اثرات ترکیب سطوح آب‌دوست و آب‌گریز بر الگوهای انگشتی دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل تصادفی

اسماعیل شاکری نژاد استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، ایران

چکیده

در این مقاله الگوی حرکت دو سیال مخلوط نشدنی در یک محیط متخلخل تصادفی با استفاده از روش شبکه بولتزمن برای جریان‌های چند فازی با چند مؤلفه مورد مطالعه قرار گرفته است. برای بررسی جریان در محیط متخلخل، اجسام جامد با خیسی سطح آب‌گریز، آب‌دوست، خنثی و ترکیب آب‌دوست و آب‌گریز در نظر گرفته شده‌اند. همچنین اثرات قرارگیری لایه آب‌دوست در محیط متخلخل آب‌گریز بر زمان رسوخ و مقدار اشباع سیال جابجا کننده مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعه حاضر، اثرات عدد مویینگی و نسبت لزجت نیز بر الگوی جریان بررسی شده است. نتایج، دیدگاهی در مورد اثرات خیسی سطح بر انتقال آب مایع در محیط متخلخل و چگونگی تنظیم آن با کنترل حوزه‌های آب‌دوست و آب‌گریز در محیط متخلخل ارائه می‌کند. همچنین بر اساس نتایج این مطالعه اگر نسبت لزجت برابر یک، عدد مویینگی برابر ۰/۰۱۰۲ و لایه آب‌دوست در ورودی محیط متخلخل قرار گیرد به ترتیب باعث کاهش ۱۱/۸ و ۹ درصدی زمان رسوخ و اشباع می‌شود.

واژه‌های کلیدی : جریان دوفازی، ترکیب سطوح آب‌دوست و آب‌گریز، اشباع، زمان رسوخ، محیط متخلخل، الگوی انگشتی.

Mixed-Wettability Effects on Fingering Patterns of Two Immiscible Fluids in Porous Media

E. Shakeri Nejad Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Abstract

In this paper, the displacement pattern of two immiscible fluids in a random porous medium is studied using the lattice Boltzmann method for multi-component multiphase flows. To investigate the flow in the porous medium, solid obstacles with hydrophobic, hydrophilic, neutral, and mixed hydrophilic-hydrophobic wettability are considered. Furthermore, the effects of placing a hydrophilic layer within a hydrophobic porous medium on the breakthrough time and the saturation of the displacing fluid are studied. In the present study, the effects of the capillary number and viscosity ratio on the displacement pattern are also investigated. The results provide insights into the effects of surface wettability on liquid water transport in porous media and how it can be modulated by controlling hydrophilic and hydrophobic domains within the porous medium. Moreover, based on the results of this study, when the viscosity ratio is equal to one, the capillary number is 0.0102, and the hydrophilic layer is placed at the inlet of the porous medium, the breakthrough time and saturation are reduced by 11.8% and 9%, respectively.

Keywords: Two Phase Flow; Mixed Wettability; Saturation; Breakthrough Time; Porous Media; Fingering Pattern.

۱- مقدمه

جابجایی سیال‌های مخلوط نشدنی در محیط متخلخل از موضوعات جالب علمی و مهندسی است که در بسیاری از زمینه‌های فنی و صنعتی کاربرد دارد [۱]. فهم حرکتی این فرایند، مخصوصاً از دیدگاه مقیاس حفره، دارای اهمیت فراوانی است ولی به دلیل تعداد زیاد پارامترهای مؤثر در جریان مانند چگالی سیال، لزجت، کشش سطح، سرعت جریان سیال، خیسی سطح، هندسه حفره‌ها و ناهمگنی محیط بسیار پیچیده است [۱]. جابجایی دو سیال در مدل‌های میکرو توسط چندین پارامتر بی‌بعد توصیف می‌شود: عدد مویینگی (Ca)، نسبت لزجت (M) و عدد باند (Bo)[۱]. عدد باند مربوط به حالتی است که نیروی گرانش در نظر گرفته شود. به طور کلی برای جابجایی سیال-های مخلوط نشدنی در محیط متخلخل سه نوع رژیم جابجایی وجود دارد که شامل رژیم جابجایی پایدار، رژیم انگشتی لزج و رژیم انگشتی مویینگی است [۲]. در رژیم جابجایی پایدار، جبهه بین دو سیال تقریباً صاف است و دارای تعدادی بی‌نظمی در مقیاس چندین حفره است. همچنین مقدار خیلی کمی از سیال جابجا شده در پشت جبهه بین دو سیال به دام می‌افتد [۲]. در الگوی انگشتی لزج هیچ حلقه‌ای به وجود نمی‌آید [۳]. در الگوی انگشتی مویینگی انگشتی‌ها در تمام جهات حتی به سمت عقب (به سمت ورودی) رشد می‌کنند و سیال جابجا شده ممکن است به دلیل حرکت حلقه‌ای انگشتی‌ها، بین آن‌ها به دام بیفتد [۳]. هر سه رژیم وابستگی شدیدی به عدد مویینگی، نسبت لزجت و عدد باند دارد [۱]. برای جریان سیال مخلوط نشدنی می‌توان بازیافت روغن در صنعت را مثال زد. برای این منظور مخصوصاً در مرحله دوم و سوم بازیافت، از گاز یا آب برای جابجایی روغن باقیمانده از مرحله اول استفاده می‌شود [۴]. در این حالت چون لزجت روغن باقیمانده بزرگ‌تر از گاز تزریق شده است می‌تواند باعث ایجاد جابجایی ناپایدار و حرکت سیال به صورت انگشتی لزج شود. این پدیده یک مشکل جدی است که باعث می‌شود بازده جابجایی ناچیز شود [۴]. عدد مویینگی به صورت نسبت نیروی لزج به کشش سطح تعریف می‌شود [۵]:

$$Ca = \frac{u_0 \rho \nu}{\sigma} \qquad (۱)$$

* اسماعیل شاکری نژاد، آدرس پست الکترونیکی:e.shakerinejad@scu.ac.ir

قالب پیش‌نویس مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز (لطفاً این نوشته، در فایل ارسالی حذف نشود)

In Press

که u_0 سرعت سیال جابجا کننده در ورودی، ρ و ν چگالی و لزجت سینماتیکی سیال جابجا کننده در لحظه ابتدایی و σ کشش سطحی بین دو فاز است. پارامتر بعدی، نسبت لزجت دینامیکی سیال جابجا شده به سیال جابجا کننده است:

$$M = \frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\rho_1(\tau_1 - 1/2)}{\rho_2(\tau_2 - 1/2)} \quad (۲)$$

عدد باند نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Bo = \frac{\Delta\rho g d_p^2}{\sigma} \quad (۳)$$

که بیان‌کننده نسبت نیروی گرانش در اثر اختلاف چگالی به کشش سطح است. در این رابطه g شتاب گرانش و d_p قطر حفره است. علاوه بر پارامترهای بیان شده، به طور تجربی مشاهده شده است که خیسی سطح نقش مهمی در فرایند جابجایی ایفا می‌کند [۱]. توجه شود که خیسی سطح با زاویه تماس توصیف می‌گردد. در سال‌های اخیر روش شبکه بولتزمن به‌سرعت گسترش یافته و به صورت یک ابزار قدرتمند در شبیه‌سازی‌های عددی جریان سیال به‌کار رفته است. در این روش می‌توان با استفاده از شرط مرزی برگشت به عقب، ساختارهای پیچیده را به راحتی مدل کرد. به همین دلیل است که ماهیت و اعمال این روش آسان است و به طور وسیعی برای مطالعه پدیده انتقال در محیط متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

اثرات خیسی سطح بر روی پدیده انگشتی به صورت عددی توسط دانگ و همکارانش [۴] مورد مطالعه قرار گرفته است. الگوی انگشتی نهایی در شرایط خیسی سطح مختلف مقایسه شده و بازده جابجایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که خیسی سطح اثر مهمی بر الگوی انگشتی و رشد آن دارد. پدیده انگشتی لزج مربوط به جابجایی دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل همگن توسط دانگ و همکارانش[۷] مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی به روش شبکه بولتزمن صورت گرفته و اثر گرانش در آن لحاظ شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که وقتی زاویه خیسی برای سیال جابجا کننده به صورت خیس‌کننده است، انگشتی‌ها محدود می‌شود. شاکری نژاد و همکارانش[۸] اثر نسبت لزجت بر روی جابجایی دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل تصادفی را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش نسبت لزجت زمان رسوخ افزایش می‌یابد و سیال جابجا کننده دیرتر به مرز خروجی می‌رسد. زاکیرو و خرامچن‌کوو [۹] به بررسی اثر خیسی سطح بر ویژگی‌های جریان‌های مخلوط نشدنی دو فازی در محیط‌های متخلخل پرداختند و اصول جابجایی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج اصلی این مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی‌های عددی جریان در یک ساختار متخلخل ناهمگن بوده که برای حل آن از معادلات شبکه بولتزمن استفاده شده است. از بهترین یافته‌های این مطالعه این است که افزایش نیروهای لزج، اثر خیس شوندگی را بر الگوی توزیع دو فاز سرکوب می‌کند. مطالعات متعدد در زمینه جریان سیال‌های مخلوط نشدنی در محیط متخلخل وجود سه الگوی جابجایی مختلف را تائید کرده‌اند که به نسبت لزجت و عدد مویینگی بستگی دارد (رژیم جابجایی پایدار، رژیم انگشتی لزج و رژیم انگشتی مویینگی). با این حال، مرز الگوهای جابجایی، می‌تواند بسته به ویژگی‌های ابزارهای تجربی و عددی استفاده شده، به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. مهابادی و همکارانش [۱۰]، یک مدل شبکه سه بعدی از تصاویر به دست آمده با استفاده از اشعه ایکس از ماسه طبیعی استخراج کردند. این مدل به دست آمده برای ترسیم کمی مرز الگوهای جابجایی برای طیف وسیعی از نسبت‌های لزجت و اعداد مویینگی مورد استفاده قرار گرفت. در مطالعه آن‌ها برای اولین بار، یک رژیم گذار بین نواحی انگشتی لزج و انگشتی مویینگی مشاهده شد. کیو و همکارانش [۱۱] به بررسی جابجایی سیال‌های مخلوط نشدنی در محیط متخلخل دارای شکستگی پرداختند. در بررسی آن‌ها یک مدل سه بعدی از حفره-شکستگی برای پرداختن به تأثیر شکستگی بر الگوهای جریان بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که ایجاد شکستگی با قرارگیری در جهت جابجایی، الگوهای جابجایی را دگرگون کرده و مرز ناحیه انگشتی موئینگی را تغییر می‌دهد به‌گونه‌ای که رفتار معادل افزایش عدد مویینگی را نشان می‌دهد.

در این مطالعه به بررسی اثرات عدد مویینگی، نسبت لزجت و خیسی سطح به صورت عددی و با استفاده از روش شبکه بولتزمن در یک محیط متخلخل تصادفی پرداخته شده و اثر گرانش لحاظ نشده است. همچنین اثر ترکیب لایه آب‌دوست به محیط متخلخل آب‌گریز نیز بررسی شده و اثرات آن بر زمان رسوخ و بازده جابجایی مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش شبکه بولتزمن

در این بررسی از مدل شان و چن برای جریان‌های چند فازی با چند مؤلفه برای شبیه‌سازی جریان دو سیال مخلوط نشدنی در محیط متخلخل تصادفی به روش عددی استفاده می‌شود. در مدل چند فازی با چند مؤلفه، جدایی مؤلفه‌های مختلف در اثر تقابل زیاد بین مولکول‌های سیال ایجاد می‌شود. نیروی اثر متقابل به صورت زیر بیان می‌شود[۱۲]:

$$\vec{F}_{C,K}(\vec{x},t) = -\psi_K(\vec{x},t)G\sum_\alpha w_\alpha \rho_{\overline{K}}(\vec{x}+\vec{e}_\alpha\Delta t,t)\vec{e}_\alpha \quad (۴)$$

$\vec{F}_{C,K}(\vec{x},t)$ نیروی بین ذرات مؤلفه Kام و مؤلفه $\overline{K}$ام و G قدرت اثر متقابل بین دو مؤلفه K و $\overline{K}$ است. در حالتی که اثر متقابل بین سیال و جامد وجود داشته باشد، برای در نظر گرفتن این اثر، باید نیروی جداگانه‌ای برای هر فاز محاسبه شود که به صورت عبارت چشمه در معادلات ظاهر می‌شود و رابطه آن به صورت زیر است[۱۲]:

$$\vec{F}_{W,K}(\vec{x},t) = -\psi_K(\vec{x},t)G_{W,K}\sum_\alpha W_\alpha S(\vec{x}+\vec{e}_\alpha\Delta t,t)\vec{e}_\alpha \quad (۵)$$

در رابطه بالا $G_{W,K}$ ضریب جذب[1] برای فاز K و W ضریب وزنی است[۱۲]. بردار سرعت است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{e}_\alpha = \begin{cases} (0,0) & \alpha = 0 \\ [\cos\frac{(\alpha-1)\pi}{2}, \sin\frac{(\alpha-1)\pi}{2}]C & \alpha = 1,2,3,4 \\ [\cos(\frac{(\alpha-1)\pi}{2}+\frac{\pi}{4}), \sin(\frac{(\alpha-1)\pi}{2}+\frac{\pi}{4})]\sqrt{2}C & \alpha = 5,6,7,8 \end{cases} \quad (۶)$$

$C = \Delta x/\Delta t$ را سرعت شبکه گویند که Δx فاصله شبکه و Δt گام زمانی است. در شبیه‌سازی به روش شبکه بولتزمن بسیار معمول است که فاصله شبکه و گام زمانی را مساوی و برابر یک تعریف

[1] Adsorption coefficient

می‌کنند. S دارای مقادیر صفر یا یک است که اگر $\vec{x}+\vec{e}_o\Delta t$ گره جامد باشد مقدار یک و اگر گره سیال باشد مقدار صفر را دارد [۱۲]. اثر متقابل بین سیال و جامد، زاویه تماس بین مایع و سطح جامد را تعیین می‌کند. از طرفی این ضریب جذب ($G_{W,K}$) است که مقدار این اثر متقابل را تعیین می‌کند، پس بر اساس مقادیر این ضریب، سه مرز جامد مختلف می‌توانیم داشته باشیم[۱۲]:

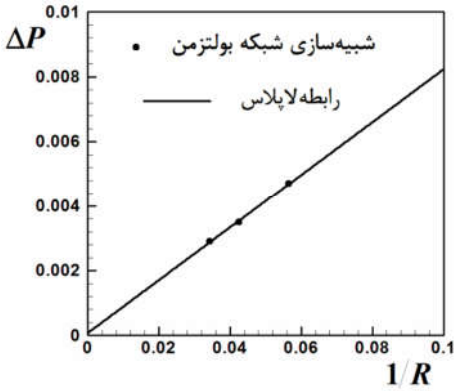
آب‌دوست[1] (زاویه تماس کمتر از ۹۰ درجه سیال جابجا شده سیال خیس‌کننده و سیال جابجا کننده سیال غیر خیس‌کننده است)، خنثی[2] (زاویه تماس ۹۰ درجه) و سطح آب‌گریز[3] (زاویه تماس بیشتر از ۹۰ درجه سیال جابجا شده سیال غیر خیس‌کننده و سیال جابجا کننده سیال خیس‌کننده است).

برای محاسبه عدد مویینگی به کشش سطحی نیاز داریم. روش مورد استفاده (مدل شان و چن) به گونه‌ای است که قبل از حل مسئله باید با توجه به پارامترهای مسئله و با استفاده از آزمون قطره (آزمون لاپلاس نیز نامیده می‌شود) کشش سطحی تعیین شود. برای این منظور در دستگاه مختصات دو بعدی یک قطره دایره‌ای ساکن به شعاع دلخواه از یک سیال درون سیال دیگر انتخاب می‌کنیم. مرکز دایره در مرکز ناحیه محاسباتی قرار دارد. در حالت تعادل و بدون در نظر گرفتن هر گونه نیروی حجمی و فاز جامد، هر سیال چگالی و فشار ثابت و سرعت صفر دارد[۱۳]. در میان مرز مشترک دو سیال یک تغییر فشار وجود دارد که تابع شعاع قطره و کشش سطح است که این تغییر فشار را می‌توان از قانون لاپلاس تعیین کرد ($\Delta P = P_i - P_o = \sigma/R$)[۱۳]. P_i و P_o به ترتیب فشار داخل و خارج قطره، R شعاع قطره و σ کشش سطحی بین سیال ۱ و ۲ است. در آزمون لاپلاس، ناحیه در نظر گرفته شده به صورت شبکه ۱۰۱ × ۱۰۱ است. در این شبیه‌سازی چگالی سیال یک در لحظه ابتدایی در داخل و خارج قطره به طور یکنواخت و به ترتیب ۱ و ۰ در نظر گرفته شده است. همچنین چگالی سیال دو در لحظه ابتدایی در داخل و خارج قطره به طور یکنواخت و به ترتیب ۰ و ۱ در نظر گرفته شده است. از آنجایی که مرز مشترک دو فاز جایی است که دو فاز دارای چگالی برابر هستند[۱۴] پس می‌توان نمودار چگالی دو فاز را روی خط افقی گذرنده از مرکز رسم کرد. محل تلاقی بین دو نمودار قطر قطره خواهد بود. پس نصف آن شعاع قطره را به ما خواهد داد. حال تغییرات فشار بین داخل و خارج قطره را محاسبه کرده و نمودار آن را بر حسب 1/R رسم می‌کنیم.

جدول ۱- خلاصه نتایج مربوط به شبیه‌سازی آزمون قطره.

$R_{initial}$	20	25	30
R شعاع نهایی	17.6867	23.5046	29.1327
p_{in} فشار داخل	0.3601	0.3594	0.3593
P_{out} فشار خارج	0.3554	0.3559	0.3564
$\Delta P = P_{in} - P_{out}$	0.0047	0.0035	0.0029
$\sigma = \Delta P \times R$	0.0831	0.0823	0.0845

[1] Hydrophilic
[2] Neutral
[3] Hydrophobic



شکل ۱- تغییرات فشار بین داخل و خارج قطره برحسب 1/R.

شیب خط رسم شده برابر با کشش سطحی است که برای آزمون قطره انجام شده مقدار ۰/۰۸۱۵ در واحد شبکه بولتزمن است. نشانه‌های دایره‌ای روی شکل نتایج شبیه‌سازی شان و چن را نشان می‌دهد و خط رسم شده، خطی مستقیم و گذرنده از بین این مقادیر است که مربوط به قانون لاپلاس است. از آنجایی که همه نقاط با توجه به شکل بر روی خط مستقیم قرار گرفته‌اند، قانون لاپلاس در شبیه‌سازی ما برقرار است. از آنجایی که نتایج شبیه‌سازی شده با نتایج نظری مطابقت دارد پس روش شان و چن توصیف شده می‌تواند برای شبیه‌سازی سیستم‌های سیال با دو مؤلفه به درستی مورد استفاده قرار گیرد. توجه شود که برای محاسبه کشش سطح، سیال با لزجت بیشتر (سیال جابجا شده) به صورت یک قطره با شعاع‌های ابتدایی مختلف درون سیال با لزجت کمتر (سیال جابجا کننده) قرا می‌گیرد.

در این مطالعه اثر نسبت لزجت نیز بررسی شده است. همان‌طور که می‌دانیم با تغییر نسبت لزجت، کشش سطحی بین دو سیال نیز تغییر خواهد کرد پس برای هر نسبت لزجت باید آزمون قطره انجام گردد. کشش سطحی برای حالت‌های مورد بررسی در جدول ۲ آورده شده است (اندیس یک مربوط به سیال جابجا شده و اندیس دو مربوط به سیال جابجا کننده است). در این مطالعه می‌خواهیم اثر زاویه خیسی را مورد بررسی قرار دهیم به همین دلیل باید در هر حالت این زاویه تعیین گردد. برای تعیین این زاویه ابتدا سیال جابجا شده را به صورت یک قطره بر روی یک مرز جامد قرار می‌دهیم.

جدول ۲- مقادیر کشش سطحی برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی.

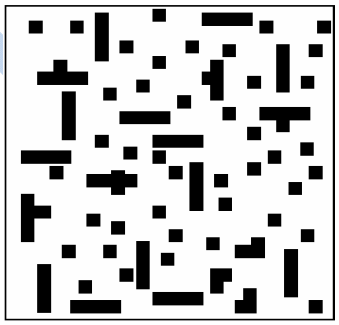
M (نسبت لزجت)	زمان آسایش و لزجت	σ (کشش سطحی)
۱	$\tau_1 = \tau_2 = ۱$ $\nu_1 = \nu_2 = ۰/۱۶۶۷$	۰/۰۸۱۵
۱/۳۳۴	$\tau_1 = ۱/۱۶۶۷$, $\tau_2 = ۱$ $\nu_1 = ۰/۲۲۲۲$, $\nu_2 = ۰/۱۶۶۷$	۰/۰۹۳۲
۲	$\tau_1 = ۱/۵$, $\tau_2 = ۱$ $\nu_1 = ۰/۳۳۴$, $\nu_2 = ۰/۱۶۶۷$	۰/۱۱۰۶۳۸
۳	$\tau_1 = ۲$, $\tau_2 = ۱$ $\nu_1 = ۰/۵$, $\nu_2 = ۰/۱۶۶۷$	۰/۱۴۶۳۴

In Press

در حالت نهایی بسته به مقدار قدرت کشش بین سیال و جامد ($G_{W,1}$ و $G_{W,2}$) قطره با زاویه‌های مختلف شکل می‌گیرد. پس در این مطالعه هرگاه زاویه خیسی بیان می‌شود منظور زاویه خیسی سیال جابجا شده است چون برای محاسبه زاویه تماس، سیال جابجا شده را به صورت یک قطره بر روی مرز جامد قرار می‌دهیم (توجه شود که در برخی مطالعات زاویه خیسی را برای سیال جابجا کننده در نظر می‌گیرند). در اینجا قدرت کشش سیال- جامد در شبیه‌سازی‌ها به صورت $G_{W,1}=-G_{W,2}$ در نظر گرفته شده است. برای مطالعه اثر خیسی مواد جامد در محیط متخلخل ابتدا رابطه بین زاویه تماس سکون و قدرت کشش سیال- جامد را با حل‌های عددی تعیین می‌کنیم. در این بررسی سه زاویه ۵۸/۳، ۹۰ و ۱۱۹ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است. مقادیر قدرت کشش سیال-جامد که به ازای آن، این زوایا ایجاد شده‌اند در جدول زیر آمده است:

جدول ۳- مقادیر زاویه خیسی برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی.

قدرت کشش سیال-سیال G	زاویه تماس	قدرت کشش سیال- جامد	زمان آسایش و لزجت	M (نسبت لزجت)
۱/۸	۵۸/۳	$G_{W,1}$=-۰/۲ $G_{W,2}$=۰/۲	$\tau_1=\tau_2=$ ۱ $\nu_1=\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۱
۱/۸	۹۰	$G_{W,1}$=۰ $G_{W,2}$=۰	$\tau_1=\tau_2=$ ۱ $\nu_1=\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۱
۱/۸	۱۱۹	$G_{W,1}$=۰/۲ $G_{W,2}$=-۰/۲	$\tau_1=\tau_2=$ ۱ $\nu_1=\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۱
۱/۸	۱۱۹	$G_{W,1}$=۰/۱۹۳ $G_{W,2}$=-۰/۱۹۳	$\tau_1=$ ۱/۱۶۶۷ , $\tau_2=$ ۱ $\nu_1=$ ۰/۲۲۲۲ , $\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۱/۳۳۴
۱/۸	۱۱۹	$G_{W,1}$=۰/۱۷ $G_{W,2}$=-۰/۱۷	$\tau_1=$ ۱/۵ , $\tau_2=$ ۱ $\nu_1=$ ۰/۳۳۴ , $\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۲
۱/۸	۱۱۹	$G_{W,1}$=۰/۱۳۵ $G_{W,2}$=-۰/۱۳۵	$\tau_1=$ ۲ , $\tau_2=$ ۱ $\nu_1=$ ۰/۵ , $\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۳
۱/۸	۵۸/۳	$G_{W,1}$=-۰/۱۹۸ $G_{W,2}$=۰/۱۹۸	$\tau_1=$ ۲ , $\tau_2=$ ۱ $\nu_1=$ ۰/۵ , $\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۳
۱/۸	۹۰	$G_{W,1}$=-۰/۰۳۳ $G_{W,2}$=۰/۰۳۳	$\tau_1=$ ۲ , $\tau_2=$ ۱ $\nu_1=$ ۰/۵ , $\nu_2=$ ۰/۱۶۶۷	۳



شکل ۲-هندسه مورد بررسی.

۳- شبیه‌سازی جریان دوفازی در محیط متخلخل تصادفی

ساختار محیط متخلخل مورد بررسی در شکل ۲ نشان داده شده است. شبکه مورد استفاده ۴۰۱×۴۰۱ و به صورت یکنواخت بوده و تعدادی مربع جامد به طور نامنظم در آن چیده شده‌اند. در شکل بالا مربع‌های جامد سیاه رنگ، نشان‌دهنده مواد جامد در محیط متخلخل و ناحیه سفید رنگ مسیرهای برای حرکت سیال از میان محیط متخلخل است. در لحظه ابتدایی در ستون اول ناحیه مورد بررسی، سیال ۲(سیال جابجا کننده) و در بقیه ناحیه، سیال ۱(سیال جابجا شده یا سیالی که جابجا می‌شود) قرار گرفته است.

چگالی فاز دو در لحظه ابتدایی در ستون اول برابر یک و در بقیه نقاط برابر صفر است. همچنین چگالی فاز یک در لحظه ابتدایی در

In Press

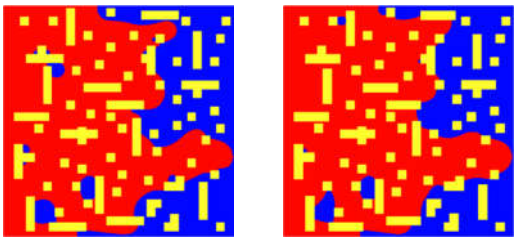
ستون اول برابر صفر و در بقیه نقاط به طور یکنواخت و برابر ۱ در نظر گرفته شده است. در این بررسی از معادله حالت $\psi = \rho$ استفاده شده و واحدهای به کار رفته در واحد شبکه بولتزمن است. برای مرز بالا و پایین از شرط مرزی عدم لغزش، در خروجی از شرط مرزی مرز باز و در ورودی از طرح زو و هی[1] [۱۵] برای اعمال شرط مرزی سرعت ثابت استفاده شده است (سرعت سیال دو در ورودی به طور یکنواخت و برابر u_0 است). منظور از شرط مرزی مرز باز، شرط مشتق صفر سرعت در خروجی است یعنی مقادیر توابع توزیع ذرات در خروجی با مقادیر توابع توزیع ذرات در گره‌های قبل از خروجی برابر در نظر گرفته می‌شود[۱۶]. در محل‌هایی که سیال با مواد جامد تماس پیدا می‌کند از شرط مرزی برگشت به عقب با دیوار میانی برای رسیدن به شرط عدم لغزش سرعت بر روی جسم جامد استفاده می‌شود. با توجه به اطلاعات فوق و هندسه مورد بررسی، ضریب تخلخل محیط ۰/۸۲۱۴ تعیین شده است. زمان مورد نیاز برای رسیدن سیال ۲ به انتهای محیط را زمان رسوخ[2] گویند و به این صورت تعریف می‌شود که مدت زمانی که ماکزیمم کسر جرمی سیال ۲ در مخلوط دو سیال، در محل خروجی بیشتر از ۰/۵ باشد[۱۷]. توجه شود که شبیه‌سازی‌های انجام شده تا زمانی صورت می‌گیرد که سیال جابجا کننده به مرز خروجی برسد (زمان رسوخ). همان‌طوری که بیان شد در ابتدا محیط مورد بررسی با سیال با لزجت بیشتر پر شده است و سیال با لزجت کمتر به طور پیوسته و با سرعت یکنواخت از مرز سمت چپ تزریق می‌شود. حالت‌هایی که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته‌اند را می‌توان به چهار دسته ۳، ۲، ۱/۳۳۴، M=۱ تقسیم‌بندی کرد.

وابستگی نتایج عددی به اندازه شبکه در شکل ۳ بررسی شده است. در شرایطی که زاویه خیسی ۱۱۹ درجه، نسبت لزجت ۱ و عدد مویینگی برابر ۰/۰۲۰۴ است نتایج برای دو شبکه متفاوت (الف) ۴۰۱×۴۰۱ و (ب) ۸۰۱ × ۸۰۱ بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که با دو برابر کردن شبکه، نتایج عددی تغییر نمی‌کند پس این بدین معنی است که شبکه ۴۰۱×۴۰۱ نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهد. توجه شود که با دو برابر کردن شبکه، اشباع سیال جابجا کننده در زمان رسوخ کمتر از ۱/۵۳ درصد تغییر می‌کند.

۴- نتایج

۴-۱- اثرات عدد مویینگی

برای بررسی اثرات عدد مویینگی بر روی رفتار سیال باید چندین شبیه‌سازی با اعداد مویینگی مختلف صورت گیرد. در تعریف عدد مویینگی سرعت و لزجت مربوط به سیال جابجا کننده است. اعداد مویینگی مختلف با تغییر سرعت ورودی سیال جابجا کننده ایجاد می‌شود. در این بررسی برای حالت M=۱ پنج عدد مویینگی مختلف (۰/۰۱۰۲، ۰/۰۲۰۴، ۰/۰۸۱۸، ۰/۱۲۲۷ و ۰/۱۶۳۶) مورد مطالعه قرار گرفته است. برای رسیدن به این اعداد مویینگی سرعت سیال جابجا کننده در ورودی به ترتیب برابر ۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۴، ۰/۰۶ و ۰/۰۸ است. توجه شود که اعداد بیان شده در واحد شبکه بولتزمن است.



(ب) (الف)

شکل ۳- وابستگی نتایج عددی به اندازه شبکه (الف) شبکه ۴۰۱×۴۰۱ و (ب) شبکه ۸۰۱ × ۸۰۱.

الگوی توزیع دو سیال در زمان رسوخ برای حالتی که نسبت لزجت بین سیال جابجا شده و سیال جابجا کننده برابر یک باشد، در شکل ۴ و برای نسبت لزجت ۳ در شکل ۵ آورده شده است. تغییرات عدد مویینگی برای سه خیسی سطح مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل در اعداد مویینگی کم، سیال جابجا کننده قبل از اینکه بخواهد به حفره همسایه برسد، تقریباً به طور کامل فضای حفره‌ها را اشغال می‌کند. در اعداد مویینگی بالا، سیال جابجا کننده تنها می‌تواند بخشی از فضای حفره‌هایی را که از آن می‌گذرد اشغال کند. همچنین در اعداد مویینگی بالا، الگوهای انگشتی به صورت سست[3] (غیر قوی) بوده و تعداد الگوهای انگشتی و همچنین طول آن‌ها افزایش ولی ضخامت آن‌ها کاهش می‌یابد. علت این است که عدد مویینگی به صورت نسبت نیروی لزج به کشش سطح تعریف می‌شود. حال در نسبت لزجت ثابت، هر چه عدد مویینگی افزایش یابد بدین معنی است که اهمیت کشش سطح در مقابل نیروی لزج کاهش یافته است. با توجه به شکل ۴ با افزایش عدد مویینگی، قطره‌های جدا شده‌ی بسیاری از سیال جابجا شده به مواد جامد می‌چسبند یا در ناحیه حفره‌ها به دام می‌افتند. در حقیقت حتی در حالتی هم که کمترین عدد مویینگی بررسی شده است قطره‌هایی در ناحیه چسبیده به مواد جامد تشکیل شده است. قطره‌های جدا شده‌ی سیال جابجا شده در قسمت‌های چسبیده به مواد جامد، با افزایش عدد مویینگی بیشتر می‌شوند. شکل ۶ زمان رسوخ بر حسب زاویه خیسی را برای دو حالت ۳ و M=۱ نشان می‌دهد. توجه شود که اعداد بیان شده برای زمان در واحد شبکه بولتزمن است و در روش شبکه بولتزمن، واحد زمان با ts نشان داده می‌شود. با توجه به شکل با افزایش عدد مویینگی زمان رسوخ کاهش می‌یابد و سیال جابجا کننده خود را سریع‌تر به مرز خروجی می‌رساند. برای بیان بازده جابجایی دو پارامتر زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

زمان رسوخ: مدت زمانی که طول می‌کشد تا اولین انگشتی به مرز خروجی برسد.

اشباع سیال جابجا کننده: نسبت فضای اشغال شده توسط سیال جابجا کننده به فضای خالی را اشباع سیال جابجا کننده گویند و با Se نمایش می‌دهند که بازده جابجایی سیال را نشان می‌دهد. رابطه بین اشباع سیال جابجا کننده و زاویه تماس در شکل ۷ نمایش داده شده

[1] Zou and He
[2] Breakthrough time
[3] Loosely fingers

قالب پیش‌نویس مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز (لطفاً این نوشته، در فایل ارسالی حذف نشود)

است. با توجه به شکل با افزایش عدد مویینگی اشباع سیال جابجا کننده کاهش می‌یابد.

۴-۲- اثرات خیسی سطح

در این قسمت با اعمال تغییرات بر روی قدرت کشش سیال- جامد در شبیه‌سازی‌های عددی به مطالعه اثرات خیسی سطح بر فرایند جابجایی می‌پردازیم. زاویه خیسی بر فشار مویینگی حفره اثر می‌گذارد. که فشار مویینگی حفره، خود تعیین کننده نفوذ یا عدم نفوذ سیال جابجا کننده است. برای بررسی اهمیت خیسی سطح و بدون در نظر گرفتن اثر نسبت لزجت بین سیال جابجا کننده و جابجا شده کافی است الگوهای انگشتی برای خیسی سطح مختلف در حالت نسبت لزجت ۱ را رسم کنیم. با توجه به شکل ۴ در خیسی سطح مختلف (سطح خیس‌کننده، غیر خیس‌کننده و خنثی)، قطره‌های جدا شده سیال جابجا شده به صورت چسبیده به مواد جامد وجود دارند. وقتی سطح برای سیال جابجا شده خیس‌کننده است (θ=۳/۵۸)، اندازه این قطره‌ها بزرگ‌تر می‌شود. در حالت سطح غیر خیس‌کننده برای سیال جابجا شده (θ=۱۱۹)، طول انگشتی‌ها کوتاه‌تر است؛ بنابراین تشکیل انگشتی‌ها محدودتر است (این موضوع در حالت‌هایی که عدد مویینگی کمتر دارند مشهودتر است). ضخامت انگشتی‌ها در حالت سطح غیر خیس‌کننده بیشترین و در حالت سطح خیس‌کننده کمترین مقدار را دارد (این موضوع در حالت‌هایی که عدد مویینگی کمتر دارند مشهودتر است).

محیط متخلخل مورد بررسی از مجموعه‌ای از حفره‌ها تشکیل شده است. حفره‌ای باریک با شعاع r از این مجموعه را در نظر بگیرید که با سیال ۱ اشغال شده است. فرض کنید سیال ۲ می‌خواهد وارد حفره شده و سیال ۱ را جابجا کند. همان‌طور که می‌دانیم فشار مویینگی به کشش سطحی، زاویه تماس و عرض حفره بستگی دارد و برابر است با $P_C = 2\sigma\cos\theta/r$. حال فشار در ورودی و خروجی حفره را به ترتیب P_{in} و P_{out} در نظر بگیرید. در این صورت اختلاف فشار بین ورودی و خروجی حفره برابر $\Delta P = P_{in} - P_{out}$ است. اگر $\Delta P \prec P_C$ باشد سیال جابجا کننده نمی‌تواند وارد حفره شود ولی در صورتی که $\Delta P \succ P_C$ باشد سیال جابجا کننده وارد حفره می‌شود که در این حالت هر چه اختلاف ΔP و P_C بیشتر باشد سیال جابجا کننده سریع‌تر سیال ۱ را جابجا خواهد کرد. زاویه‌های مورد بررسی در این مطالعه $\theta = 58.3$ و $\theta = 119$ هستند که $\cos 58/3 = 0/52$ و $\cos 119 = -0/48$ است. در نتیجه زاویه خیسی ۱۱۹ به دلیل فشار مویینگی منفی، باعث حرکت سیال ۲ شده ولی زاویه خیسی ۵۸/۳ به دلیل فشار مویینگی مثبت مانعی برای حرکت سیال ۲ خواهد بود. پس هنگامی که سطوح محیط متخلخل آب‌دوست باشند هر چه زاویه خیسی سطوح جامد کمتر شود فشار مویینگی بحرانی برای ورود سیال جابجا کننده به حفره زیاد شده پس حجم کمتری از سیال جابجا کننده می‌تواند نفوذ کند؛ بنابراین زمان رسوخ و اشباع سیال جابجا کننده کم می‌شود. از طرفی هنگامی که سطوح محیط متخلخل آب‌گریز باشند هر چه زاویه خیسی سطوح جامد بیشتر شود قدرمطلق فشار مویینگی بحرانی برای ورود سیال جابجا کننده به حفره زیاد شده ولی به دلیل منفی بودن آن، خود عاملی برای حرکت سیال جابجا کننده خواهد بود. پس حجم بیشتری از سیال جابجا کننده می‌تواند نفوذ کند؛ بنابراین زمان رسوخ و اشباع سیال جابجا کننده بیشتر می‌شود.

با توجه به شکل ۶ با افزایش زاویه خیسی زمان رسوخ افزایش می‌یابد. تغییرات زمان رسوخ نسبت به زاویه خیسی تابع عدد مویینگی است. در اعداد مویینگی بالا تغییرات زمان رسوخ نسبت به زاویه خیسی بسیار ناچیز است ولی در اعداد مویینگی پایین این تغییرات بسیار زیاد است. برای مثال اگر زاویه خیسی از ۵۸/۳ به ۱۱۹ درجه تغییر کند زمان رسوخ برای اعداد مویینگی ۰/۰۱۰۲، ۰/۰۲۰۴، ۰/۰۸۱۸، ۰/۱۲۲۷۰ و ۰/۱۶۳۶ به ترتیب به اندازه ۱۶۶۸۰، ۴۱۹۸، ۱۱۹، ۵۰ و ۱۳ مرحله زمانی تغییر می‌کند (جدول ۴). البته زمان رسوخ به نسبت لزجت هم وابسته است که در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد.

جدول ۴- مقادیر زاویه خیسی برای حالت‌های مختلف شبیه‌سازی

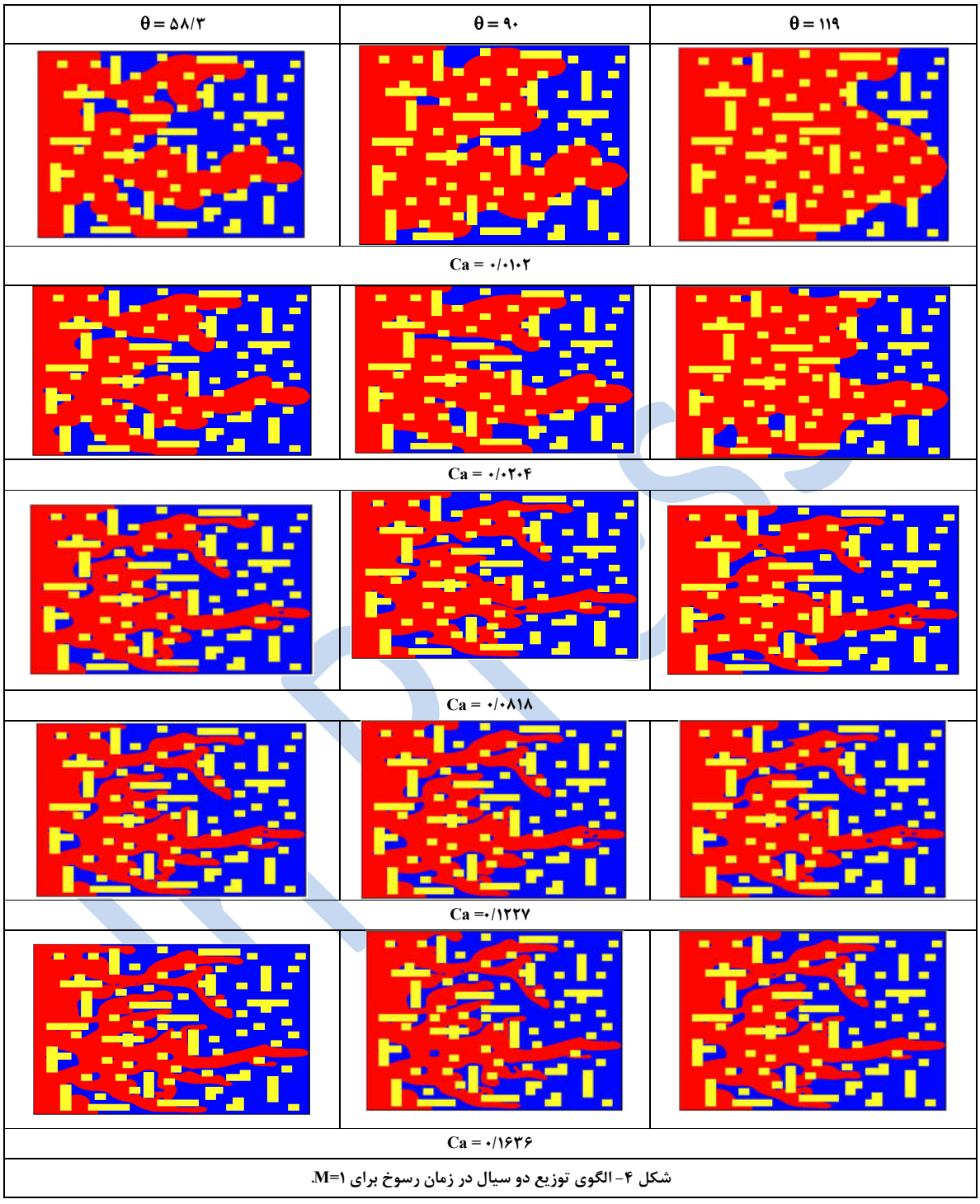
Ca	۰/۰۱۰۲	۰/۰۲۰۴	۰/۰۸۱۸	۰/۱۲۲۷	۰/۱۶۳۶
M = ۱ θ = ۵۸/۳	t_1=۳۵۸۸۹	t_1=۱۷۰۹۵	t_1=۴۰۲۷	t_1=۲۷۸۴	t_1=۲۱۴۴
M = ۱ θ = ۱۱۹	t_2=۵۲۵۶۹	t_2=۲۱۲۹۳	t_2=۴۱۴۶	t_2=۲۸۳۴	t_2=۲۱۵۷
$\Delta t = t_2 - t_1$	۱۶۶۸۰	۴۱۹۸	۱۱۹	۵۰	۱۳

با توجه به شکل ۷ برای M=۳ با افزایش زاویه تماس (وقتی خیسی سطح از خیس‌کننده به غیر خیس‌کننده تغییر کند) اشباع سیال جابجا کننده زیاد می‌شود. تغییرات اشباع سیال جابجا کننده نسبت به زاویه خیسی تابع عدد مویینگی است. در اعداد مویینگی بالا تغییرات اشباع سیال جابجا کننده نسبت به زاویه خیسی ناچیز است ولی در اعداد مویینگی پایین این تغییرات بسیار زیاد است. در حالت ۱ =M به دلیل اینکه هر دو سیال دارای لزجت برابر هستند، شرایط پیچیده خواهد شد و اشباع سیال جابجا کننده در اعداد مویینگی بالا رفتار منظمی از خود نشان نمی‌دهد.

۴-۳- اثرات نسبت لزجت

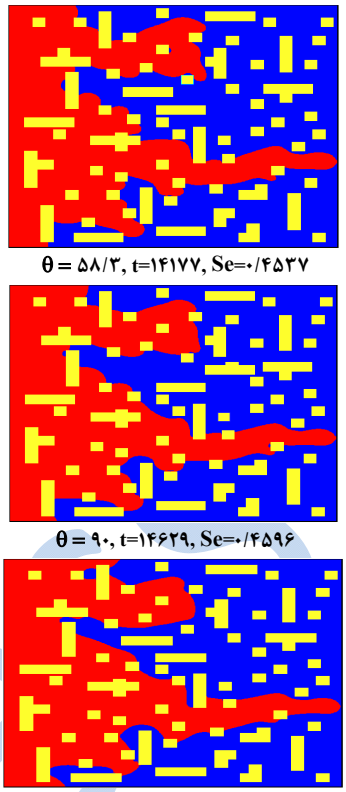
برای بررسی اثر نسبت لزجت بر رفتار سیال، شبیه‌سازی‌هایی با تغییر نسبت لزجت و با مقادیر ۳، ۲، ۱/۳۳۴، ۱=M انجام شده است. برای این منظور می‌توان با ثابت در نظر گرفتن لزجت سیال جابجا کننده، لزجت سیال جابجا شده را تغییر داد (البته با ثابت در نظر گرفتن بقیه پارامترها). به دلیل تغییر در لزجت سیال جابجا شده، کشش سطح بین دو سیال تغییر می‌کند پس در تمام حالت‌ها سرعت اولیه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که عدد مویینگی ثابت بماند. برای بررسی این اثر، عدد مویینگی ۰/۰۱۰۲ و زاویه خیسی ۱۱۹ درجه در نظر گرفته شده است. در شکل ۹ الگوی توزیع دو سیال در زمان رسوخ با هم مقایسه شده‌اند. هر چه نسبت لزجت کمتر باشد، ضخامت انگشتی‌ها بیشتر ولی طول آن‌ها کاهش می‌یابد؛ بنابراین تشکیل انگشتی‌ها محدودتر است. همچنین با توجه به شکل ۶ با کاهش نسبت لزجت زمان رسوخ افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به شکل ۷ با کاهش نسبت لزجت اشباع سیال جابجا کننده افزایش می‌یابد.

In Press



شکل ۴- الگوی توزیع دو سیال در زمان رسوخ برای M=۱.

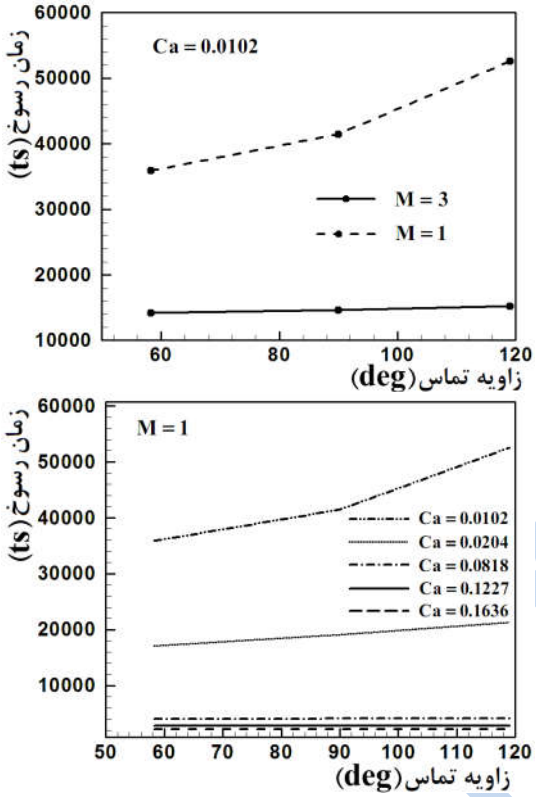
قالب پیش‌نویس مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز (لطفاً این نوشته، در فایل ارسالی حذف نشود)



شکل ۵- الگوی توزیع دو سیال در زمان رسوخ برای نسبت لزجت ۳ و عدد مویینگی ۰/۰۱۰۲(بالا زاویه ۵۸/۳، وسط ۹۰ و پایین ۱۱۹).

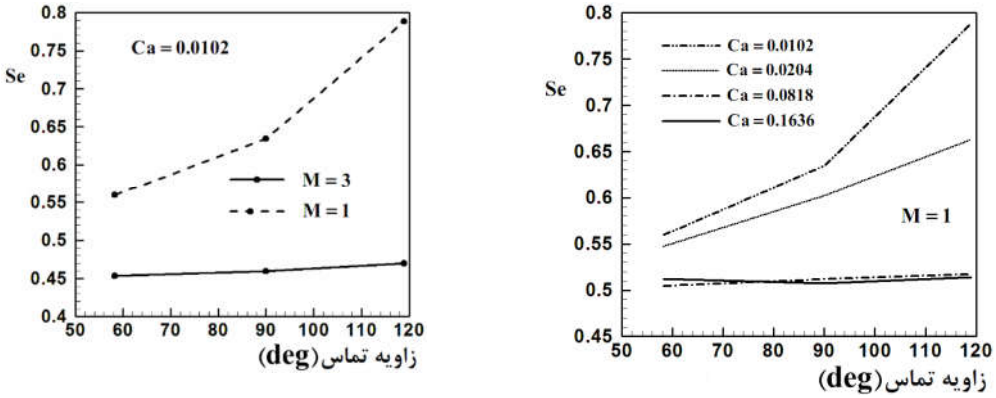
۴-۴- اثرات ترکیب لایه آب‌دوست به محیط متخلخل آب‌گریز

برای این منظور از ترکیب سطوح آب‌دوست و آب‌گریز استفاده شده است. نحوه ترکیب این سطوح در شکل ۸ نشان داده شده است. سطوح آب‌دوست دارای زاویه تماس ۵۸/۳ و با مربع‌های قرمز رنگ و سطوح آب‌گریز دارای زاویه تماس ۱۱۹ و با مربع‌های سیاه رنگ نمایش داده شده است. حالت (الف) نشان‌دهنده محیط متخلخل کاملاً آب‌گریز و حالت (ب) و (ج) نشان‌دهنده محیط با ترکیبی از سطوح آب‌دوست و آب‌گریز است که در حالت (ب) لایه‌های آب‌دوست در ۲۵ درصد ابتدایی محیط و در حالت (ج) لایه‌های آب‌دوست در ۲۵ درصد انتهایی محیط قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که اگر نسبت لزجت برابر یک، عدد مویینگی برابر ۰/۰۱۰۲ و لایه آب‌دوست در ورودی محیط متخلخل قرار گیرد به ترتیب باعث کاهش ۱۱/۸ و ۹ درصدی زمان رسوخ و اشباع می‌شود(ستون دوم از شکل ۸). اگر نسبت لزجت برابر یک، عدد مویینگی برابر ۰/۱۶۳۶ و لایه آب‌دوست در ورودی محیط متخلخل قرار گیرد به ترتیب باعث کاهش ۱ و ۱/۱۶ درصدی زمان رسوخ و اشباع می‌شود(ستون سوم از شکل ۸). پس اگر نسبت لزجت یکسان باشد (ستون دوم و سوم از شکل ۸)، ترکیب سطوح آب‌دوست و آب‌گریز اثر زیادی بر زمان رسوخ و اشباع در اعداد مویینگی پایین دارد. همچنین اگر عدد مویینگی یکسان باشد (ستون دوم و چهارم از شکل ۸) ترکیب سطوح آب‌دوست و آب‌گریز اثر زیادی بر زمان رسوخ و اشباع در نسبت‌های لزجت پایین دارد.

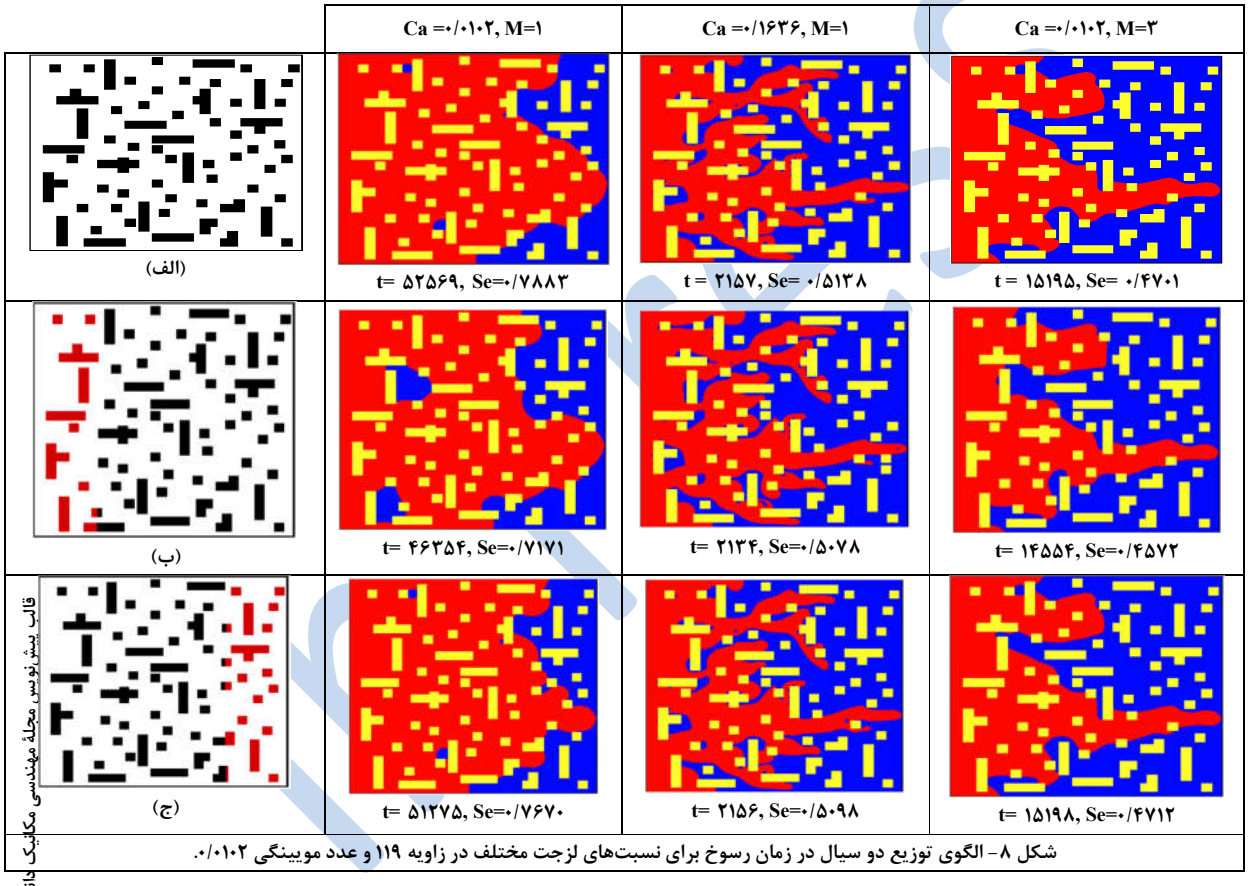


شکل ۶- زمان رسوخ بر حسب زاویه خیسی.

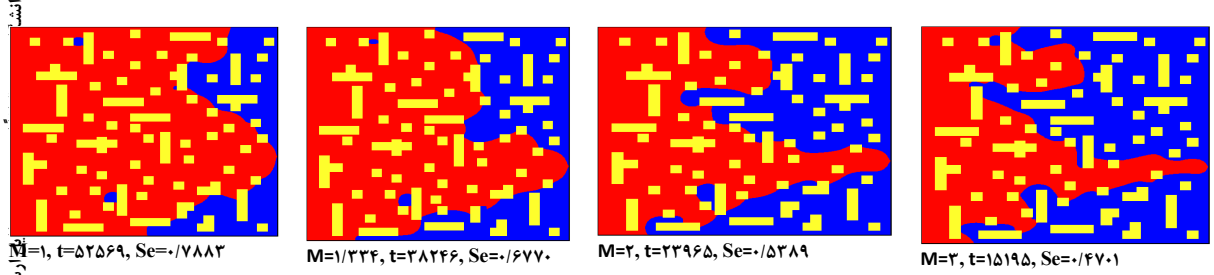
پس کاهش نسبت لزجت و عدد مویینگی منجر به افزایش اثر ترکیب سطوح آب‌دوست و آب‌گریز در محیط متخلخل می‌شود. در این بررسی کمترین نسبت لزجت برابر یک و کمترین عدد مویینگی برابر ۰/۰۱۰۲ است که نتایج آن در ستون دوم شکل ۸ آورده شده است. حال اگر در این شرایط لایه آب‌دوست در ورودی محیط متخلخل قرار گیرد به ترتیب باعث کاهش ۱۱/۸ و ۹ درصدی زمان رسوخ و اشباع می‌شود و اگر در انتهای محیط متخلخل قرار گیرد به ترتیب باعث کاهش ۲/۴ و ۲/۷ درصدی زمان رسوخ و اشباع می‌شود؛ بنابراین در این بررسی مؤثرترین حالت در ترکیب سطوح آب‌دوست و آب‌گریز در محیط متخلخل مربوط به نسبت لزجت یک، عدد مویینگی ۰/۰۱۰۲ و قرارگیری لایه آب‌دوست در ورودی محیط متخلخل است.



شکل ۷- اشباع سیال جابجا کننده بر حسب زاویه خیسی.



شکل ۸- الگوی توزیع دو سیال در زمان رسوخ برای نسبت‌های لزجت مختلف در زاویه ۱۱۹ و عدد مویینگی ۰/۰۱۰۲.



شکل ۹- الگوی توزیع دو سیال در زمان رسوخ برای نسبت‌های لزجت مختلف در زاویه ۱۱۹ و عدد مویینگی ۰/۰۱۰۲.

قالب پیش‌نویس مجلهٔ مهندسی مکانیک دانشگاه
(این رسالی حذف نشود)

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگر لایه آب‌دوست در خروجی محیط متخلخل باشد کمترین اثر را بر زمان رسوخ و اشباع دارد. همچنین با توجه به مطالب بیان شده می‌توان نتیجه گرفت:

وقتی سطح برای سیال جابجا شده به صورت غیر خیس‌کننده باشد، انگشتی‌ها متوقف، طول آن‌ها کوتاه‌تر و بنابراین تشکیل آن‌ها محدودتر است به همین دلیل سطح غیر خیس‌کننده از دیدگاه مهندسی مطلوب است. دلیل دیگر برای مطلوب بودن سطح غیر خیس‌کننده برای جابجایی سیال، اشباع سیال جابجا کننده است. همان‌طوری که گفته شد اشباع سیال جابجا کننده برای نشان دادن بازده جابجایی سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد و با افزایش زاویه تماس، اشباع سیال جابجا کننده افزایش می‌یابد پس برای جابجایی سیال، سطح غیر خیس‌کننده ترجیح داده می‌شود.

۶- سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه شهید چمران اهواز تحت گرنت شماره SCU.EM1404.122888 انجام شده است. نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه منافع متعارض دیگری ندارند.

۷- نمادها

Ca	عدد مویینگی (-)
M	نسبت لزجت (-)
Bo	عدد باند (-)
u_0	سرعت سیال جابجا کننده در ورودی (m/s)
ρ	چگالی سیال جابجا کننده در لحظه ابتدایی (Kg/m^3)
ν	لزجت سینماتیکی سیال جابجا کننده در لحظه ابتدایی (m^2/s)
σ	کشش سطحی بین دو فاز (N/m)
g	شتاب گرانش (m/s^2)
d_p	قطر حفره (m)
R	شعاع قطره (m)
p_{in}	فشار داخل قطره ($Kg/(ms^2)$)
P_{out}	فشار خارج قطره ($Kg/(ms^2)$)
Se	اشباع سیال جابجا کننده (-)
P_C	فشار مویینگی ($Kg/(ms^2)$)

۸- مراجع

[1] Liu H, Valocchi AJ, Kang Q, Werth C. Pore-scale simulations of gas displacing liquid in a homogeneous pore network using the lattice Boltzmann method. Transp Porous Media. 2013;99:555–80.

[2] Huang H, Huang JJ, Lu XY. Study of immiscible displacements in porous media using a color-gradient-based multiphase lattice Boltzmann method. Comput Fluids. 2014;93:164–72.

[3] Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. J Fluid Mech. 1988;189:165–87.

[4] Dong B, Yan YY, Li WZ, Song YC. Simulation of the influence of surface wettability on viscous fingering phenomenon in porous media. J Bionic Eng. 2010;7:267–75.

[5] Shi Y, Tang GH. Simulation of Newtonian and non-Newtonian rheology behavior of viscous fingering in channels by the lattice Boltzmann method. Comput Math Appl. 2014;68:1279–91.

[6] Dong B, Yan Y, Li W. Numerical simulation of viscous fingering phenomenon in immiscible displacement of two fluids in porous media using lattice Boltzmann method. In: Proceedings of the 2nd Micro and Nano Flows Conference; 2009 Sep 1-2; West London, UK. 2009.

[7] Dong B, Yan YY, Li WZ. LBM simulation of viscous fingering phenomenon in immiscible displacement of two fluids in porous media. Transp Porous Media. 2011;88:293–314.

[۸] شاکری نژاد ا، نظری م، کیهانی م. بررسی اثر نسبت ویسکوزیته بر روی جابجایی دو سیال غیر مخلوط شدنی در محیط متخلخل تصادفی. بیست و چهارمین همایش سالانه بین‌المللی مهندسی مکانیک ایران،ISME2016، یزد، ایران ۱۳۹۵.

[9] Zakirov TR, Khramchenkov MG. Wettability effect on the invasion patterns during immiscible displacement in heterogeneous porous media under dynamic conditions: A numerical study. J Pet Sci Eng. 2021;206:109049.

[10] Mahabadi N, Paassen LV, Battiato I, Yun TS, Choo H, Jang J. Impact of pore-scale characteristics on immiscible fluid displacement. Geofluids. 2020;2020:5759023.

[11] Qiu X, Lin M, Cao G, Jiang W, Ji L. Dynamic simulation of immiscible displacement in fractured porous media. Phys Fluids. 2024;36:053105.

[12] Nabovati A. Pore level simulation of single and two phase flow in porous media using lattice Boltzmann method. PhD thesis, University of New Brunswick, 2009.

[13] Hou S, Shan X, Zou Q, Doolen GD, Soll WE. Evaluation of two lattice Boltzmann models for multiphase flows. J Comput Phys. 1997;138:695–713.

[14] Chin J, Boek ES, Coveney PV. Lattice Boltzmann simulation of the flow of binary immiscible fluids with different viscosities using the Shan–Chen microscopic interaction model. Philos Trans R Soc Lond A. 2002;360:547–58.

[15] Zou Q, He X. On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model. Phys Fluids. 1997;9:1591–8.

[16] Ikeda M. A novel multiple-phase, multiple-component, thermal lattice Boltzmann model. PhD thesis, University of Pittsburgh, 2012.

[17] Dong B, Yan YY, Li W, Song Y. Lattice Boltzmann simulation of viscous fingering phenomenon of immiscible fluids displacement in a channel. Comput Fluids. 2010;39:768–79.

In Press