



## شبیه‌سازی عددی نفوذ جریان مایع در یک محیط متخلخل به روش شبکه بولتزمن

ظفر نمازیان<sup>1\*</sup>، جعفر نمازیان<sup>2</sup>

1- مربی، مهندسی مکانیک، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج

2- فارغ التحصیل کارشناسی، مهندسی مکانیک، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج

\* صندوق پستی 7591493686، z.namazian@iauyasooj.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 بهمن 1395

پذیرش: 14 اردیبهشت 1396

ارائه در سایت: 06 خرداد 1396

کلید واژگان:

محیط متخلخل

جریان دوفازی

روش شبکه بولتزمن

سطح آبدوست

سطح آبگریز

### چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش شبکه بولتزمن جریان دو فاز در محیط متخلخل مورد مطالعه قرار گرفته است. یافتن آرایش بهینه برای محیط‌های متخلخل با نسبت تخلخل غیریکسان در سرتاسر محیط برای کم کردن میزان دبی نشتی و نفوذ سیال از اهداف این پژوهش است. روش انتخاب شده برای حل مسئله، روش عددی مزوسکوپی شبکه بولتزمن بر روی یک شبکه D2Q9 می‌باشد. برای ارزیابی کد فرترن مورد استفاده در شبیه‌سازی ها، ابتدا جریان دو فاز در کانال با سطح آب گریز و آب دوست و سپس قرارگیری قطره بر روی سطح با آبدوستی و آبگریزی های متفاوت شبیه‌سازی شده است. در ادامه میزان نفوذ سیال در محیط متخلخل با آرایش متفاوت بررسی شده و سپس میزان نفوذ سیال در محیط‌های متخلخل با جنس‌های متفاوت از نظر آبدوستی و آب‌گریزی مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتها نیز میزان دبی نشتی هر یک از محیط های متخلخل با آرایش متفاوت بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که ایجاد محیط متخلخل ترکیبی (از دو محیط با نسبت تخلخل‌های متفاوت) به نحویکه محیط با تخلخل پایین در قسمت زیرین قرار گیرد، از حیث کاهش نفوذ و نشتی بهینه خواهد بود. همچنین با آبدوست کردن سطح، نفوذ سیال درون محیط متخلخل نسبت به حالت آب‌گریز کندتر اتفاق می‌افتد.

## Numerical simulation of fluid flow penetration through porous medium using Lattice Boltzmann method

Zafar Namazian<sup>\*</sup>, Jafar Namazian

Department of Mechanical Engineering, Yasooj Branch, Islamic Azad University, Yasooj, Iran

\* P.O.B. 7591493686, Yasooj, Iran, z.namazian@iauyasooj.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 12 February 2017  
Accepted 04 May 2017  
Available Online 27 May 2017

#### Keywords:

Porous medium  
Two-phased flow  
Lattice Boltzmann method  
Hydrophilic surface  
Hydrophobic surface

### ABSTRACT

In the present study, modeling of two-phase flow through porous medium is performed by Lattice Boltzmann method; moreover, the porous medium with different porosity ratios is examined. The Shan-Chen-type (SC) multiphase lattice Boltzmann model at D2Q9 network is used to simulate the two phase flow. To validate the used Fortran code in the simulations, first, two-phase flow in channel with hydrophobic and hydrophilic surfaces, and then a droplet on the surface with different hydrophilic and hydrophobic surfaces are simulated. Achieving optimized array of porous medium which reduces the leakage flow rate and fluid penetration was the primary aim of our study. To achieve the mentioned purpose, first, the flow penetration through different porous medium arrays is compared. Then, effect of hydrophobicity on penetration is studied. Finally, the leakage flow rate of various arrays is investigated. The results indicate that utilizing a combined porous medium can drastically reduce the penetration and leakage. This optimized configuration has lower porosity in the underneath part. Also, the result shows when the surface is hydrophobic, the penetration of fluid through the porous medium is slower, compared with the hydrophilic surface.

### 1- مقدمه

بوده است. در صورت دسترسی به سنگ مناسب در محیط، سدهای سنگریزه-ای ابزاری مقرون به صرفه و سریع برای جلوگیری از سیلاب و اهداف کنترلی هستند. اما طراحی مناسب و رضایت‌بخش سدهای سنگریزه‌ای تنها با آگاهی از هیدرولیک جریان این نوع سدها میسر خواهد بود. پروفیل خط نشت در سدهای سنگریزه‌ای به دو دلیل مورد توجه است، نخست آنکه برخلاف سدهای خاکی که هدف آن‌ها کم کردن نفوذ است، بعضاً نفوذ عمده و قابل توجه است البته در مورد سدهای خاکی توجه به سطح نشت خروجی مهم است زیرا که در یک دبی خاص پایین دست سازه‌های سنگریزه‌ای و زهکش‌های معادن مستغرق خواهد شد. علاوه بر آن سطح نشت مشاهده شده

از دیدگاه کاربردی دست‌یابی به درکی صحیح از فیزیک جریان عبور کننده از محیط‌های متخلخل اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا که این نوع جریان در صنایع مختلف از جمله انتقال نفت و گاز در سنگ‌های متخلخل [1]، جریان در مخازن زیر زمینی و انتشار آلاینده‌های شیمیایی در اعماق زمین [2,3] و نفوذ جوهر در کاغذ [4] نقشی اساسی دارد. اغلب مثال‌های مذکور نه تنها به جریان‌های تک فاز بلکه به جریان‌های چندفازی مرتبط می‌شوند.

از سوی دیگر جریان آب در خاک و مسائل وابسته، توسط دانشمندان علوم خاک، نفت، محیط زیست و هیدروژئولوژی از دیر باز تاکنون مورد توجه

Please cite this article using:

Z. Namazian, J. Namazian, Numerical simulation of fluid flow penetration through porous medium using Lattice Boltzmann method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 79-89, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مدل‌های توسعه یافته براساس اعتبار روابط ساختاری (به عنوان مثال گسترش چند فاز قانن داری)، نیاز به برخی ورودی‌ها برای پارامترهای نیمه‌تجربی دارند (به عنوان مثال نفوذپذیری نسبی). همچنین این مدل‌ها مشکلاتی برای محاسبه عدم تجانس و اتصال منافذ پیچیده و مورفولوژی دارند [15]. در نتیجه شبیه‌سازی‌های با دیدگاه ماکرو همیشه نمی‌توانند اثرات مرتبط با ساختار میکرو در جریان‌های چند فاز را محاسبه کنند.

در مقابل شبیه‌سازی در مقیاس میکرو قادر به محاسبه مواردی از قبیل عدم تجانس، اتصال و رفتار جریان غیریکنواخت است که در مقیاس ماکروسکوپی به خوبی حل نمی‌شود. علاوه بر این، شبیه‌سازی در مقیاس میکرو می‌تواند اطلاعات دقیق محلی برای توزیع سیال و سرعت آن را فراهم کند و به صورت امیدوار کننده‌ای اجازه می‌دهد که مدل‌ها و معادلات ساختاری جدید در مقیاس ماکروسکوپی ساخته و آزمایش شوند.

از طرف دیگر روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی معمول مانند روش کسر حجمی سیال<sup>1</sup> و روش تنظیم سطح، جریان‌های چندفازی را با حل ماکروسکوپی معادلات ناویر استوکس همراه با یک روش مناسب برای رهگیری سطح بین دو فاز شبیه‌سازی می‌کنند. آنچه در استفاده از روش‌های کسر حجمی سیال و تنظیم سطح برای شبیه‌سازی در مقیاس میکرو در جریان‌های چندفازی در محیط متخلخل چالش برانگیز است، مشکلات موجود در مدل‌سازی و ردیابی دینامیک بین فازهاست. از دیگر مشکلات به کارگیری روش‌های مذکور آن است که اثرات سطحی بین مایع و جامد (به عنوان مثال ترشوندگی سطح) در ساختار منافذ پیچیده، که ناشی از فعل و انفعالات بین مایع و جامد در اندازه میکرو هستند، لحاظ نمی‌شود.

برخلاف روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی که مبتنی بر حل‌های متغیرهای ماکروسکوپی مانند سرعت، فشار و چگالی هستند، روش شبکه بولتزمن یک روش شبه مولکولی است که با تابع توزیع ذرات مجموعه‌ای از مولکول‌ها کار می‌کند. در این روش که براساس مدل‌های میکروسکوپی و معادلات سنتیک مزوسکوپی [16] ساخته شده است، متغیرهای ماکروسکوپی از انتگرال لحظه‌ای تابع توزیع ذرات به دست می‌آید.

روش شبکه بولتزمن روشی مناسب برای حل جریان در هندسه‌های پیچیده می‌باشد. تحقیقات متعددی به موفقیت آمیز بودن این روش در مطالعه‌ی پدیده‌ی پخش و ترشوندگی [17-19]، ایجاد و برخورد حباب‌ها [22-20] و شبیه‌سازی جریان درون محیط‌های متخلخل اذعان نموده‌اند [23-25]. برخلاف روش‌های سنتی، در روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی جریان چندفازی، سطح مایع-مایع یک خط مادی نیست بلکه یک سطح پخش شده با عرض محدود است و شیب موثر خط تماس توسط دیفیوژن نسبی دو سیال در مجاورت خط تماس ایجاد می‌شود. از این‌رو نیازی به تکنیک‌های پیچیده ردیابی سطح تماس در روش‌های سطح تماس پخشی وجود ندارد و تغییر شکل و انتقال سطح تماس به عنوان یکی از نتایج شبیه‌سازی مشخص می‌شود [26]. لازم به ذکر است که برای تعیین ویژگی‌های جریان گذرکننده از منافذ، استفاده از میکرومدل‌های فیزیکی (که غالباً از شبکه‌های مویرگی شبه دو بعدی ساخته می‌شوند) توصیه می‌شود [27].

از طرف دیگر تعدادی مدل چندفازی برای استفاده در روش شبکه بولتزمن پیشنهاد شده است که در این میان پنج مدل گردایان رنگ، پتانسیل ذرات داخلی، انرژی آزاد، تئوری میدان متوسط و دیفیوژن-اتصال تثبیت شده محبوب‌تر می‌باشند. مرور تفصیلی مدل‌های چندفازی مذکور در مرجع

در پایین دست سازه‌های سنگریزه‌ای یکی از شرایط مرزی مسئله نشت برای مدل‌سازی فشار منفذی است. آگاهی از موقعیت سطح نشت در وجه پایین دست سدهای خاکی، محاسبات فشار منفذی را تسهیل می‌کند. آگاهی از توزیع فشار منفذی در بدنه سدهای سنگریزه‌ای در محاسبات مربوط به هدایت هیدرولیکی بسیار مهم است [5].

از این رو تحقیقات متعددی جهت بررسی پروفیل خط نشت در شرایط مختلف جریان در بالادست و پایین دست سازه‌های سنگریزه‌ای انجام شده است [5-7]. یکی از نخستین مطالعات انجام شده به روی مدل‌سازی پروفیل خط نشت به روش جریان متغیر تدریجی توسط ویلکینز انجام شده است [8]. در ادامه تحقیقات این حوزه، استفنسون [9] با استفاده از انتگرال‌گیری تحلیلی از معادله دیفرانسیل معمولی به مطالعه جریان متغیر تدریجی پرداخت. اما معادله تحلیلی استفنسون تنها قابل تعمیم به جریان آشفته کاملاً توسعه یافته می‌باشد.

مطالعه‌ی آزمایشگاهی جریان متغیر تدریجی درون مصالح سنگریزه‌ای بری و هانسن [10] نشان داد که در شرایط کوچک بودن گردایان هیدرولیکی، تطابق بسیار خوبی بین نتایج جریان متغیر تدریجی و نتایج آزمایشگاهی وجود دارد. آن‌ها اذعان نمودند که بسیاری از فرضیات مربوط به جریان‌های متغیر تدریجی برای جریان درون محیط‌های متخلخل قابل کاربرد است. اما یکی از فرضیات محدود کننده در این زمینه توزیع فشار هیدرو استاتیک در راستای قائم می‌باشد.

سامانی و همکاران [11] با ارائه یک تعریف جدید از مفاهیم شعاع و افت هیدرولیکی و تلفیق آن با رابطه پیوستگی به نتایج جدیدی دست یافتند. در تحقیقی دیگر از سامانی و همکاران [12] با استفاده از مفهوم حجم کنترل و تلفیق آن با معادلات روندیابی مخزن، الگوریتم جدیدی برای روندیابی سیلاب درون سدهای سنگریزه‌ای ارائه کردند.

آسیابان و همکارانش [13] روشی عددی را برای پیش‌بینی پروفیل سطح آب در سدهای سنگریزه‌ای ناهمگون توسعه دادند. روش پیشنهاد شده توسط این محققان، شکل اصلاح شده معادله جریان متغیر را به روش گام مستقیم حل می‌نماید. مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل ارائه شده و نتایج تجربی نشان دهنده‌ی توانایی مدل است.

مرادی و امیری [14] رابطه‌ی جدیدی بین گردایان هیدرولیکی و سرعت در محیط متخلخل ارائه دادند. آن‌ها هدف تحقیق خود را ارائه‌ی روابط با بازه‌ی کاربردی بیشتر معرفی کردند به گونه‌ای که در طیف گسترده‌تری از تخلخل و دانه‌بندی ذرات سازنده محیط متخلخل قابل کاربرد باشد. بدین منظور با استفاده از بخش عمده‌ای از نتایج آزمایشگاهی موجود و تجزیه و تحلیل آن‌ها، رابطه‌ی جدیدی بین گردایان هیدرولیکی و سرعت در محیط متخلخل ارائه کردند.

همان‌گونه که از بررسی ادبیات پژوهش مشخص است، محققان از روش‌های مختلفی برای مطالعات خود بهره گرفته‌اند. همچنین به علت دشواری تحلیل‌های تجربی، استفاده از شبیه‌سازی عددی به عنوان راهکاری مفید و مکمل متداول می‌باشد. اما شناسایی فیزیک جریان چندفازی در محیط متخلخل مستلزم بکارگیری ابزار عددی دقیق و قابل اعتمادی می‌باشد. جریان‌های چندفازی در محیط‌های متخلخل معمولاً با استفاده از شبیه‌سازی در مقیاس ماکرو مدل می‌شوند، که در آن معادله پیوستگی همراه با معادله حرکت، معادله تعادل گونه‌ها حل شده و معادلات ساختاری مانند قانون داریسی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

<sup>1</sup> Volume of fluid (VOF)

"شکل 2" نمونه‌ای از محیط متخلخل ایجاد شده از برنامه‌ی توصیف شده را نشان می‌دهد. عدد تخلخل از طریق رابطه‌ی (1) تعریف می‌شود. در این رابطه  $V_{pores}$  حجم خالی در داخل محیط متخلخل و  $V_{total}$  حجم کل محیط را نشان می‌دهد.

$$\epsilon = \frac{V_{pores}}{V_{total}} \quad (1)$$

دو عدد تخلخل 0.75 و 0.85 برای انجام تحقیق حاضر انتخاب شده است.

چنانچه ذکر شد، علاوه بر بررسی اثر میزان تخلخل بر نفوذپذیری، دستیابی به آرایش‌های محیط متخلخل با تخلخل‌های متفاوت نیز مورد نظر می‌باشد. "شکل 3" حالت‌های مختلف مورد مطالعه در این پژوهش را نشان می‌دهد.

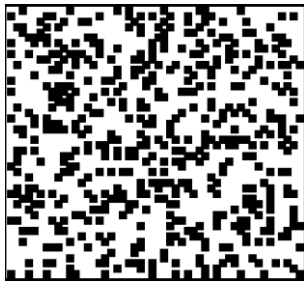


Fig. 2 A sample of porous medium with  $\epsilon = 0.75$

شکل 2 نمونه‌ای از محیط متخلخل با عدد تخلخل 0.75

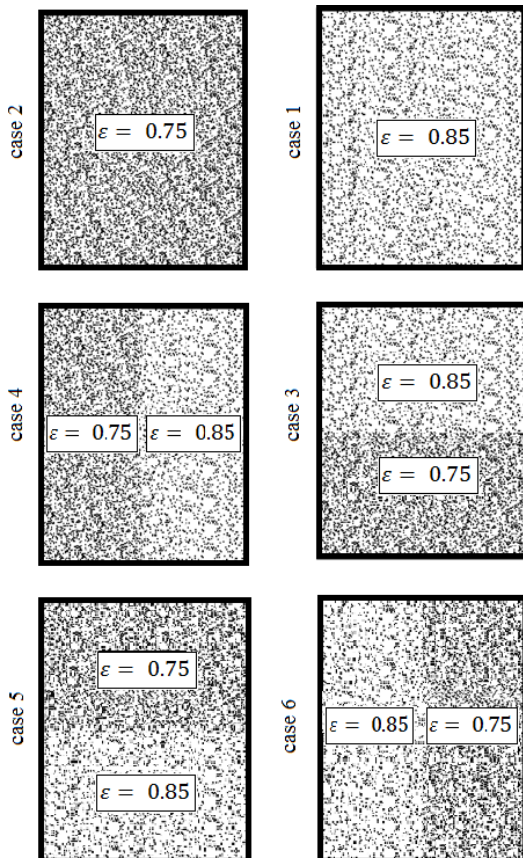


Fig. 3 Different arrangement of the porous medium modeled in this paper, the solid spots in the porous medium have been chosen randomly.

شکل 3 آرایش‌های متفاوت محیط متخلخل مدل شده در این مقاله، نقاط جامد درون محیط متخلخل به روش تصادفی انتخاب شده‌اند.

[28] انجام شده است.

در این تحقیق بررسی رفتار پروفیل سطح آب درون سازه‌های سنگریزه-ای به همراه عمق خروجی به ازای آرایش‌های مختلف محیط متخلخل و میزان ترشوندگی سطح موردنظر است. جهت نیل به هدف مطروحه مدل‌سازی جریان محیط متخلخل به روش شبکه بولتزمن و با استفاده از مدل پتانسیل ذرات داخلی، که به نام مدل شان-چن [29] نیز شناخته می‌شود، انجام شده است.

آرایش‌های مختلف محیط متخلخل با استفاده از تغییر نسبت تخلخل در قسمت‌های مختلف به وجود آمده است. در ابتدا میزان نفوذ سیال در محیط متخلخل با آرایش‌های مطالعه شده است و سپس تأثیر آب‌دوستی و آب‌گریزی ذرات جامد تشکیل دهنده محیط متخلخل در نفوذ سیال به داخل آن بررسی شده است. در انتها نیز اثر آرایش محیط متخلخل بر روی دبی سیال نشتی تحقیق شده است.

## 2- هندسه و روش حل

"شکل 1" دامنه حل استفاده شده در تحقیق حاضر را نشان می‌دهد. در این مسئله‌ی دو بعدی، سیال نخست در سمت چپ جسم متخلخل به حالت سکون قرار دارد. با گذشت زمان سیال به درون جسم متخلخل نفوذ پیدا کرده و در سمت راست محیط متخلخل جریان می‌یابد. محدودیت اعمال شده در مسئله‌ی حاضر به نحوی است که با گذشت زمان و نفوذ جریان به درون جسم متخلخل، از ارتفاع اولیه سیال کاسته نخواهد شد ( $H_1$  در طول حل ثابت و برابر 100 واحد است). لازم به ذکر است که ارتفاع سیال در سمت راست با توجه میزان دبی می‌تواند تغییر کند.

در این تحقیق بررسی نفوذ سیال در محیط متخلخل با عدد تخلخل و آرایش‌های متفاوت آن مورد نظر می‌باشد. همچنین شناسایی حالت بهینه‌ی چینش محیط متخلخل جهت کاهش دبی جریان در حالت پایا از اهداف این پژوهش است. برای نیل به هدف مذکور نیاز است تا در وهله‌ی اول روشی مناسب جهت ایجاد تخلخل اتخاذ گردد و سپس آرایش‌هایی بصورت پیش فرض در نظر گرفته شود. در ادامه‌ی این بخش پس از معرفی روش ایجاد محیط متخلخل، روش شبکه‌ی بولتزمن استفاده شده توصیف می‌شود و شرایط مرزی استفاده شده معرفی می‌گردد.

### 2-1- ایجاد محیط متخلخل

در این مقاله از روش تصادفی برای تعیین مکان نقاط جامد برای تولید محیط متخلخل استفاده شده است. نقاط پس از انتخاب به صورت تصادفی، شرط مرزی بونس یک که شرط مرزی سطوح جامد است به آنها اعمال می‌گردد. در این روش ذرات انتخاب شده به صورت مربعی مدل می‌شوند. عدد تخلخل به صورت پارامتر ورودی به مسئله داده می‌شود.

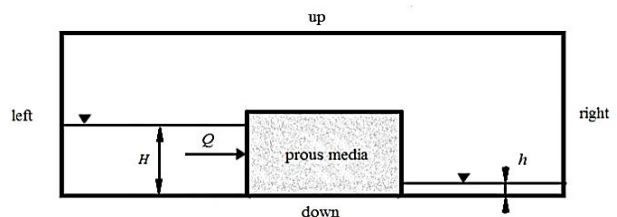


Fig. 1 The solution domain

شکل 1 دامنه حل

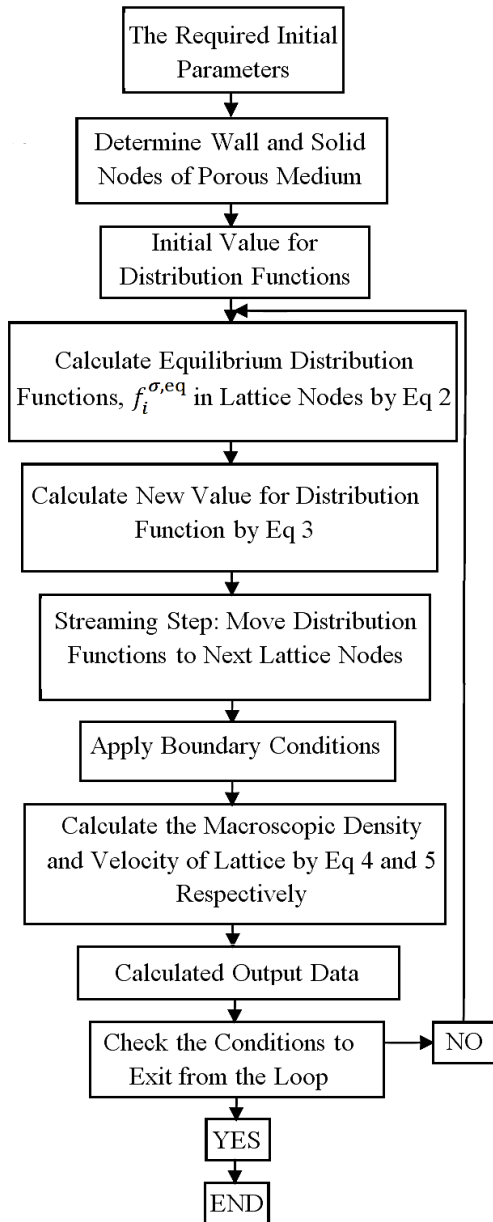


Fig. 4 Schematic of solution algorithm

شکل 4 شماتیک الگوریتم حل

گام زمانی هر برابر واحد در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه (4) ضریب رهاسازی باید بزرگتر از 0.5 باشد تا میزان لزجت سیال مثبت شود.

معادله (3) شامل دو مرحله جاری شدن و برخورد است. با حل رابطه‌ی (3) مقادیر جدید توابع توزیع محاسبه شده و سپس مرحله جاری شدن اجرا می‌شود. در این مرحله مقادیر توابع توزیع تمامی گره‌ها در راستای خود، بر روی گره‌های هم‌جوار ریخته می‌شوند. در انتها با اعمال شرایط مرزی، مقادیر چگالی و سرعت ماکروسکوپی تمامی شبکه به ترتیب طبق رابطه‌های (5) و (6) محاسبه می‌شود.

$$\rho_\sigma = \sum_{i=1}^8 f_i^\sigma \quad (5)$$

$$\vec{u} = \frac{\sum_{i=1}^8 f_i^\sigma \vec{e}_i}{\psi \sum_{i=1}^8 \frac{\rho_\sigma}{\tau_\sigma}} \quad (6)$$

رابطه‌های (5) و (6) برای هر فاز اجرا می‌شود.

همان‌گونه که در "شکل 3" نشان داده شده است، برای تحقیق حاضر شش آرایش مختلف در نظر گرفته شده است. در حالت‌های 1 و 2 تمام محیط تخلخل یکسانی دارد و برای آن‌ها به ترتیب میزان تخلخل 0.75 و 0.85 نظر گرفته شده است. در حالت‌های 3 و 6 دو محیط متخلخل با میزان تخلخل متفاوت بر روی یکدیگر قرار داده شده‌اند. در حالت‌های 4 و 5 محیط‌های متخلخل ترکیبی، از دو محیط متخلخل در مجاورت یکدیگر تولید شده‌اند. حالات 3 تا 6 دارای جرم یکسان ولی دارای آرایش متفاوتی برای محیط متخلخل هستند.

## 2-2- روش شبکه بولتزمن و مدل شان و چن

روش انتخاب شده برای حل مسئله‌ی مطروحه روش عددی مزوسکوپیک شبکه بولتزمن بر روی یک شبکه‌ی D2Q9 می‌باشد. در روش شبکه بولتزمن، الگوریتم حل به گونه‌های مختلفی بیان می‌شود. انتخاب الگوریتم مناسب به منظور دستیابی به نتایج صحیح بسیار حائز اهمیت است. با توجه به هندسه‌ی مورد تحقیق، روش دیگرام گردشی برای پژوهش حاضر مناسب تشخیص داده شد. الگوریتم حل مورد استفاده در "شکل 4" نشان داده شده است.

مطابق "شکل 4"، ابتدا پارامترهای اولیه لازم به مسئله داده می‌شود. در مرحله بعد نقاط دیواره و نقاط جامد موجود در محیط متخلخل مشخص می‌شود. سپس توابع توزیع تعادلی اولیه  $f_{i=0,\dots,8}^{\sigma,eq}$  در نظر گرفته می‌شوند. پس از این مرحله وارد حلقه تکرار می‌شویم و تا ارضا شرایط موردنظر از حلقه خارج نمی‌شویم. سپس درون حلقه طبق رابطه (2) مقادیر توابع توزیع تعادلی،  $f_i^{\sigma,eq}$  در گره‌های سیال محاسبه می‌شوند.

$$f_i^{\sigma,eq}(\vec{x}, t) = w_i \rho_\sigma \left[ 1 + 3\vec{e}_i \vec{u}_\sigma^{eq} + \frac{9}{2} (\vec{e}_i \vec{u}_\sigma^{eq})^2 - \frac{3}{2} \vec{u}_\sigma^{eq} \vec{u}_\sigma^{eq} \right]$$

$$w_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & , i = 0 \\ \frac{1}{9} & , i = 1, 2, 3, 4 \\ \frac{1}{36} & , i = 5, 6, 7, 8 \end{cases}$$

$$e_i = \begin{cases} [0, 0] & , i = 0 \\ \left[ \cos\left((i-1)\frac{\pi}{2}\right), \sin\left((i-1)\frac{\pi}{2}\right) \right] & , i = 1, 2, 3, 4 \\ \sqrt{2} \left[ \cos\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right), \sin\left((2i-1)\frac{\pi}{4}\right) \right] & , i = 5, 6, 7, 8 \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (2)،  $\rho_\sigma$  و  $\vec{u}_\sigma^{eq}$  به ترتیب سرعت و چگالی ماکروسکوپیک برای فاز  $\sigma$  است. همچنین مقادیر  $w_i$  و  $e_i$  به ترتیب ضرایب وزنی و سرعت‌های گسسته می‌باشند که برای شبکه‌ی D2Q9 آورده شده است. رابطه‌ی (3) رابطه‌ی ارضا شده در مرحله‌ی تصادم را نشان می‌دهد.

$$f_i^\sigma(\vec{x} + \vec{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i^\sigma(\vec{x}, t) - \frac{f_i^\sigma - f_i^{\sigma,eq}(\vec{x}, t)}{\tau_\sigma} \quad (3)$$

در معادله (3) از تقریب باتانگار-گراس-بروک (BGK) استفاده شده است. در رابطه (3)،  $\tau_\sigma$  ضریب رهاسازی می‌باشد. میزان ضریب رهاسازی و لزجت سیال از رابطه (4) به هم مرتبط می‌شوند:

$$v = \left( \tau_\sigma - \frac{1}{2} \right) c_s^2 \delta t \quad (4)$$

در رابطه (4) لزجت سیال،  $c_s = \frac{c}{\sqrt{3}}$  سرعت صوت شبکه و  $c = \frac{\delta x}{\delta t}$  نسبت فاصله شبکه  $(\delta x)$  و گام زمانی  $(\delta t)$  می‌باشد. در این مساله فاصله شبکه و

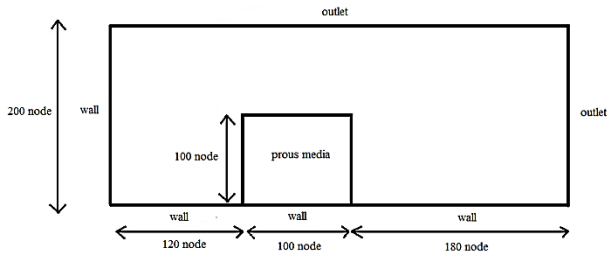


Fig. 5 The problem boundary condition

شکل 5 شرایط مرزی مسئله

"شکل 6" زاویه تماسی ( $\theta$ ) یک قطره از سیالی انحلال ناپذیر در تماس با سطح و سیال ثانویه را نشان می‌دهد. برای زاویه کمتر از 90 درجه، سیال تمایل به خیس کردن سطح دارد، در این صورت به سطح، ترشونده و یا آبدوست می‌گویند؛ برای زاویه تماس بزرگ‌تر از 90 درجه، سیال به شکل فشرده درمی‌آید و روی سطح پخش نمی‌شود، در این حالت سطح ترنشونده و آب‌گریز نامیده می‌شود. در حالتی که زاویه تماس بین سطوح جامد و سیال 90 درجه است، وضعیت خنثی نامیده می‌شود.

برای پیش‌بینی زاویه تماسی می‌توان از مدل یانگ (رابطه (12)) استفاده نمود. در این رابطه  $\sigma_{s2}$  و  $\sigma_{s1}$  به ترتیب میزان کشش میان سیال 1 و 2 با سطح جامد را نشان می‌دهند. همچنین  $\sigma_{12}$  نیز میزان کشش سطحی میان دو سیال را تعیین می‌کند.

$$\cos(\theta) = \frac{\sigma_{s2} - \sigma_{s1}}{\sigma_{12}} \quad (12)$$

هانگ و همکارانش [31] مدل یانگ را برحسب ضرایب کنش داخلی  $G_c$ ، ضریب چگالی  $G_c \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{2}$  و پارامترهای مربوط به کشش میان سیال و سطح  $G_{ads,1}$  و  $G_{ads,2}$  بازنویسی نمودند. رابطه‌ی (13) مدل آن‌ها را نشان می‌دهد.

$$\cos(\theta) = \frac{G_{ads,2} - G_{ads,1}}{G_c \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{2}} \quad (13)$$

در رابطه‌ی (13) پارامتر  $\rho_i$  مقدار چگالی در حالت تعادل برای هر یک از دو سیال (و یا فاز) را نشان می‌دهد. در تحقیق حاضر با استفاده از فرض ساده کننده‌ی  $G_{ads,1} = -G_{ads,2}$  و تغییر پارامتر  $G_{ads,1}$ ، دستیابی به شرایط مختلف آب‌گریزی و یا آبدوستی سطح محقق شده است.

### 3- بررسی نتایج

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ارائه شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. ابتدا جهت ارزیابی عملکرد کد نوشته شده به زبان فرتن، دو شبیه‌سازی جریان دو فاز در کانال با سطح آب‌گریز و آب‌دوست و قراگیری قطره بر روی سطح جامد انجام شده است.

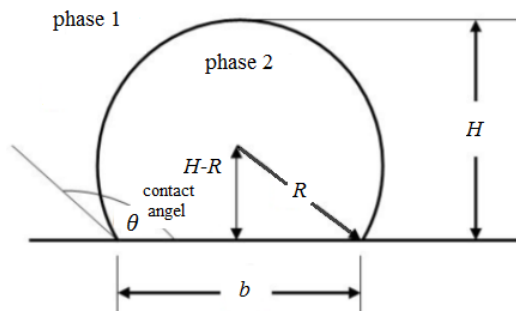


Fig. 6 The contact angle between two insoluble fluids

شکل 6 زاویه تماس بین دو سیال انحلال ناپذیر

در معادله (3) مقدار تعادلی سرعت ( $\vec{u}_{eq}$ ) از معادله (7) بدست می‌آید.

$$\vec{u}_{eq} = \vec{u} + \frac{\tau_a \vec{F}_{total}}{\rho(\vec{x})} \quad (7)$$

در معادله  $\vec{F}_{total}$  مجموع تمام نیروهای وارد بر هر ذره شامل نیروهای بین ذرات سیال، نیروی بین سطح جامد و ذره سیال و نیروی حجمی که در اینجا نیرو گرانش می‌باشد.

برای مدل‌سازی نیروهای بین مولکولی بین ذرات سیال از مدل شان و چن استفاده شده است [29]. در این مدل نیروهای بین مولکولی از طریق رابطه‌ی (8) بیان می‌شود.

$$\vec{F}_{fluid-fluid}(\vec{x}, t) = -G\psi(\vec{x}, t) \sum_{i=1}^8 w_i \psi(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t) \vec{e} \quad (8)$$

پارامتر  $G$  در رابطه‌ی (8) معرف قدرت تعامل بین مولکولی است. مقدار منفی و مثبت پارامتر  $G$  (مقدار  $G$  در طی حل ثابت است) به ترتیب جاذبه و دافعه را بین ذرات سیال ایجاد می‌نماید. دو پارامتر  $w$  و  $\psi$  در رابطه‌ی (8) نیز به ترتیب معرف ضرایب وزنی و تابع پتانسیل تعامل بین مولکولی هستند. روابط متعددی برای تابع پتانسیل پیشنهاد شده است. رابطه‌ی پیشنهاد شده توسط هی و دولن برای توصیف ارتباط تابع پتانسیل و سایر پارامترهای موثر در معادله حالت، منطبق با رابطه (9) می‌باشد [30].

$$P = \rho RT + \frac{GRT}{2} \psi^2(\rho) \quad (9)$$

ترم دوم در سمت راست این معادله بیانگر قسمت غیرایده‌آل معادله حالت است و نشان دهنده‌ی نیروهای بین مولکولی است. در شبکه D2Q9 مقدار  $RT = 1/3$  می‌باشد.

در سطح جامد و سیال برهمکنش بین سیال و جامد باید در نظر گرفته شود. بنابراین نیروی اعمالی بر ذرات سیال که در مجاورت سطح جامد قرار دارند از رابطه (10) محاسبه می‌شود.

$$\vec{F}_{solid-fluid}(\vec{x}, t) = -G_{ads} \rho(\vec{x}) \sum_{i=1}^8 w_i s(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t) \vec{e} \quad (10)$$

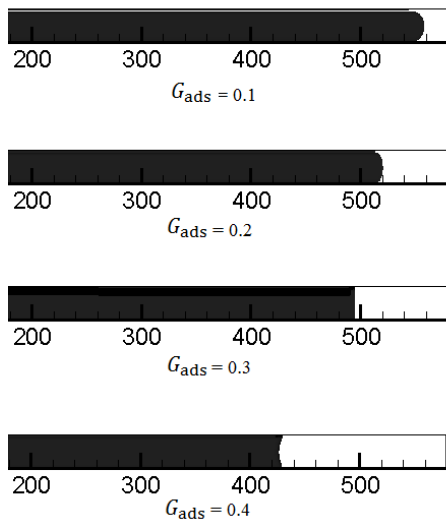
در رابطه (10)  $G_{ads}$  نشان دهنده برهمکنش بین سیال و جامد بوده و می‌تواند آب‌دوست بودن و آب‌گریز بودن سطح را کنترل کند. مقدار  $G_{ads}$  برای فازهای مختلف سیال متفاوت است. همچنین  $s$  تابع دو مقداری بوده و برای ذره سیال  $s = 0$  و برای ذره جامد  $s = 1$  می‌باشد. نیروی گرانش از رابطه (11) محاسبه می‌شود.

$$\vec{F}_g(\vec{x}) = \rho(\vec{x}) \vec{g} \quad (11)$$

که در رابطه (11)  $\vec{g}$  شتاب گرانش می‌باشد.

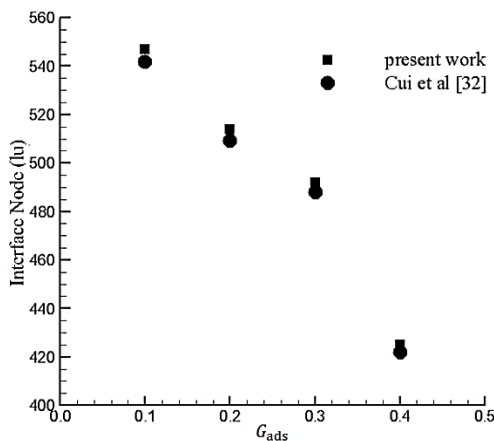
### 3-2- سایر جزئیات حل

اختصاص شرایط مرزی مناسب و به‌کارگیری نودهای کافی از شرایط ضروری هر حل عددی است. "شکل 5" شرایط مرزی به‌کار رفته و تعداد نودهای اختصاص داده شده در وجه‌های مختلف را نشان می‌دهد. مرزهای چپ و پایین شرط مرزی دیواره و مرزهای بالا و راست شرط خروجی را ارضا می‌نمایند. برای اعمال شرط عدم لغزش بر روی دیوار و همچنین برای نقاطی که مشخص‌کننده ذرات جامد موجود در محیط متخلخل هستند از شرط مرزی بونس یک استفاده شده است. علاوه بر میزان تخلخل و نحوه‌ی چیدمان محیط‌های متخلخل در مجاورت یکدیگر، میزان آبدوستی و آب‌گریزی سطح نیز در میزان نفوذ و مقدار دبی نشتی اثرگذار است. ترشوندگی یک سطح نسبت به سیال و به اصلاح آبدوست یا آب‌گریز بودن سطح، بستگی به زاویه تماس  $\theta$  بین سیال و سطح جامد دارد.



**Fig. 8** The obtained result for the two-phase flow in channel with hydrophobic and hydrophilic surface at the time  $t = 2000$ ls after initial condition for different values  $G_{ads}$

شکل 8 نتایج بدست آمده برای جریان دو فاز در کانال با سطح آب گریز و آب دوست در زمان  $t = 2000$ ls بعد از شرط اولیه برای مقادیر متفاوت  $G_{ads}$



**Fig. 9** The contact area location of the phase 1 and 2 at the time  $t = 2000$ ls based on different values  $G_{ads}$  and compared with the results obtained by Jing Cui et al. [32]

شکل 9 محل قرارگیری سطح تماس فاز 1 و 2 در زمان  $t = 2000$ ls برحسب مقادیر متفاوت  $G_{ads}$  و مقایسه با نتایج بدست آمده توسط جینگ کوی و همکاران [32]

به‌گونه‌ای تنظیم شده است که  $\rho_1 = 0.0799$  و  $\rho_2 = 2.71$  باشد. همچنین میزان  $G_c = 0.9$  در نظر گرفته شده است.

زاویه تماس میان قطره و سطح جامد را می‌توان به کمک پارامترهای هندسی مسئله محاسبه کرد (شکل 6). برای این منظور از روابط (15) و (16) استفاده می‌شود.

$$\theta = \pi - \arctan \left[ \frac{b}{2(R-H)} \right] \quad (15)$$

$$r = \frac{h}{2} + \frac{b^2}{8h} \quad (16)$$

مسئله اصلی در اندازه‌گیری پارامترهای هندسی فوق، تعیین موقعیت فصل مشترک می‌باشد، چراکه در واقع فصل مشترک ایجاد شده در مسئله دارای ضخامتی در حد چند واحد است. در این جا موقعیت فصل مشترک محلی قرار

### 1-3- جریان دو فاز در کانال با سطح آب گریز و آب دوست

در مورد اول برای ارزیابی کد ذکر شده، جریان دو فاز در کانال با سطح آب گریز و آب دوست شبیه‌سازی شده است. دامنه حل جریان با شرایط مرزی در شکل (7) نشان داده شده است. جریان سیال (فاز 2) از مرز سمت چپ و با سرعت  $u_{in}$  وارد دامنه حل می‌شود. سیال جایگزین گاز (فاز 1)، که در ابتدای حل در سراسر دامنه حل وجود دارد، می‌شود. نسبت چگالی فاز 2 به فاز 1 برابر 10 در نظر گرفته شده است. تعداد نقاط در راستای افق برابر 600 و در راستای عمود برابر 30 در نظر گرفته شده است. شرط مرزی اعمال شده در ورودی به صورت سرعت ورودی ( $v = 0$  و  $u = u_{in}$ ) و در مرز خروجی (مرز سمت راست) از شرط مرزی توسعه یافتگی ( $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0$ ) استفاده شده است. در بالا و پایین کانال دیواره قرار دارد و از شرط مرزی بونس بک برای مدل سازی استفاده شده است. در اینجا رینولدز که به صورت رابطه (14) تعریف می‌شود برابر 100 می‌باشد.

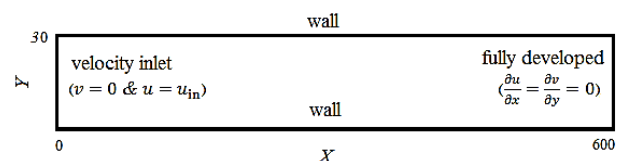
$$Re = \frac{u_{in}h}{\nu} \quad (14)$$

در رابطه (14)،  $h$  ارتفاع کانال و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیکی سیال می‌باشد. همچنین  $G = 0.6$  و  $\tau_a = 0.85$  در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. جریان برای مقادیر متفاوت  $G_{ads,1} = G_{ads,2} = G_{ads}$  بر روی دیواره مدل شده است. در این قسمت از نیروی گرانش صرف‌نظر شده است.

نتایج به‌دست آمده و محل قرارگیری مرز فاز 1 و فاز 2 در زمان  $t = 2000$ ls بعد از شرط اولیه در "شکل 8" برای مقادیر متفاوت  $G_{ads}$  نشان داده شده است. همچنین در "شکل 9" محل قرارگیری سطح تماس فاز 2 و فاز 1 در زمان  $t = 2000$ ls برحسب مقادیر متفاوت  $G_{ads}$  نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده در کار حاضر با نتایج بدست آمده توسط جینگ کوی و همکاران [32] در "شکل 9" مقایسه شده است و تطابق خوبی مشاهده می‌شود. مقادیر  $G_{ads} = 0.4$  نشان دهنده سطح آب دوست و  $G_{ads} = 0.1, 0.2, 0.3$  نشان دهنده سطح آب گریز می‌باشد. با کاهش میزان آب گریزی افزایش می‌یابد. با توجه به "شکل‌های 8 و 9" با افزایش آب‌گریزی محل قرارگیری سطح تماس فاز 2 و فاز 1 در فاصله بیشتری از ورودی قرار دارد.

### 2-3- شبیه‌سازی قرارگیری قطره بر روی سطح

در مورد دوم برای ارزیابی کد ذکر شده، قرارگیری قطره بر روی سطح شبیه‌سازی شده است. برای اندازه‌گیری زاویه تماسی میان قطره و دیوار جامد، سیالی به شکل مربع و با طول هر ضلع 100 واحد به صورت مماس بر دیواره قرار داده شده است (شکل 10). در انجام شبیه‌سازی‌های این بخش، دو مرز بالا و پایین به صورت مرز جامد و با شرط مرزی بونس بک مدل شده‌اند. همچنین برای مرزهای چپ و راست از شرط مرزی پریودیک استفاده شده است. با اختیار نمودن مقادیر مختلف و معینی برای  $G_{ads}$  زاویه تماسی با پایا شدن حل قابل محاسبه خواهد بود. در این شبیه‌سازی میزان پارامترها



**Fig. 7** The solution domain of two-phase flow in the channel with the hydrophobic and hydrophilic surface

شکل 7 دامنه حل جریان دو فاز در کانال با سطح آب گریز و آب دوست

### 3-3- نفوذ سیال به محیط متخلخل

هدف این بخش از تحقیق بررسی نفوذ سیال به محیط متخلخل است. چنانچه پیش از این بیان شد، در انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه سطح سیال در پشت محیط متخلخل ثابت نگه داشته می‌شود. در هر مرحله تکرار سطح سیال که به دلیل نفوذ در داخل محیط متخلخل کم شده است، در سطح بالا جبران می‌شود. در این شبیه‌سازی چگالی فازها برابر  $\rho_1 = 0.0799$  و  $\rho_2 = 2.71$  و همچنین مقدار  $G = -6$  باشد. میزان ضریب رهاسازی برای هر دو فاز برابر واحد در نظر گرفته می‌شود.

نخست اثر آرایش تخلخل بر میزان نفوذ بررسی می‌شود. برای نمایش بهتر نرخ نفوذ در ماده متخلخل از پارامتر بی‌بعد  $h^+$  که به صورت نسبت عمق نفوذ سیال (فاز 2)  $(h)$  داخل محیط متخلخل در هر گام زمانی به طول کلی ماده متخلخل  $(L)$  تعریف شده است (رابطه (17) شکل (12)).

$$h^+ = \frac{h}{L} \quad (17)$$

پارامتر بی‌بعد  $h^+$  تغییرات نرخ عبور سیال از محیط متخلخل را نشان می‌دهد. در این بخش از  $G_{ads,2} = 0$ ، که نمایانگر محیط متخلخل خنثی است، استفاده شده است. همچنین در تمامی حالات میزان شتاب گرانش در واحد شبکه برابر  $g = 0.002 \text{ lu/ls}^2$  در نظر گرفته شده است. "شکل 13" میزان نفوذ سیال به محیط متخلخل حالت 1 را با گذشت زمان نشان می‌دهد.

"شکل 14" سرعت نفوذ سیال به محیط‌های متخلخل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با کاهش نسبت تخلخل از مورد 1 به 2 متوسط نفوذ به میزان چشمگیری کاهش یافته است. علت این امر افزایش سطوح جامد و در نتیجه افزایش نیروی مقاوم سطح می‌باشد. در مقایسه بین حالت‌های 3 تا 6، کمترین میزان نفوذپذیری برای حالت 3 بدست آمده است. حالت‌های 3 تا 6 بدین جهت با هم مقایسه شده اند که در این حالات جرم یکسانی برای تولید محیط متخلخل مورد نیاز است.

از دیگر نکات قابل توجه "شکل 14" آن است که میزان نفوذپذیری دو حالت 2 و 3 تقریباً برابر است. همچنین در بین حالت‌های بررسی شده نفوذپذیری حالت 6 بیشترین مقدار و تقریباً برابر با حالت 1 است. در توجیه شرایط گزارش شده می‌بایست توجه داشت که فشار با افزایش عمق سیال در پشت محیط متخلخل افزایش می‌یابد. بنابراین در پایین محیط متخلخل سیال به دلیل فشار زیاد تمایل بیشتری به نفوذ در محیط متخلخل دارد. هرچه مقاومت مسیر سیال در قسمت پرفشار بیشتر باشد میزان نفوذپذیری کمتر خواهد بود. در حالت 3 نسبت تخلخل کمتری در قسمت پایین محیط متخلخل قرار دارد از این‌رو افزایش مقاومت زیادی بر سر راه نفوذ سیال در قسمت پرفشار می‌باشد.

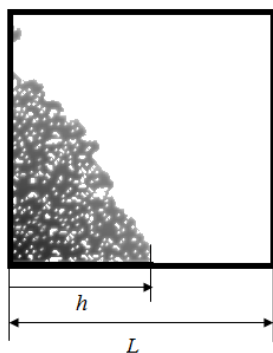


Fig. 12 Fluid penetration depth (h) in the porous medium

شکل 12 عمق نفوذ سیال (h) داخل محیط متخلخل

داده می‌شود که چگالی برابر نصف چگالی قطره و محیط اطرافش شود. "شکل 11" زوایای و شکل قطره را در حالت‌های مختلف را نشان می‌دهد. جدول 1 نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با حل تحلیلی (رابطه (13) مقایسه می‌نماید.

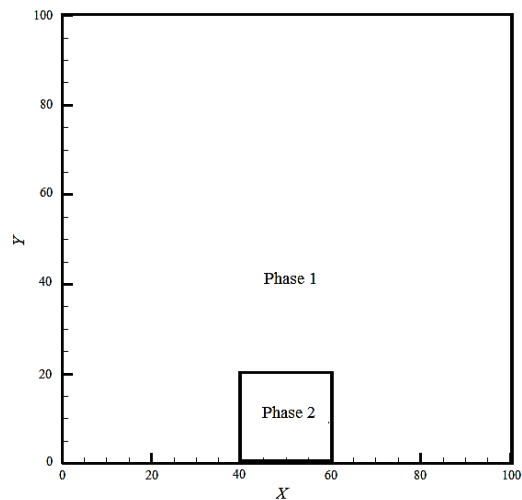


Fig. 10 Initial state of computational domain

شکل 10 حالت اولیه میدان محاسباتی

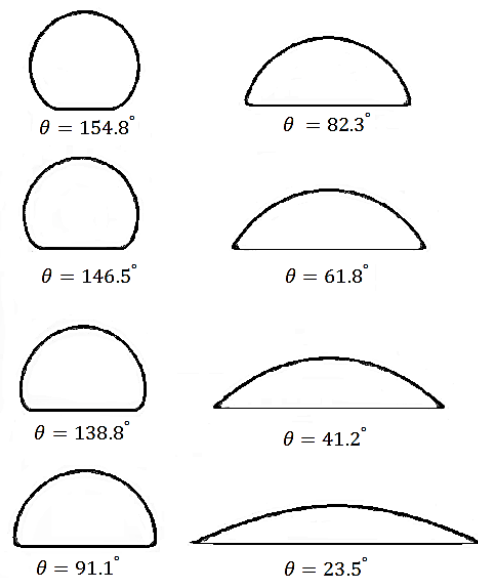


Fig. 11 Modelling of droplet on surfaces with different  $G_{ads,2}$

شکل 11 مدل‌سازی قطره بر روی سطوح با  $G_{ads,2}$  متفاوت

جدول 1 مقایسه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی به روش شبکه بولتزمن و روابط

تحلیلی برای قطره بر روی سطح

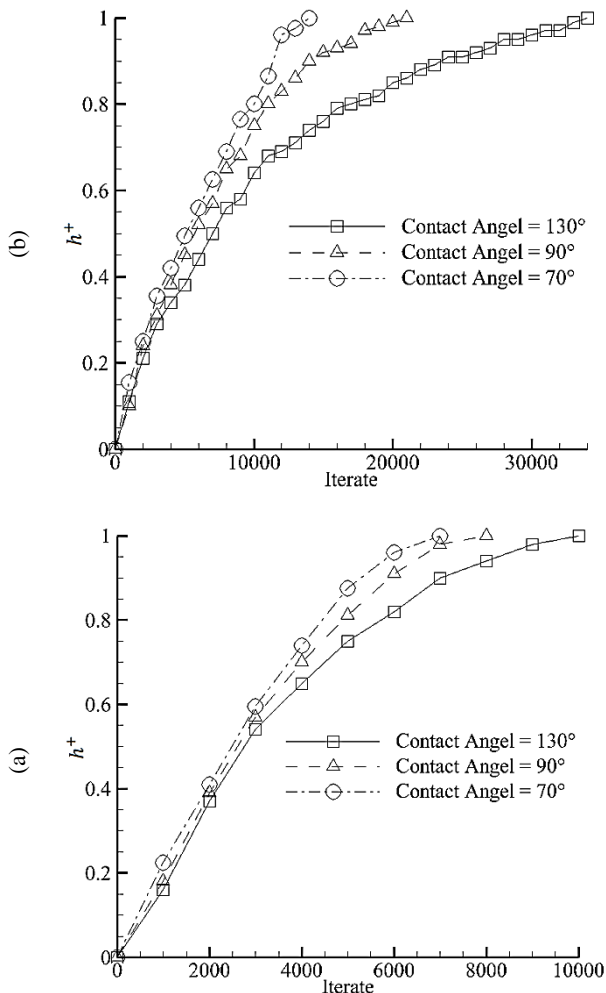
Table 1 Compression of obtained result from Lattice-Boltzmann simulation method and analytical relation for droplet on surface

$G_{ads,2}$	زاویه تماس به دست آمده از رابطه تحلیلی	زاویه تماس به دست آمده از حل عددی	درصد خطا
-0.4	47.27	46.1	2.48
-0.3	59.41	58.4	1.7
-0.2	70.17	69.2	1.38
-0.1	80.24	79.7	0.67
0	90.00	90.1	0.11
0.1	99.77	100.4	0.66

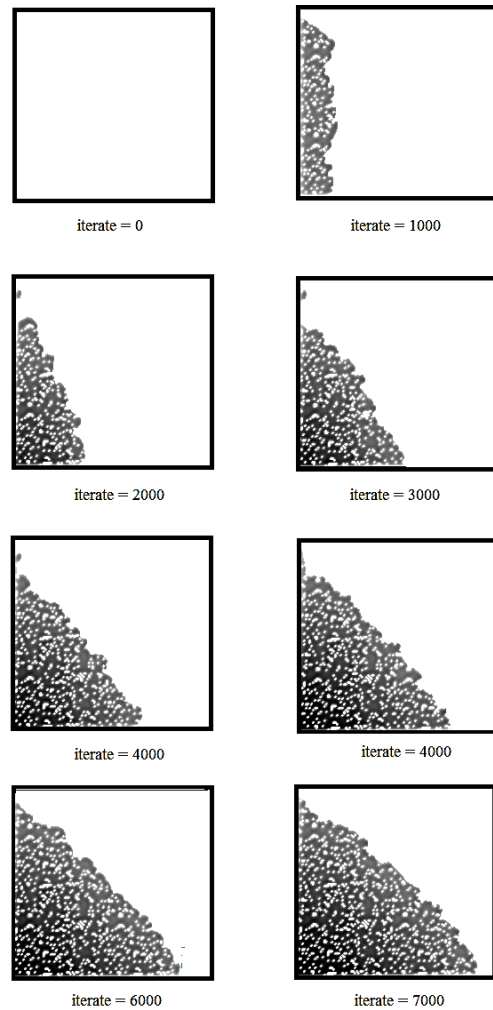
بررسی اثر خصوصیت آبدوست یا آب‌گریز بودن سطوح جامد روی نرخ و الگوی نفوذ در ماده متخلخل لایه‌ای، یک‌بار همه آرایش‌های محیط متخلخل آبدوست و بار دیگر آب‌گریز فرض می‌شوند. در نهایت دو حالت مذکور با حالت خنثی (که پیش از این بررسی شد) مقایسه می‌شود.

"شکل 15" میزان نفوذ سیال در محیط متخلخل با سطح آبدوست، خنثی و آب‌گریز را برای حالت‌های 1 و 2 نشان می‌دهد. نتایج ارائه شده در "شکل 15(a)" گویای آن است که در حالت 1 با سطح آبدوست نفوذ سیال درون محیط متخلخل نسبت به حالت آب‌گریز سریع‌تر اتفاق می‌افتد. این امر به دلیل تمایل سطح آبدوست به جذب سیال و وجود نیروی کششی از طرف سطح آبدوست به سیال می‌باشد.

"شکل 15(b)" که مقایسه را برای محیط با تخلخل بالاتر (حالت 2) انجام می‌دهد، نشان از آن دارد که نتایج همانند قسمت قبل است و در حالت آبدوست، خنثی و آب‌گریز تمایل به جذب سیال کمتر از حالت 1 است اما تمایل به جذب سیال در حالت آب‌گریز کاهش بیشتری یافته است. تفاوت مشاهده بین دو حالت 1 و 2 به دلیل آن است که در حالت 2 با نسبت تخلخل کمتر تعداد نوده‌های جامد بیشتر است لذا دافعه و جاذبه سطوح مؤثرتر است.

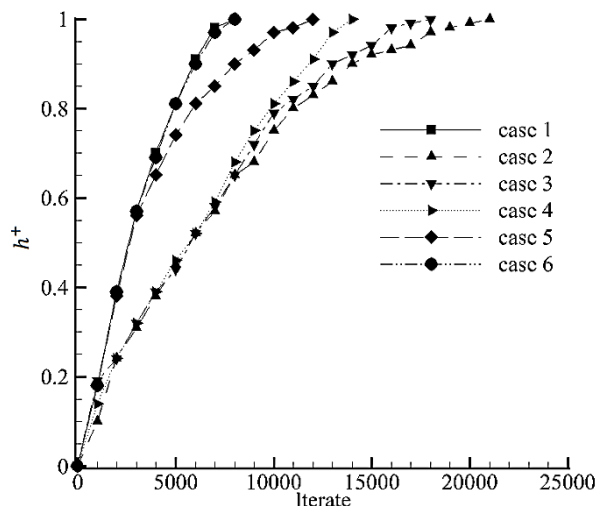


**Fig. 15** Compression of penetration of fluid in porous medium for hydrophobic, neutral and hydrophilic surfaces for (a) state 1 (b) state 2  
شکل 15 مقایسه نفوذ سیال در محیط متخلخل در حالت آب‌گریز، خنثی و آبدوست برای (a) حالت 1 و (b) حالت 2



**Fig. 13** Penetration of fluid in porous medium with time

شکل 13 نفوذ سیال به محیط متخلخل حالت 1 با گذشت زمان



**Fig. 14** Penetration of fluid in porous medium for different states

شکل 14 نفوذ سیال به درون محیط متخلخل در حالات مختلف

در ادامه‌ی تحقیق اثر میزان آبدوستی و آب‌گریزی سطح تحقیق شده است. مقدار  $G_{ads2}$  به نحوی انتخاب شده است که زاویه تماسی متناظر با آن برای حالت آبدوست و آب‌گریز به ترتیب برابر با 70 و 130 درجه باشد. برای



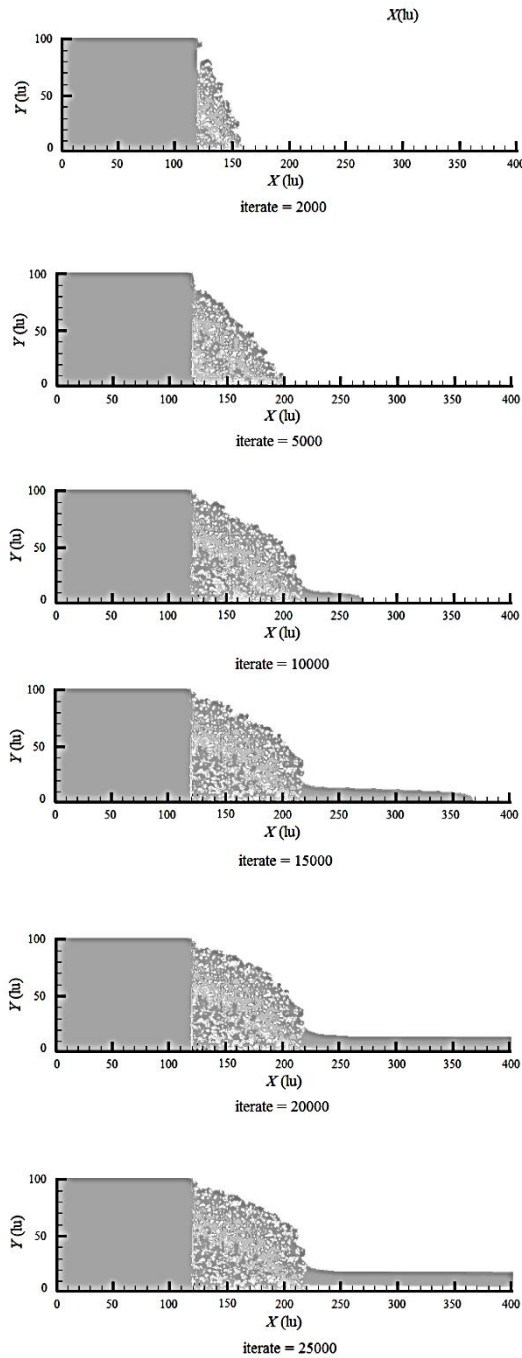


Fig. 16 The fluid flow in right side of porous medium

شکل 16 جریان سیال در سمت راست محیط متخلخل

جدول 2 تغییرات دبی جرمی و ارتفاع سیال با آرایش محیط متخلخل

Table 2 Changes of fluid mass flow and height with porous medium arrangements

مورد	1	2	3	4	5	6
دبی جرمی بر واحد عمق	0.964	0.214	0.261	0.535	0.328	0.878
ارتفاع سیال	23	12	13	17	14	22

حاکي از صحت کد می‌باشد. سپس شش محیط متخلخل با نسبت تخلخل‌های متفاوت و آرایش‌ها متفاوت به روش تصادفی ایجاد گردید. دو حالت نخست تخلخل در تمام محیط ثابت و برابر 0.75 و 0.85 هستند. در

### 4-3- وضعیت سیال خروجی از محیط متخلخل در حالت پایا

حرکت سیال دارای سطح آزاد در مواد متخلخل اصطلاحاً نشأت نامیده می‌شود. پدیده نشأت در سازه‌های آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است زیرا که تعیین نواحی خیس شده و همچنین تعیین نرخ جریان نشستی عامل تعیین کننده‌ای در طراحی سازه به شمار می‌رود.

در این بخش به بررسی دبی عبوری در حالت پایا پرداخته می‌شود. در این حالت با ادامه تکرارهای حل به سیال اجازه داده می‌شود از محیط متخلخل عبور کرده و جریان یابد. در این حالت تا زمانی حل ادامه می‌یابد که تغییرات پارامترهای موجود در مسئله مانند ارتفاع سیال در سمت راست محیط متخلخل و همچنین مؤلفه سرعت از تکراری تا تکرار بعد کمتر از میزان مشخصی شود و به عبارت دیگر مسئله به حالت پایا رسیده باشد. معیار پایایی حل به صورت رابطه‌ی (18) تعریف شده است.

$$\max \left\{ \frac{|A^n - A^{n-1}|}{|A^n|} \right\} \leq 10^{-6} \quad (18)$$

در رابطه‌ی (18) مقدار پارامتر در تکرار حاضر و  $A^{n-1}$  آن در تکرار قبل است.

"شکل 16" نفوذ سیال درون محیط متخلخل حالت 1 و جریان یافتن آن پس از گذر از این محیط را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که سیال پس از عبور از محیط متخلخل و در موقعیت حدود نود 300 به ارتفاع ثابتی می‌رسد. "شکل 17" پروفیل سرعت سیال را پس از عبور از محیط متخلخل برای آرایش‌های متفاوت محیط متخلخل نشان می‌دهد. پروفیل سرعت در فاصله 180 نود بعد از محیط متخلخل (در موقعیت نود 300 که ارتفاع ثابت شده است) سنجیده شده است. پروفیل‌های سرعت نمایش داده شده در "شکل 17"، تغییرات سرعت در راستای محور  $Y$  تا سطح فاز مایع را تعیین می‌نمایند.

جدول 2 مقدار دبی جرمی بر واحد عمق سیال و ارتفاع سیال را بعد از محیط متخلخل بصورت کمی نشان می‌دهد. برای محاسبه دبی جرمی از رابطه (19) استفاده شده است.

$$\dot{m} = \sum \rho u \quad (19)$$

در رابطه (19) سیگما بر روی نودهای در راستای  $Y$  که از سطح پایین تا سطح فاز مایع (فاز 2) گسترده شده‌اند اعمال می‌شود.

همان‌گونه که از "شکل 17" و جدول 2 مشخص است، در حالت 2 نسبت به حالت 1 میزان ارتفاع سیال بعد از محیط متخلخل کاهش می‌یابد. همچنین در حالت 1 سرعت متوسط بیشتری مشاهده می‌شود. علت مشاهده این تغییرات کاهش نسبت تخلخل از حالت 1 به 2 است زیرا که با کاهش نسبت تخلخل مقاومت در برابر عبور سیال افزایش می‌یابد. همچنین از جدول 2 مشخص است که میزان دبی جرمی بر واحد عمق سیال در حالت 2 نسبت به حالت 1 کمتر است.

از مقایسه حالات 3 تا 6 نتیجه می‌شود که در حالت 3 میزان ارتفاع سیال و همچنین دبی جرمی بر واحد عمق سیال پس از محیط متخلخل کمینه است. این در حالی است که نسبت حجم محیط متخلخل با عدد تخلخل 0.85 به عدد تخلخل 0.75 در تمامی این حالات برابر است. اما آرایش و قرارگیری محیط متخلخل با نسبت بالا در این تغییرات مؤثر می‌باشد.

### 4- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی و شبیه‌سازی جریان سیال درون محیط متخلخل پرداخته شد. ابتدا صحت کد نوشته شده به زبان فرترن بررسی شد، نتایج

## 6- مراجع

- [1] R. Hilfer, Local-porosity theory for flow in porous media, *Physical Review B*, Vol. 45, No. 13, pp. 7115, 1992.
- [2] K. Dixon, R. Nichols, Permeability estimation from transient vadose zone pumping tests in shallow coastal-plain sediments, *Environmental Geosciences*, Vol. 12, No. 4, pp. 279-289, 2005.
- [3] G. W. Gee, Z. F. Zhang, A. L. Ward, A modified vadose zone fluxmeter with solution collection capability, *Vadose Zone Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 627-632, 2003.
- [4] A. Koponen, M. Kataja, J. Timonen, Permeability and effective porosity of porous media, *Physical Review E*, Vol. 56, No. 3, pp. 3319, 1997.
- [5] D. Hansen, *The Behaviour of Flowthrough Rockfill Dams*, PhD Thesis, University of Ottawa (Canada), 1992.
- [6] R. D. Townsend, V. K. Garga, D. Hansen, Finite difference modelling of the variation in piezometric head within a rockfill embankment, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 254-263, 1991.
- [7] D. Hansen, R. Bari, Uncertainty in water surface profile of buried stream flowing under coarse material, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 8, pp. 761-773, 2002.
- [8] J. Wilkins, Flow of water through rock fill and its application to the design of dams, *New Zealand Engineering*, Vol. 10, No. 11, pp. 382, 1955.
- [9] D. Stephenson, *Rockfill in Hydraulic Engineering*, eBook ISBN:9780444600837, Elsevier, pp. 32-33, 1979.
- [10] R. Bari, D. Hansen, Application of gradually-varied flow algorithms to simulate buried streams, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 6, pp. 673-683, 2002.
- [11] J. Samani, H. Samani, M. Shaijannejad, Reservoir routing with outflow through rockfill dams, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 42, No. 4, pp. 435-439, 2004.
- [12] H. M. Samani, J. M. Samani, M. Shaijannejad, Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 6, pp. 448-454, 2003.
- [13] P. Asiaban, E. Amiri Tokaldany, M. Tahmasebi Nasab, Simulation of water surface profile in vertically stratified rockfill dams, *International Journal Of Environmental Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 1193-1200, 2015.
- [14] M. Moradi Tayyebi, E. Amiri Tokaldany, Introducing a relationship to estimate hydraulic gradient in non-darcy turbulent flow in porous media, *Journal of Water and Soil*, Vol. 29, No. 4, pp. 908-918, 2015. (in Persian)
- [15] M. T. Balhoff, S. G. Thomas, M. F. Wheeler, Mortar coupling and upscaling of pore-scale models, *Computational Geosciences*, Vol. 12, No. 1, pp. 15-27, 2008.
- [16] S. Succi, *The Lattice Boltzmann Equation: For Fluid Dynamics and Beyond*, New York, Oxford university press, 2001.
- [17] P. Raiskinmäki, A. Koponen, J. Merikoski, J. Timonen, Spreading dynamics of three-dimensional droplets by the lattice-Boltzmann method, *Computational Materials Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 7-12, 2000.
- [18] M. Latva-Kokko, D. H. Rothman, Static contact angle in lattice Boltzmann models of immiscible fluids, *Physical Review E*, Vol. 72, No. 4, pp. 046701, 2005.
- [19] S. Fallah Kharmiani, M. Passandideh Fard, H. Niazmand, Modeling of simultaneous impact of two parallel drops on a thin liquid film using Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 7, pp. 373-384, 2016. (in Persian)
- [20] T. Inamuro, T. Ogata, S. Tajima, N. Konishi, A lattice Boltzmann method for incompressible two-phase flows with large density differences, *Journal of Computational Physics*, Vol. 198, No. 2, pp. 628-644, 2004.
- [21] K. Sankaranarayanan, X. Shan, I. Kevrekidis, S. Sundaresan, Analysis of drag and virtual mass forces in bubbly suspensions using an implicit formulation of the lattice Boltzmann method, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 452, No. 3, pp. 61-96, 2002.
- [22] E. Sattari, M. Aghajani Delavar, E. Fattahi, K. Sedighi, Investigation of two bubble coalescence with large density differences with Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 93-100, 2014. (in Persian)

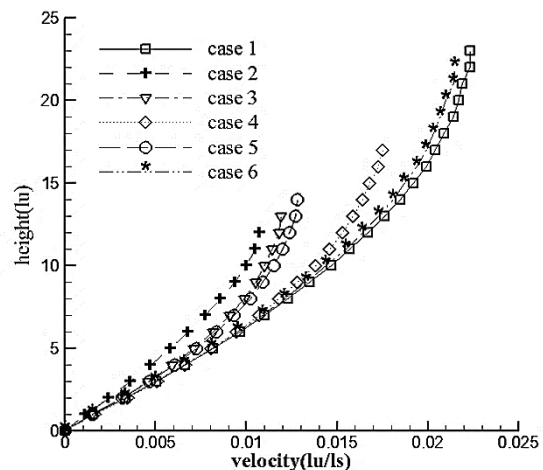


Fig. 17 The velocity profile of flow in right side of porous medium for different porous medium arrangements

شکل 17 پروفیل سرعت سیال در جریان در سمت راست محیط متخلخل برای آرایش‌های متفاوت محیط متخلخل

حالت‌ها 3 و 6 دو محیط متخلخل با عدد تخلخل متفاوت بر روی یکدیگر قرار داده شدند. در حالت‌های 4 و 5 محیط متخلخل از مجاورت دادن دو محیط با عدد تخلخل متفاوت تولید شده است.

نفوذپذیری هر یک از محیط‌های متخلخل اشاره شده بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که در نسبت تخلخل بالا میزان نفوذ سیال بیشتر است. همچنین هنگامی که محیط با نسبت تخلخل پایین در نیمه پایین قرار گیرد، میزان نفوذ به کمترین مقدار خود می‌رسد. با وجودی که مقدار ماده لازم برای ایجاد محیط‌های متخلخل در حالت‌های 3 تا 6 یکسان است اما تحلیل صورت گرفته نشان از آن دارد که حالت 3 کمترین میزان نفوذ را دارد. لذا حالت بهینه بین حالات 3 تا 6 برای کاهش نفوذ سیال درون محیط متخلخل حالت 3 شناخته شد.

دیگر جنبه‌ی این تحقیق، ارزیابی اثر ترشوندگی سطح بر نفوذ و نشی جریان از محیط متخلخل بود. شش حالت توصیف شده با در نظر گرفتن سطح آب‌دوست و یا آب‌گریز برای محیط متخلخل، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج گویای آن است که با آب‌دوست بودن سطح، نفوذ سیال درون محیط متخلخل نسبت به حالت آب‌گریز سریع‌تر اتفاق می‌افتد. این امر به دلیل تمایل سطح آب‌دوست به جذب سیال و وجود نیروی کششی از طرف سطح آب‌دوست به سیال می‌باشد.

در ادامه جریان خروجی از محیط متخلخل در حالت پایا بررسی شد. مشاهده شد که با کاهش نسبت تخلخل میزان ارتفاع سیال بعد از محیط متخلخل و همچنین دبی جرمی سیال به ازای واحد عمق سیال کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی آرایش‌های بین حالات 3 تا 6 محیط متخلخل بیانگر آن است که در حالت 3 کمترین میزان نشی و ارتفاع سیال پس از محیط متخلخل وجود خواهد داشت. در نتیجه از جهت میزان کاهش نشی نیز حالت 3 بهینه است.

## 5- تقدیر و تشکر

در پایان از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد یاسوج به خاطر حمایت مالی جهت انجام این طرح پژوهشی کمال تشکر به عمل می‌آید.

- [28] H. Liu, Q. Kang, C. R. Leonardi, S. Schmieschek, A. Narváez, B. D. Jones, J. R. Williams, A. J. Valocchi, J. Harting, Multiphase lattice Boltzmann simulations for porous media applications, *Computational Geosciences*, Vol. 20, No. 4, pp. 777-805, 2016.
- [29] X. Shan, H. Chen, Lattice Boltzmann model for simulating flows with multiple phases and components, *Physical Review E*, Vol. 47, No. 3, pp. 1815, 1993.
- [30] G. R. McNamara, G. Zanetti, Use of the Boltzmann equation to simulate lattice-gas automata, *Physical Review Letters*, Vol. 61, No. 20, pp. 2332, 1988.
- [31] H. Huang, D. T. Thorne Jr, M. G. Schaap, M. C. Sukop, Proposed approximation for contact angles in Shan-and-Chen-type multicomponent multiphase lattice Boltzmann models, *Physical Review E*, Vol. 76, No. 6, pp. 066701, 2007.
- [32] J. Cui, W. Li, W. H. Lam, Numerical investigation on drag reduction with superhydrophobic surfaces by lattice-Boltzmann method, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 61, No. 12, pp. 3678-3689, 2011.
- [23] K. Langaas, P. Papatzacos, Numerical investigations of the steady state relative permeability of a simplified porous medium, *Transport in Porous Media*, Vol. 45, No. 2, pp. 241-266, 2001.
- [24] M. C. Sukop, H. Huang, C. L. Lin, M. D. Deo, K. Oh, J. D. Miller, Distribution of multiphase fluids in porous media: Comparison between lattice Boltzmann modeling and micro-x-ray tomography, *Physical Review E*, Vol. 77, No. 2, pp. 026710, 2008.
- [25] M. Taghilou, M. H. Rahimian, Simulation of 2D droplet penetration in porous media using Lattice Boltzmann Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 13, pp. 43-56, 2013. (in Persian فارسی)
- [26] S. Chen, G. D. Doolen, Lattice Boltzmann method for fluid flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 30, No. 1, pp. 329-364, 1998.
- [27] E. S. Boek, M. Venturoli, Lattice-Boltzmann studies of fluid flow in porous media with realistic rock geometries, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 59, No. 7, pp. 2305-2314, 2010.