determination of the Mechanical Behaviour of Compacted Exfoliated Vermiculite. *Journal of Strain*, 51, 101-109. <https://doi.org/10.1111/str.12125>
2. Bense, V. F, Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O. and Scibek, J., 2013. Fault Zone Hydrogeology. *Journal of Earth-Science Reviews*, 127, 171-192. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>
3. Kamar, I., Sattari, M., Mohammadi, A. H. and Ramjugernath, D., 2015. Reliable Method for the Determination of Surfactant Retention In Porous Media During Chemical Flooding Oil Recovery. *Fuel*, 158, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.05.013>
4. Vial, D. and Doussau, G., 2003a. Water treatment by ultrafiltration: Application to drinking water and wastewater. *Journal of Membrane Science*, 213(1-2), PP. 1-12. <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0631>
5. Bui, K., Dick, R., Moulin, G. and Galzy, P., 1998. Partial Concentration of Red Wine by Reverse Osmosis. *Journal of Food Science*, 53, 647-648. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1988.tb07776.x>
6. Peydayesh, M., Mohammadi, T. and Bakhtiari O., 2018. Effective treatment of dye wastewater via positively charged TETA-MWCNT/PES hybrid nanofiltration membranes. *Separation and Purification Technology*, 194, 488-502. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.070>
7. Hermans, S., Mariën, H., Goethem, C. V. and Vankelecom, I. F., 2015. Recent developments in thin film (nano) composite membranes for solvent resistant nanofiltration. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 8, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2015.01.009>
8. Liu, J., Ju, Y., Zhang, Y. and Gong, W., 2019. Preferential paths of airwater two-phase flow in porous structures with special consideration of channel thickness effects. *Scientific reports*, 9(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52569-9>
9. Bansal, S., von Arnim, V., Stegmaier, T. and Planck, H., 2011. Effect of fibrous filter properties on the oil-in-water-emulsion

32. Belhouideg, S., 2017. Study of water percolation in porous tubes. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(3), 237-245. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0030>
33. Belhouideg, S., and Lagache, M., 2014. Prediction of the effective permeability coefficient in random porous media using the finite element method. *Journal of Porous Media*, 17, 819-830. <https://doi.org/10.1615/jpormedia.v17.i9.60>
34. White, F. M., 2011. Fluid Mechanics, 7th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 345p.
35. Fox, R.W., McDonald, A. T. and Pritchard, P.J., 2015. Introduction to Fluid Mechanics, 9th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, PP .290.
36. Kaviani, M., 1995. Principles of Heat Transfer in Porous Media. New York, NY, USA: Springer. 150 p.
- Science, 327, 104-107. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.11.018>
21. Blatt, W. F., Dravid, A., Michaels, A. S. and Nelson, L., 1970. Solute Polarization and Cake Formation in Membrane Ultrafiltration: Causes, Consequences and Control Techniques. *Membrane Science and Technology*. Springer. 246p. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1851-4_4
22. Galowin, L. S., Fletcher, L. S. and Santis, M. J., 1974. Investigation of laminar flow in a porous pipe with variable wall suction, *AIAA Journal*, 12, 1585-1589. <https://doi.org/10.2514/3.49549>
23. Belfort, G., 1984. Fluid mechanics in membrane filtration: Recent developments. *Journal of Membrane Science*, 40, 123-147. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(89\)89001-5](https://doi.org/10.1016/0376-7388(89)89001-5)
24. Blunt, M., King, M. J. and Scher, H., 1992. Simulation and theory of two-phase flow in porous media. *Physical review letters*, 46, 7680-7686. <https://doi.org/10.1103/physrev.46.7680>
25. Nassehi, V., 1998. Modelling of combined Navier-Stokes and Darcy flows in crossflow membrane filtration. *Chemical Engineering Science*, 53. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(97\)00443-0](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(97)00443-0)
26. Gharibi, F. and Ashrafizaadeh, M., 2020. Darcy and inertial fluid flow simulations in porous media using the non-orthogonal central moments lattice Boltzmann method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 194, 107572. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107572>
27. Belhouideg, S., 2017. Modeling and Numerical Simulation of Fluid Flow in a Porous Tube with Parietal Suction. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(9), 447-456. <https://doi.org/10.12988/ces.2017.7330>
28. Shames, I. H., 2017. Mechanics of Fluid. 5th edition. CRC Press.
29. Bear, J., 2013. A review of Darcy's Low and it's application in porous media. *Transport in Porous Media*, 98(1), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s11242-013-0170-x>
30. Fetter, C. W., 2018. Applied Hydrogeology (4th ed.). Waveland Press. Long Grove. Illinois, 616 p.
31. Hazen, A., 1892. Some physical properties of sands and gravels, with special reference to their use in filtration. Massachusetts State Board of Health. *Annual Report*, 24, 539-556. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674600485.c25>

