مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1396، دوره 17، شماره 9، ص‌ص 245-253

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه آزمایشگاهی ناپایداری انگشتی لزج سیال نیوتنی در محیط متخلخل شفاف با ساختاری فشرده از دانه‌های بلور شیشه‌ای

سید مجید خطیبی[1]، علی خالقی[2*]، محمود نوروزی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

* شاهرود، صندوق پستی 3619995161، khaleghi@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 خرداد 1396

پذیرش: 10 مرداد 1396

ارائه در سایت: 17 شهریور 1396

کلید واژگان:

ناپایداری انگشتی لزج

دانه‌های شیشه

محیط متخلخل

جابجایی مخلوط شدنی

چکیده

در مقاله حاضر، با رویکردی تجربی به مطالعه ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی مخلوط شدنی سیال نیوتنی پرداخته شده است. نتایج بررسی این ناپایداری در انتقال نفت از مخازن نفتی بستر زمین به سطح زمین، کاربرد گسترده‌ای دارد. به‌منظور واقعی‌تر شدن نتایج این پژوهش، محیطی متخلخل با دیواره‌های شفاف و ساختاری فشرده از دانه‌های کروی شیشه ساخته شد که نفوذپذیری آن به بستر زمین نزدیک باشد. هدف اصلی این پژوهش، بررسی اثرات نسبت لزجت، میزان دبی و عدد بی‌بعد بلاک بر نحوه رشد و شکل انگشتی‌ها و همچنین تأثیر آن‌ها بر پارامترهای فیزیکی مهمی از جمله طول اختلاط، بازده جاروبی و رشد اغتشاش به حالت پایه است. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت لزجت، ناپایداری و تعداد شاخه‌های انگشتی افزایش و انگشتی‌های ریز بیشتری تشکیل می‌شود. همچنین افزایش نسبت لزجت باعث افزایش طول اختلاط و کاهش بازده جاروبی می‌شود. با افزایش میزان دبی نیز مشاهده شد که تعداد انگشتی‌های پهن افزایش و نوک انگشتی‌ها تمایل به پخش شدن پیدا می‌کنند، علاوه بر این با بررسی نتایج مشخص شد که افزایش دبی، راندمان جاروبی را افزایش می‌دهد، اما تأثیر محسوسی بر طول اختلاط ندارد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش بلاک طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش می‌یابد.

An experimental investigation on viscous fingering instability of Newtonian fluid in transparent porous media with compact structure consisting of glass beads

Seyed Majid Khatibi, Ali Khaleghi*, Mahmood Norouzi

Mechanical Engineering Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran
* P.O.B. 3619995161, Shahrood, Iran, khaleghi @Shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 11 June 2017
Accepted 01 August 2017
Available Online 08 September 2017

Keywords:
Viscous fingering instability
Glass beads
Porous media
Miscible displacement

ABSTRACT

In this paper, the viscous fingering instability in miscible Newtonian fluid displacements is studied experimentally. Studying the results of this instability has wide applications in oil extraction from ground bed oil reservoirs to the ground surface. In order to obtain more actualized results, a porous media with transparent walls and compact structure of spherical glass beads is constructed, that has close permeability to ground bed. The main purpose of this study is to investigate the effects of viscosity ratio, flow rate and Blake dimensionless number on the quality of growth and the shape of the fingers, also their effect on important physical parameters including the mixing length, sweep efficiency and noise growth to base state. The results showed that with increasing the viscosity ratio, instability and number of finger branches increases and more tiny fingers are formed. Also, increasing the viscosity ratio increases the mixing length and decreases the sweep efficiency. Likewise, with increasing the flow rate, it was observed that the number of wide fingers increased and fingertips tend to spread. Furthermore, by studying the results it was found that increasing the flow rate, increases the sweep efficiency, but has no tangible effect on the mixing length. Also, the results show that increasing the Blake decreases the mixing length and increases the sweep efficiency.

1- مقدمه

جابجایی سیالی با لزجت بیشتر توسط سیالی با لزجت کمتر، منجر به ایجاد ناپایداری‌ای در مرز مشترک دو سیال می‌شود که نتیجه آن ایجاد ساختاری شبیه به انگشت‌ها می‌باشد؛ این ناپایداری دارای کاربردهای فراوان در فرایندهای مختلف است که ازجمله آن‌ها می‌توان به مطالعه جریان آب‌های سطحی و زیرسطحی، علوم مربوط به بررسی پراکندگی آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از مواد هیدروکربنی در مخازن و سفره‌های آب زیرزمینی، کروماتوگرافی[1] [1] و جداسازی مواد اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین این کاربردها افزایش راندمان برداشت از مخازن نفت، پس از افت فشار اولیه

[1] Chromatography

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. M. Khatibi, A. Khaleghi, M. Norouzi, An experimental investigation on viscous fingering instability of Newtonian fluid in transparent porous media with compact structure consisting of glass beads, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 207-216, 2017 (in Persian)

مخزن است. در این مرحله که ازدیاد برداشت نفت[1] نام دارد، از روش‌های مختلفی برای بیرون آوردن نفت مخزن استفاده می‌شود [2]. دریکی از این روش‌ها، از چاه تزریقی، آب به مخزن تزریق می‌شود و از چاه بهره‌برداری، نفت مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. لزجت آب از لزجت نفت خام کمتر است؛ به همین علت در این روش ناپایداری انگشتی لزج در مرز مشترک آب و نفت مشاهده می‌شود. رشد این ناپایداری باعث ورود آب به چاه‌های بهره‌برداری نفت شده که نامطلوب است و جداسازی این آب از نفت هزینه‌ها را بشدت افزایش می‌دهد. با افزایش لزجت آب می‌توان تحرک آن را نسبت به نفت کاهش داد و این ناپایداری را تا حد زیادی مهار کرد.

به‌دلیل کاربردهای فراوان این ناپایداری، در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای روی ناپایداری انگشتی لزج صورت گرفته است. ازجمله مطالعات تئوری که در زمینه جابجایی سیال‌های نیوتنی انجام شده می‌توان به بررسی پایداری خطی جابجایی مخلوط شدنی نفت و یک محلول با لزجت کمتر از نفت پرداخت که توسط پرین [3] انجام شد. او همچنین روش‌ها و مکانیزم‌های پخش یک سیال در سیال دیگر را مورد بررسی قرار داد. هلر [4] نیز در روند بررسی پایداری یک جابجایی مخلوط شدنی، به معادله مقدار ویژه ناهمگن مرتبه دومی رسید که مسیر پیشرفت اغتشاشات را مشخص می‌کرد. او نواحی پایدار را با توجه به نرخ دبی ورودی، تغییرات لزجت و نیز تغییرات چگالی مورد بررسی قرارداد. در این زمان تن و هومسی [6,5] به‌صورت تئوری، تحلیلی جامع و کامل در مورد پایداری جابجایی‌های مخلوط شدنی در جریان‌های مستقیم‌الخط و شعاعی ارائه کردند. این دو با استفاده از تقریب شبه خطی به پیش‌بینی نرخ رشد اغتشاشات و مقایسه آن‌ها با پاسخ تحلیلی به‌دست آمده برای زمان اولیه پرداختند. پیس‌من و همکاران [7] نیز با استفاده از روش تفاضل محدود به شبیه‌سازی غیرخطی این ناپایداری در جریان‌های مخلوط شدنی پرداختند. در ادامه زیمرمن و هومسی [8] با استفاده از روش طیفی[2] این ناپایداری را برای محیط‌هایی با پراکندگی ناهمسانگرد مورد مطالعه قراردادند. آن‌ها پراکندگی را وابسته به‌سرعت در نظر گرفته و به بررسی تأثیرات این ناهمسانگردی در شکل‌گیری انگشتی‌ها پرداختند. این دو همچنین این ناپایداری را در جریان مخلوط شدنی به‌صورت سه‌بعدی نیز شبیه‌سازی کرده [9] و با مشاهده نتایج به‌دست آمده متوجه شدند که هیچ مکانیزم جدیدی در شکل‌گیری انگشتی‌ها در حالت سه‌بعدی مشاهده نمی‌شود. بنابراین نتیجه گرفتند که برای بررسی رفتار این ناپایداری در شرایط متفاوت، همان حالت دوبعدی کافی و مفید است و نیازی به بررسی آن در حالت سه‌بعدی نیست. در ادامه می‌توان به مطالعه قسمت و عزایز [10] در تحلیل پایداری خطی این ناپایداری در محیطی با تانسور پراکندگی ناهمسانگرد و وابسته به‌سرعت جریان، اشاره کرد؛ آن‌ها طول موج‌های بحرانی این ناپایداری را در حالت‌های خاص معرفی کرده و مورد بررسی قراردادند. نوروزی و شوقی [11] نیز اثر ناهمسانگردی را بر روی ناپایداری انگشتی در جابجایی مخلوط شدنی مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که با افزایش پراکندگی و کاهش نفوذپذیری، ناپایداری افزایش می‌یابد. از جمله جدیدترین کارهای عددی که با استفاده از شبکه بولتزمن برای نسبت لزجت های مختلف انجام‌شده مطالعه صالح‌آبادی و همکاران [12] هست که رژیم‌های ویسکوز فینگرینگ و کپیلاری فینگرینگ را بررسی و مقایسه کردند. جکسون و همکاران [13] نیز به‌صورت عددی این ناپایداری را در حالت مخلوط شدنی در سلول هل- شاو[3] برای نفوذپذیری‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند.

بررسی آزمایشگاهی این ناپایداری نیز اولین بار توسط هیل و همکاران [14] برای جریان‌های مخلوط شدنی گزارش شد. او بر پایه نیرویی براساس اختلاف فشار و نیز اغتشاشی در سطح مشترک دو سیال مورد آزمایش، به بررسی این ناپایداری پرداخت. بررسی سطح مشترک دو سیال مخلوط نشدنی نیز توسط سافمن و تیلور [15] انجام پذیرفت. آن‌ها با استفاده از یک سلول هل- شاو و یک سیستم جریانی که از هوا و گلیسیرین تشکیل شده بود به بررسی آشفتگی‌ها و اغتشاشات به وجود آمده در سطح مشترک دو سیال پرداختند. مطالعات آزمایشگاهی متعددی نیز توسط هابرمن [16] درزمینه تأثیرات نسبت تحرک بر راندمان جابجایی و نیز چگونگی شکل‌گیری ناپایداری انگشتی صورت گرفت. او در مطالعاتش به این نتیجه رسید که نسب تحرک دو سیال نقش بسیار بیشتری از ناهمگنی محیط متخلخل در پیشروی ناپایداری دارد. داکرد و همکاران [17] اولین بار در سلول هل – شاو شعاعی به بررسی جابجایی غیرنیوتنی پرداختند. در مطالعات جدیدتر صغیر و همکاران [18] به بررسی ناپایداری انگشتی در حالتی که سیالات به‌کار رفته با یکدیگر اختلاف دما داشته باشند، پرداختند. مالهوترا و شرما [19] نیز با استفاده از سلول هل – شاو به بررسی کیفی اثرات الاستیک بر سیال جابجا شونده پرداختند و مشاهده کردند حضور اثرات الاستیک باعث تغییر الگوی انگشتی‌ها می‌شود.

با بررسی مطالعاتی که تاکنون روی این پدیده انجام شده می‌توان دریافت که مطالعه این ناپایداری در حالت دوبعدی کافی است، لذا استفاده از سلول هل- شاو برای شبیه‌سازی محیط متخلخل امری رایج بوده است؛ اما نفوذپذیری[4] این سلول در مقایسه با مخازن نفتی بستر زمین اختلاف زیادی دارد که در ادامه بیان خواهد شد. در این مطالعه به‌منظور کاربردی‌تر شدن نتایج و شبیه‌سازی دقیق‌تر محیط متخلخل مخازن نفتی زمین، محیط متخلخل شفاف دوبعدی‌ای ساخته شده است که تخلخل[5] و نفوذپذیری آن به‌مراتب به مخازن نفتی بستر زمین نزدیک‌تر است. در آزمایش‌ها ابتدا به بررسی افزایش نسبت لزجت و سپس به مطالعه افزایش میزان دبی در جابجایی مخلوط شدنی سیال نیوتنی توسط سیال نیوتنی در حالت افقی پرداخته شده است. با استفاده از یک دوربین باکیفیت نیز رخداد این ناپایداری در هر آزمایش ضبط‌شده و پس از ویرایش تصویرها، برای تحلیل نتایج، عملیات پردازش تصویر[6] روی آن‌ها انجام شده است.

2- دستگاه آزمایش

به‌منظور ایجاد محیط متخلخلی که بتوان ناپایداری را در آن مشاهده کرد، محفظه‌ای شفاف از پلکسی گلس[7] ساخته شد که در "شکل 1" مشاهده می‌شود. این محفظه دارای شکافی به ضخامت 4.5mm است. طول این شکاف 400mm و عرض آن 159mm است. داخل این شکاف از مخلوط همگن دانه‌های شیشه[8] کروی به قطر 0.6-0.9mm به‌صورت تصادفی، فشرده و پرشده و دو سر شکاف با صفحات توری بسته شده است.

تزریق سیال جابجا کننده توسط پمپ پریستالتیک[9] و با استفاده از دمپر انجام می‌شود. به‌منظور یکنواخت و خطی کردن جریان سیال جابجا کننده در تمام مقطع محیط متخلخل، از کلکتور، کانال پایدارکننده جریان و شیر خطی

[2] Enhanced Oil Recovery
[2] Spectral Method
[3] Hele-Shaw cell

[4] Permeability
[5] Porosity
[6] Image processing
[6] Plexiglass
[7] Glass beads
[9] Peristaltic pump of Longer company model BT100-1F

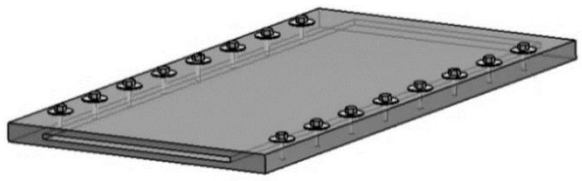


Fig. 1 Transparent box porous media

شکل 1 محفظه شفاف محیط متخلخل

کننده در ورودی محیط متخلخل، استفاده شده است. "شکل 2" شماتیک دستگاه آزمایش را نشان می‌دهد.

شیر ورودی و خروجی محیط متخلخل با الهام گرفتن از مکانیزم شیر توپی[1]، به‌گونه‌ای ساخته شده که به‌محض باز شدن، دو سیال در تمام مقطع محیط متخلخل در یک لحظه باهم در تماس قرار بگیرند.

3- روابط استفاده شده و محاسبات

نفوذپذیری در سلول هل- شاو از رابطه (1) به دست می‌آید [20].

$$k = \frac{b^2}{12} \tag{1}$$

b فاصله بین دو صفحه سلول می‌باشد. برای محاسبه نفوذپذیری محیط متخلخل ساخته شده در این مطالعه، معادله مومنتوم دارسی با توجه به هندسه جریان در این محیط، به‌صورت رابطه (2) نوشته می‌شود [21].

$$k = \frac{Q\mu L}{\Delta P A} \tag{2}$$

در این معادله L طول و A سطح مقطع ورودی محیط متخلخل است که در "شکل 4" نشان داده شده است.

برای به دست آوردن نفوذپذیری محیط متخلخل ساخته شده، آب را با دبی‌های مختلف به آن تزریق و هر بار اختلاف فشار دو طرف محیط متخلخل اندازه گرفته شد. نتایج این آزمایش‌ها به‌صورت "شکل 5" به دست آمد.

با محاسبه شیب خطی که بر داده‌های "شکل 5" منطبق شده و قرار دادن آن در رابطه (2) همچنین جایگذاری ابعاد محیط و لزجت آب در این رابطه، نفوذپذیری محیط $k = 404 \times 10^{-12}\mathrm{m}^2$ به‌دست می‌آید. سلول هل- شاوی بافاصله بین دو صفحه $b = 1\mathrm{mm}$ [19] نفوذپذیری‌ای برابر با $k = 8.33 \times 10^{-8}\mathrm{m}^2$ خواهد داشت. مشاهده می‌شود که نفوذپذیری محیط متخلخل ساخته شده در این پژوهش، حدود 206 برابر کمتر از سلول هل- شاو بیان شده است. با توجه به یکنواخت بودن نفوذپذیری در تمام محیط متخلخل ساخته شده، در بررسی ناپایداری انگشتی از رابطه (3) برای نشان دادن نسبت لزجت بین سیال‌های جابجا کننده و جابجا شونده استفاده می‌کنیم.

$$R = \ln\frac{\mu_2}{\mu_1} \tag{3}$$

همچنین تخلخل[2] نیز به‌صورت رابطه (4) محاسبه می‌شود.

$$\varphi = \frac{V_\mathrm{V}}{V_\mathrm{T}} \tag{4}$$

با محاسبه حجم منافذ محیط متخلخل ساخته شده، تخلخل φ=0.39 به دست می‌آید. با بررسی تخلخل و نفوذپذیری ماسه‌سنگ نفت[3] [21] و مقایسه آن با این پارامترها در محیط متخلخل ساخته شده، مشاهده می‌شود که با تقریب قابل قبولی این محیط مشابه با ماسه‌سنگ نفت است. لذا نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به واقعیت نزدیک‌تر بوده و برای مخازن نفتی که از ماسه‌سنگ نفت تشکیل شده‌اند، کاربردی خواهد بود. لازم به ذکر است که در این مطالعه با توجه به محدودیت‌های ساخت ستاپ آزمایشگاهی فرض بر شبیه‌سازی قسمتی از مخزن ماسه‌سنگ نفت با تغییرات عمق کم و تخلخل و نفوذپذیری ثابت می‌باشد.

عدد بی‌بعد بلاک[4] به‌صورت رابطه (5) تعریف می‌شود [22].

$$\mathrm{Bl} = \frac{D_h \rho u}{\mu(1-\varphi)} \tag{5}$$

از این عدد برای سیال تزریق شونده به محیط متخلخل استفاده می‌شود. در رابطه (5) $\boldsymbol{D}_\mathbf{h}$ قطر هیدرولیکی محیط متخلخل می‌باشد که از رابطه (6) به دست می‌آید[23].

$$D_h = \frac{\varphi}{(1-\varphi)} D_p \tag{6}$$

در رابطه (6) D_p میانگین قطر دانه‌های شیشه کروی محیط متخلخل می‌باشد. با استفاده از رابطه (6) $D_\mathrm{h} = 4.79 \times 10^{-3}\mathrm{m}$ به دست می‌آید.

4- تهیه نمونه سیال‌های مورد آزمایش

در این پژوهش برای انجام آزمایش‌ها از آب و محلول‌های مختلف آب و گلیسیرین استفاده شده که در جدول 1، لزجت و درصد حجمی گلیسیرین برای هر نمونه بیان شده است. برای محاسبه لزجت‌ها از دستگاه ویسکومتر دیجیتال[5] استفاده شده است. به‌منظور افزایش دقت سعی شده تا اندازه‌گیری لزجت نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها در شرایط محیطی یکسان انجام شود. برای مشاهده بهتر مرز ناپایداری در آزمایش‌ها، قبل از محاسبه لزجت، به نمونه‌هایی که نقش سیال جابجا کننده را دارند، رنگ خوراکی مشکی اضافه شده است.

5- شرح آزمایش، نتایج، بحث و بررسی

در هر آزمایش برای تصویربرداری از پدیده ناپایداری انگشتی لزج، از یک دوربین باکیفیت 1920 × 1080 پیکسل و سرعت 30 فریم بر ثانیه استفاده شده؛ سپس با استفاده از نرم‌افزار ادوب افتر افکت[6]، ناحیه موردنظر برای پردازش تصویر به‌طور دقیق جداشده[7] است. در مرحله بعد به کمک نرم‌افزار متلب اغتشاش موجود در تصویرها کاهش پیدا کرده و درنهایت نیز این تصویرها به‌منظور تحلیل و عملیات پردازش تصویر در نرم‌افزار متلب تبدیل به تصویرهای باینری[8] شدند. در "شکل 6" به‌طور ساده عملیات پردازش تصویر در زمان‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول 1 لزجت و درصد حجمی گلیسیرین در نمونه‌های مختلف مورد استفاده در آزمایش

Table 1 Viscosity and volume fraction of glycerin in the different samples used in the experiment

نام نمونه	درصد حجمی گلیسیرین در نمونه	لزجت (cp) در دمای 25 °C
a	79.5%	63.6
b	82.8%	89.2
c	87.8%	159.2
d	92%	222.9
e	97.9%	645
آب	0%	0.89

[1] Ball valve
[2] Porosity
[3] Oil sand

[4] Blake number
[2] Digital viscometer of Brookfield company model DV-E/LV
[6] Adobe After Effect
[7] Crop
[8] Binary picture

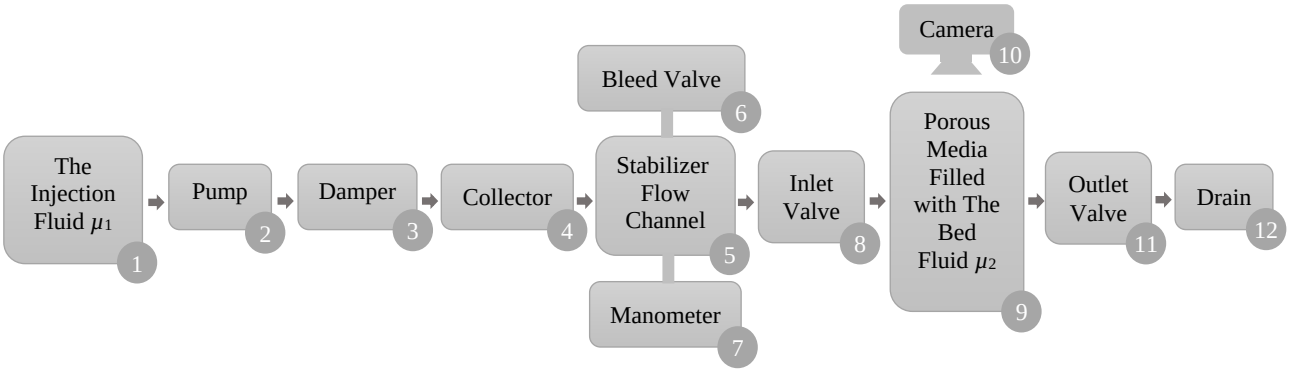


Fig. 2 Setup schemati

شکل 2 شماتیک دستگاه آزمایش

در "شکل 7" نیز به‌صورت شماتیک، طول اختلاط نشان داده شده است. برای بی‌بعدسازی طول اختلاط، این فاصله بر طول کل تقسیم شده است. بازده جاروبی نیز به‌صورت نسبت مساحت مشکی (سیال جابجا کننده) به مساحت کل تعریف شده که بی‌بعد است. یکی دیگر از پارامترهای کمکی برای بررسی ناپایداری انگشتی لزج که در مطالعه حاضر به آن پرداخته شده است، نسبت رشد اغتشاش به حالت پایه است که از تقسیم طول اختلاط به حالت پایه به‌دست می‌آید. حالت پایه ناحیه‌ای از محیط متخلخل است که سیال جابجا کننده در کل مقطع وجود دارد و از آن‌جا به بعد طول اختلاط محاسبه می‌شود.

همان‌طور که قبلاً در رابطه با ازدیاد برداشت نفت بیان شد، جاروب کردن نفت موجود در مخزن به کمک آبی که از چاه تزریقی به مخزن تزریق می‌شود تا زمانی مطلوب است که آب وارد چاه بهره‌برداری نفت نشود [2]؛ بر همین اساس در این مطالعه نیز برای هر آزمایش، عملیات پردازش تصاویر باینری در نرم‌افزار متلب و رسم نمودارهای مربوطه تا لحظه‌ای که اولین پیکسل مشکی در انتهای تصویر ظاهر شود یا به عبارتی لحظه‌ای که اولین انگشتی سیال جابجا کننده به خروجی محیط متخلخل برسد، ادامه دارد. ملاک عمل در تحلیل و بررسی پارامترهایی مثل طول اختلاط، بازده جاروبی و رشد نویز به حالت پایه در هر آزمایش، لحظه‌ای است که اولین انگشتی سیال جابجا کننده تمام طول محیط را طی کرده و به انتها رسیده است؛ لذا داده‌ها در این لحظه برای ما ارزشمند بوده و در مقایسه آزمایش‌های مختلف این لحظه مدنظر است.

5-1- تأثیر افزایش نسبت لزجت

"شکل 8"، آزمایش 1 را نشان می‌دهد که در آن نمونه b ($\mu = 89.2$cp) به نمونه d ($\mu = 222.9$cp) با دبی 5ml/min تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود 2.5 برابر سیال تزریق شونده است (R=0.916). مشاهده می‌شود که سیال جابجا کننده تمایل به کانالیزه شدن دارد.

"شکل 9"، آزمایش 2 را نشان می‌دهد که در آن نمونه a ($\mu = 63.6$cp) به نمونه e ($\mu = 645$cp) با دبی 5ml/min تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود 10 برابر سیال تزریق شونده است (R=2.31). مشاهده می‌شود که سیال جابجا کننده نسبت به آزمایش 1 تمایل کمتری به کانالیزه شدن دارد و به‌صورت چند شاخه‌ای رشد می‌کند.

"شکل 10"، آزمایش 3 را نشان می‌دهد که در آن آب ($\mu = 0.89$cp) به نمونه d ($\mu = 222.9$cp) با دبی 5ml/min تزریق می‌شود. در این آزمایش لزجت سیال بستر حدود 250 برابر سیال تزریق شونده است (R=5.5). مشاهده می‌شود که تمایل سیال جابجا کننده برای شاخه شاخه شدن و ایجاد انگشتی‌های ریز افزایش پیدا کرده و سرعت پیش روی سیال نیز بیشتر شده است.

با مقایسه "شکل‌های 8، 9 و 10" و مشاهده انگشتی‌ها در یک‌زمان

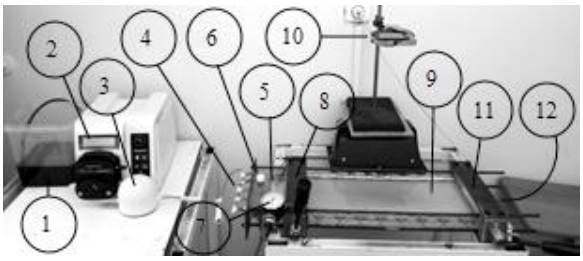


Fig. 3 Setup

شکل 3 دستگاه آزمایش

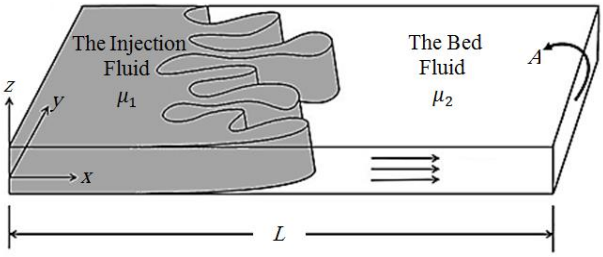


Fig. 4 Flow geometry in porous media

شکل 4 هندسه جریان در محیط متخلخل

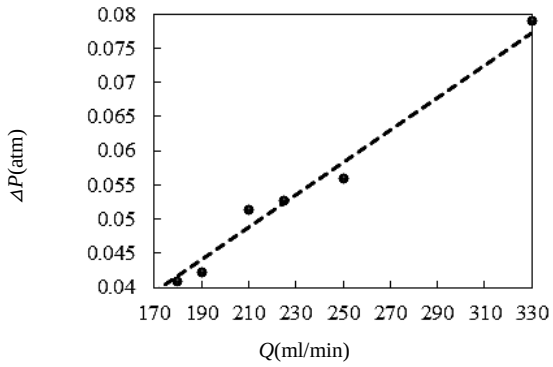


Fig. 5 The pressure difference of both sides of porous media at different flow of water injection

شکل 5 اختلاف فشار دو سر محیط متخلخل در دبی‌های مختلف تزریق آب

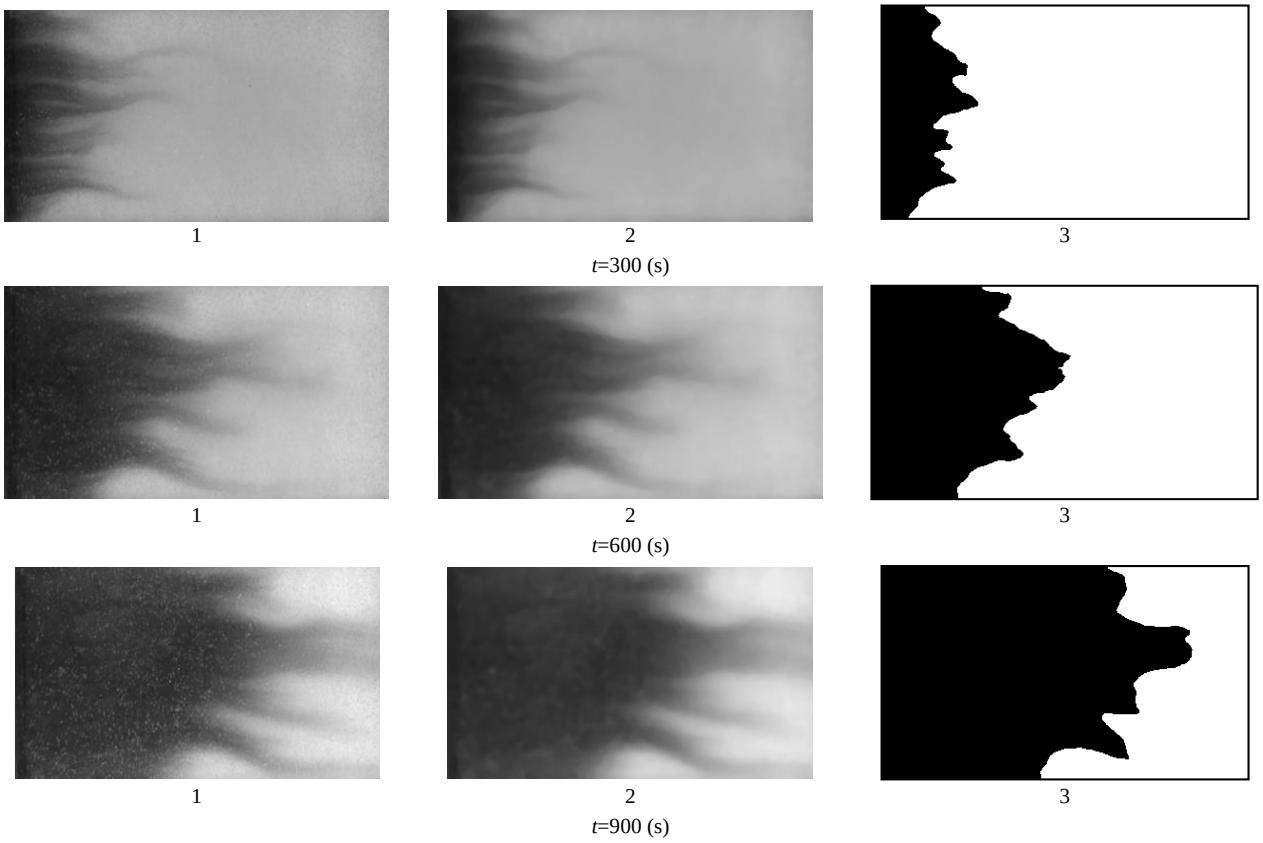


Fig. 6 The image processing, (1) the recorded image, (2) image noise reduction in MATLAB, (3) binary pictures in MATLAB

شکل 6 نحوه پردازش تصویر، (1) تصویر ضبط شده، (2) کاهش اغتشاش تصویر در متلب، (3) باینری کردن تصویر در متلب

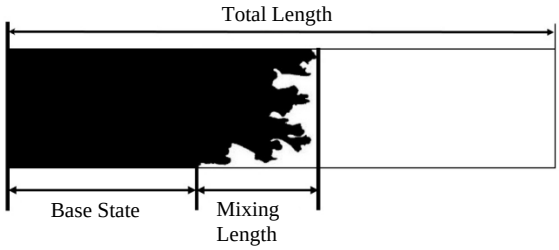


Fig. 7 Mixing Length schematic

شکل 7 شماتیک طول اختلاط

مشخص در Rهای مختلف می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R، تمایل انگشتی‌ها به پخش شدن افزایش می‌یابد. نتایج گزارش‌شده حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی پیشین حاکی از آن است که در دبی ثابت این ناپایداری و طول اختلاط تنها به نسبت لزجت دو سیال بستگی دارد، به‌طوری‌که با افزایش R، پدیده تشدید و با کاهش آن تضعیف می‌شود؛ این موضوع را زیمرمن و هومسی [8] در نتایج خود گزارش کرده‌اند. در "شکل 11" طول اختلاط برای Rهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت این مطالعه نیز نتایج عددی گذشته را تائید می‌کنند. هرچند که در زمان‌هایی ممکن است طول اختلاط با افزایش R افزایش پیدا نکند، اما همان‌طور که قبلاً گفته شد آخرین نقطه در هر نمودار اهمیت دارد، لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش R طول اختلاط و سرعت پیشروی انگشتی‌ها افزایش می‌یابد.

با افزایش R، بازده جاروبی کاهش می‌یابد. با توجه به مشاهدات عینی علت این رفتار را می‌توان به جاروب نشدن کامل سیال بستر توسط سیال تزریق شونده در R های بزرگ عنوان کرد. کاهش غلظت رنگ مشکی با افزایش R در "شکل‌های 8، 9 و10" گویای این مطلب است. در R های بزرگ، سیال تزریق شونده بیشتر از این‌که بخواهد سیال بستر را در تمام ضخامت محیط متخلخل (4.5 mm) جاروب کند، به دنبال پیدا کردن خلل و فرج‌هایی است که بتواند سریع‌تر به حرکت خود ادامه دهد. در "شکل 12"

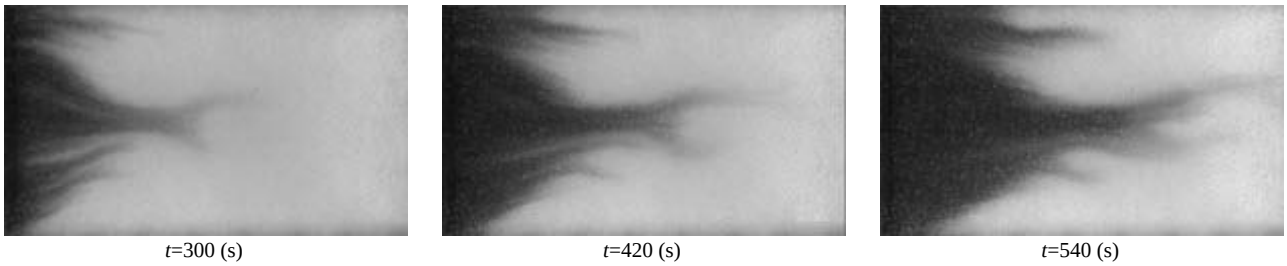
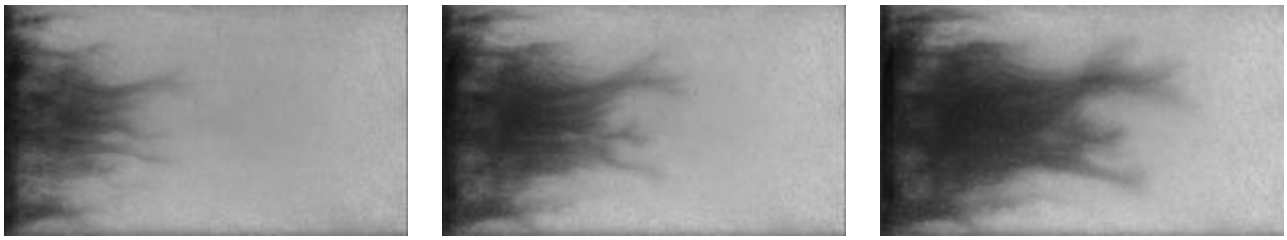


Fig. 8 Experiment 1, injection sample b to sample d, Q=5ml/min, R=0.916

شکل 8 آزمایش 1، تزریق نمونه b به نمونه d، Q=5ml/min و R=0.916.



t=300 (s) *t*=420 (s) *t*=540 (s)

Fig. 9 Experiment 2, injection sample a to sample e, *Q*=5ml/min, *R*=2.31, $\mathrm{Bl} = 1.73 \times 10^{-2}$

شکل 9 آزمایش 2، تزریق نمونه a به نمونه e، *Q*=5ml/min، *R*=2.31 و $\mathrm{Bl} = 1.73 \times 10^{-2}$

t=300 (s) *t*=420 (s) *t*=540 (s)

Fig. 10 Experiment 3, injection water to sample d, *Q*=5ml/min, *R*=5.5 .

شکل 10 آزمایش 3، تزریق آب به نمونه d، *Q*=5ml/min و *R*=5.5

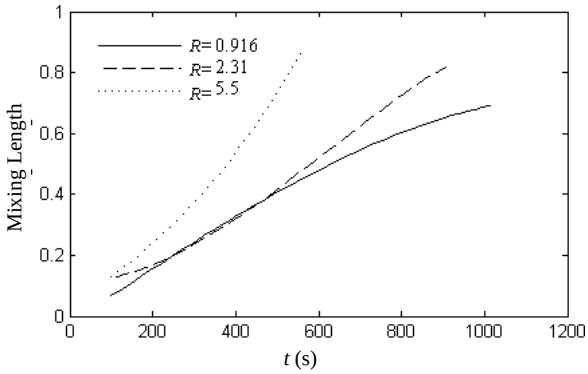


Fig. 11 Mixing Length for different viscosity ratio, *Q*=5ml/min

شکل 11 طول اختلاط برای نسبت لزجت های مختلف، *Q*=5ml/min

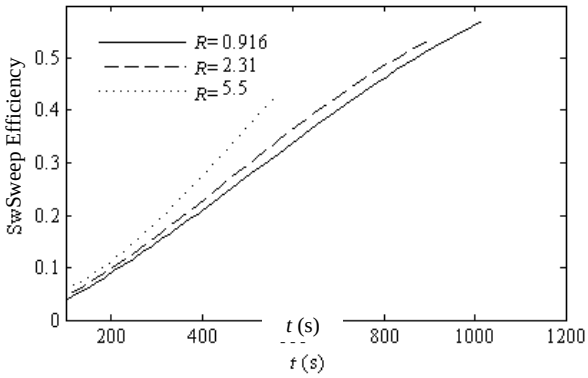


Fig. 12 Sweep Efficiency for different viscosity ratio, *Q*=5ml/min

شکل 12 بازده جاروبی برای نسبت لزجت های مختلف، *Q*=5ml/min

بازده جاروبی برای *R* های مختلف نشان داده شده است.

"شکل 13" رشد اغتشاش به حالت پایه را در *R* های مختلف نشان می‌دهد. هر چه مقدار این پارامتر کمتر باشد نشان‌دهنده کوچک‌تر بودن انگشتی‌ها و جاروب شدن بهتر محیط متخلخل توسط سیال تزریق شونده است. با بررسی نقطه پایانی هر نمودار می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش *R* رشد اغتشاش به حالت پایه افزایش می‌یابد. از بررسی "شکل 11" نیز می‌توان نتیجه گرفت که در هرلحظه از آزمایش با افزایش *R* طول اختلاط یا ثابت مانده یا افزایش می‌یابد، بنابراین نوسان هر یک از نمودارها در "شکل 13" مربوط به تغییرات حالت پایه است. در هر *R* مشخص، آن‌جا که رشد حالت پایه بیشتر از رشد طول اختلاط است، نمودار نزولی و جایی که رشد حالت پایه کمتر از رشد طول اختلاط است، نمودار صعودی است.

5-2- تأثیر افزایش دبی

"شکل 14"، آزمایش‌های 4، 5 و 6 را نشان می‌دهد، در این آزمایش‌ها تزریق نمونه a ($\mu = 63.6\mathrm{cp}$) به نمونه c ($\mu = 159.2\mathrm{cp}$) برای دبی‌های مختلف در زمان‌های مشخص نشان داده شده است و در تمام آن‌ها لزجت سیال بستر حدود 2.5 برابر سیال تزریق شونده است (*R*=0.916). بررسی تصاویر نشان می‌دهد سیال تزریق شونده بیشتر تمایل دارد از مسیر انگشتی‌ای که از قبل به‌وجود آمده به حرکت ادامه دهد. در دبی پایین سیال فرصت دارد تا وارد

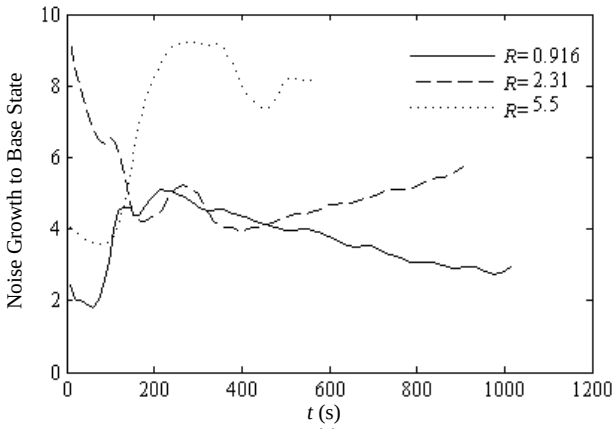


Fig. 13 Noise Growth to Base State for different viscosity ratio, *Q*=5ml/min

شکل 13 رشد اغتشاش به حالت پایه برای نسبت لزجت های مختلف، *Q*=5ml/min

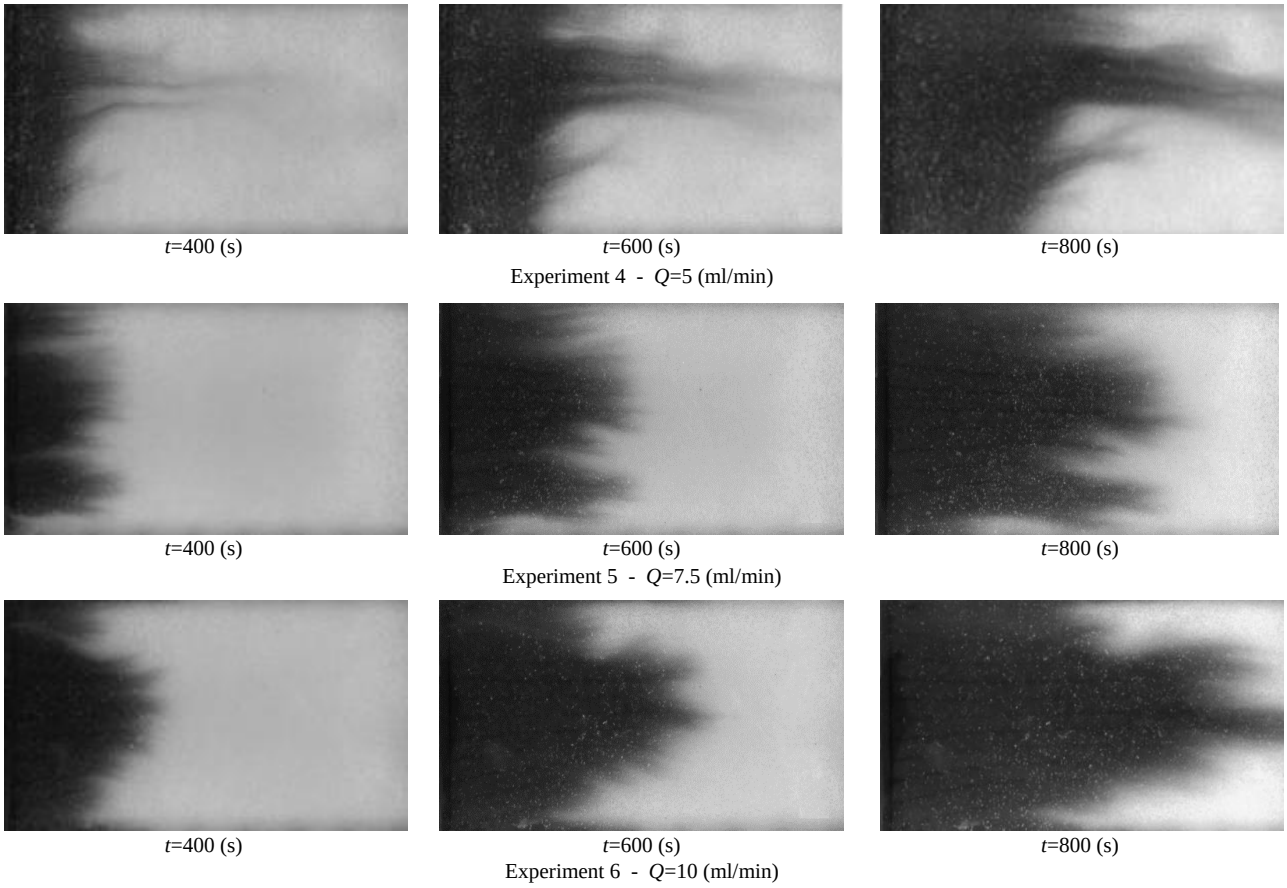


Fig. 14 Injection sample a to sample c, (R=0.916)

شکل 14 تزریق نمونه a به نمونه c، (R=0.916)

کانال انگشتی‌ای شود که از قبل به‌وجود آمده و باعث رشد بیشتر آن شود؛ اما با افزایش دبی، تعداد انگشتی‌های پهن افزایش می‌یابد. نکته دیگر پخش شدن انگشتی‌ها در جهات مختلف با افزایش دبی است که باعث افزایش جاروب کردن محیط می‌شود.

"شکل 15"، طول اختلاط را برای تزریق نمونه a ($\mu = 63.6$cp) به نمونه c ($\mu = 159.2$cp) در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، طول اختلاط به مقدار جزئی کاهش پیدا می‌کند.

"شکل 16"، بازده جاروبی را برای تزریق نمونه a ($\mu = 63.6$cp) به نمونه c ($\mu = 159.2$cp) در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به اختلاف لزجت کم سیال جابجا کننده با سیال بستر و با بررسی "شکل 14"، علت افزایش بازده جاروبی با افزایش دبی را می‌توان شکل‌گیری انگشتی‌های پهن بیشتر و پخش شدن نوک انگشتی‌ها عنوان کرد.

3-5- تأثیر افزایش عدد بلاک

"شکل 17"، آزمایش 7 را نشان می‌دهد که در آن نمونه a ($\mu = 63.6$cp) به نمونه e ($\mu = 645$cp) با دبی 7.5ml/min تزریق می‌شود. با استفاده از رابطه (5) عدد بلاک برای سیال تزریق شونده در این آزمایش $\mathrm{Bl} = 2.6 \times 10^{-2}$ به دست می‌آید. مشاهده می‌شود که سیال تزریق شونده در تمام

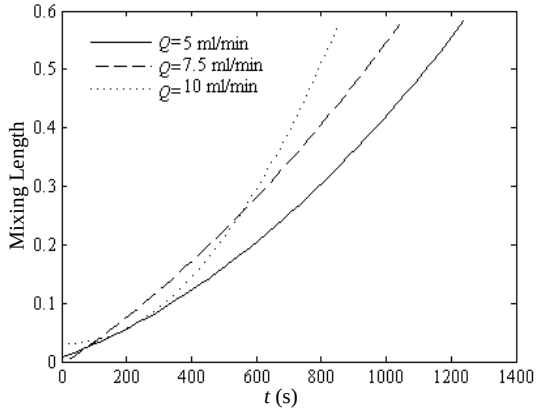


Fig. 15 Mixing Length for different flow, (R=0.916).

شکل 15 طول اختلاط برای دبی‌های مختلف، (R=0.916).

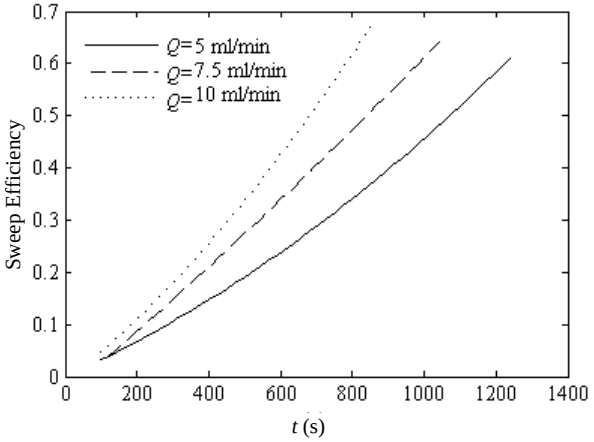
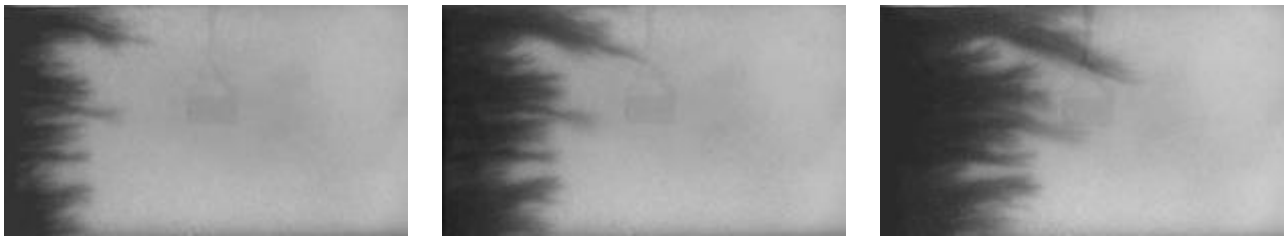


Fig. 16 Sweep Efficiency for different flow, (R=0.916).

شکل 16 بازده جاروبی برای دبی‌های مختلف، (R=0.916).



t=300 (s) t=420 (s) t=540 (s)

Fig. 17 Experiment 7, injection sample a to sample e, Q=7.5ml/min, R=2.31, $\mathrm{Bl} = 2.6 \times 10^{-2}$

شکل 17 آزمایش 7، تزریق نمونه a به نمونه e، Q=7.5ml/min، R=2.31 و $\mathrm{Bl} = 2.6 \times 10^{-2}$

عرض محیط متخلخل با ایجاد شاخه‌های ریز به‌خوبی بستر را جاروب کرده و تمایلی زیادی به کانالیزه شدن ندارد. با مقایسه "شکل‌های 17 و 9" می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش عدد بلاک یا به عبارتی افزایش نیروهای اینرسی، ناپایداری کاهش می‌یابد؛ به‌عبارت‌دیگر تعداد شاخه‌های انگشتی ریز در مرز ناپایداری افزایش و کانالیزه شدن کاهش می‌یابد.

در آزمایش 2 نیز عدد بلاک $\mathrm{Bl} = 1.73 \times 10^{-2}$ هست. در آزمایش‌های 2 و 7 لزجت سیال بستر حدود 10 برابر سیال تزریق شونده است (R=2.31).

"شکل 18"، طول اختلاط را برای تزریق نمونه a ($\mu = 63.6\mathrm{cp}$) به نمونه e ($\mu = 645\mathrm{cp}$) در اعداد بلاک مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد بلاک، طول اختلاط کاهش پیدا می‌کند. به این دلیل که با افزایش عدد بلاک تمایل سیال تزریق شونده به ایجاد شاخه‌های ریز در تمام مقطع محیط به‌جای جریان یافتن در چند شاخه‌های بزرگ و رشد آن، افزایش می‌یابد.

"شکل 19"، بازده جاروبی را برای تزریق نمونه a ($\mu = 63.6\mathrm{cp}$) به نمونه e ($\mu = 645\mathrm{cp}$) در اعداد بلاک مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد بلاک بازده جاروبی افزایش می‌یابد. علت این رفتار را می‌توان رشد بیشتر حالت پایه و کاهش ناپایداری در بلاک‌های بزرگ‌تر عنوان کرد.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله تلاش شد تا با انجام یک سری آزمایش، تحقیقاتی بر روی ناپایداری انگشتی لزج در جابجایی مخلوط شدنی نیوتنی انجام شود. به‌منظور کاربردی‌تر شدن نتایج، به‌جای استفاده از سلول هل- شاو، محیط متخلخل شفافی ساخته شد که تخلخل و نفوذپذیری آن به ماسه‌سنگ نفت نزدیک‌تر باشد. در این آزمایش‌ها به بررسی تأثیر تغییر نسبت لزجت R و تأثیر تغییر

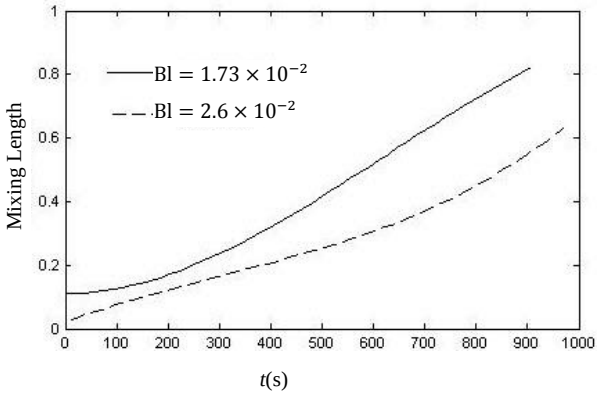
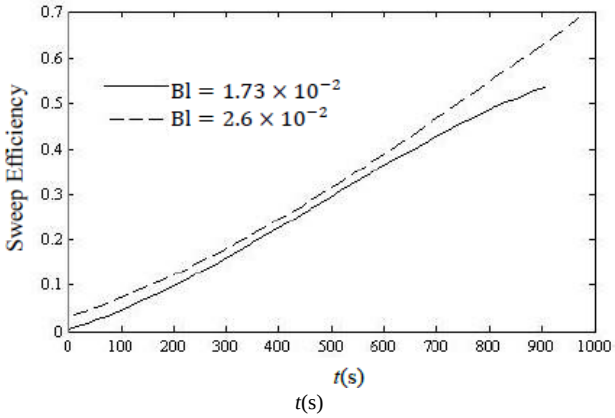


Fig. 18 Mixing Length for different Blake number, (R=2.31)

شکل 18 طول اختلاط برای اعداد بلاک مختلف، (R=2.31)



t(s)

Fig. 19 Sweep Efficiency for different Blake number, (R=2.31)

شکل 19 بازده جاروبی برای اعداد بلاک مختلف، (R=2.31)

دبی بر شکل انگشتی‌ها و تأثیر آن‌ها بر پارامترهای فیزیکی مهمی ازجمله طول اختلاط، بازده جاروبی و رشد اغتشاش به حالت پایه پرداخته شد. مشاهده شد که با افزایش R، طول اختلاط و سرعت پیشروی سیال جابجا کننده افزایش و بازده جاروبی کاهش می‌یابد. علاوه بر این مشاهده شد که با افزایش R تعداد شاخه‌ها افزایش یافته، انگشتی‌های ریز بیشتری تشکیل می‌شوند و تمایل انگشتی‌ها به پخش شدن نیز افزایش می‌یابد. از جمله نتایج دیگر به‌دست‌آمده این بود که با افزایش R سیال جابجا کننده در تمام ضخامت محیط متخلخل حرکت نمی‌کند و همچنان مقداری از سیال بستر در ضخامت جاروب شده باقی می‌ماند. به‌عبارت دیگر با افزایش R کیفیت جاروب کردن محیط متخلخل کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که در یک R ثابت در دبی پایین پدیده کانالیزه شدن اتفاق می‌افتد و با افزایش دبی سیال تزریق شونده تمایل به واگرایی از خود نشان می‌دهد. همچنین مشاهده شد که افزایش دبی تأثیر محسوسی بر طول اختلاط ندارد و تأثیر اصلی آن بر بازده جاروبی است که موجب افزایش آن می‌شود، علت آن‌هم افزایش تعداد انگشتی‌های پهن و پخش شدن نوک این انگشتی‌ها با افزایش دبی است. با افزایش عدد بلاک در شرایط یکسان مشاهده شد که ناپایداری و طول اختلاط کاهش و بازده جاروبی افزایش می‌یابد. همچنین در بررسی نحوه شکل‌گیری و رشد انگشتی‌ها با افزایش عدد بلاک مشاهده شد که تمایل سیال تزریق شونده به کانالیزه شدن کاهش و انگشتی‌های ریز در مرز ناپایداری یکنواخت‌تر رشد می‌کنند.

7- فهرست علائم

A	سطح مقطع محیط متخلخل (cm^2)
b	فاصله بین دو صفحه سلول هل شاو (m)
Bl	عدد بی‌بعد بلاک

D_h	قطر هیدرولیکی (m)
D_p	قطر ذرات محیط متخلخل (m)
k	نفوذپذیری (Darcy)
L	طول محیط (cm)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Q	دبی (ml/s)
R	لگاریتم نسبت لزجت ها
t	زمان (s)
u	سرعت سیال ورودی (m/s)

علائم یونانی

φ	تخلخل
ρ	چگالی (kgm^{-3})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)

8- مراجع

[1] B. S. Broyles, R. A. Shalliker, D. E. Cherrak, G. Guiochon, Visualization of viscous fingering in chromatographic columns, *Journal of Chromatography A*, Vol. 822, No. 2, pp. 173-187, 1998.

[2] E. A. Chukwudeme, A. A. Hamouda, Enhanced oil recovery (EOR) by miscible CO2 and water flooding of asphaltenic and non-asphaltenic oils, *Energies*, Vol. 2, No. 3, pp. 714-737, 2009.

[3] R. L. Perrine, The development of stability theory for miscible liquid-liquid displacement, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 17-25, 1961.

[4] J. P. Heller, Onset of instability patterns between miscible fluids in porous media, *Journal of Applied Physics*, Vol. 37, No. 4, pp. 1566-1579, 1966.

[5] C. Tan, G. Homsy, Stability of miscible displacements in porous media: Rectilinear flow, *The Physics of Fluids*, Vol. 29, No. 11, pp. 3549-3556, 1986.

[6] C. Tan, G. Homsy, Stability of miscible displacements in porous media: Radial source flow, *The Physics of Fluids*, Vol. 30, No. 5, pp. 1239-1245, 1987.

[7] D. W. Peaceman, H. H. Rachford JR., Numerical calculation of multidimensional miscible displacement, *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 327-339, 1962.

[8] W. Zimmerman, G. Homsy, Viscous fingering in miscible displacements: Unification of effects of viscosity contrast, anisotropic dispersion, and velocity dependence of dispersion on nonlinear finger propagation, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 4, No. 11, pp. 2348-2359, 1992.

[9] W. B. Zimmerman, G. M. Homsy, Three-dimensional viscous fingering: A numerical study, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics* (*1989-1993*), Vol. 4, No. 9, pp. 1901-1914, 1992.

[10] K. Ghesmat, J. Azaiez, Viscous fingering instability in porous media: effect of anisotropic velocity-dependent dispersion tensor, *Transport in Porous Media*, Vol. 73, No. 3, pp. 297-318, 2008.

[11] M. Norouzi, M. Shoghi, A numerical study on miscible viscous fingering instability in anisotropic porous media, *Physics of Fluids*, Vol. 26, No. 8, pp. 084-102, 2014.

[12] H. Salehabadi, A. Ghaderi, M. Nazari, M. H. Keyhani, Modeling of fluid permeation whit high density ratio in a porous layer bed by using state equations whit lattice Boltzmann's method, *AmirKabir Jounrnal of Science & Research Mechanical Engineering*, Vol. 48, No. 1, pp. 65-76, 2016. (in Persian فارسی)

[13] S. Jackson, H. Power, D. Giddings, D. Stevens, The stability of immiscible viscous fingering in Hele-Shaw cells with spatially varying permeability, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 320, No. 1, pp. 606-632, 2017.

[14] S. Hill, F. I. P, Channeling in packed columns, *Chemical Engineering Science*, Vol. 1, No. 6, pp. 247-253, 1952.

[15] P. G. Saffman, G. Taylor, The penetration of a fluid into a porous medium or hele-shaw cell containing a more viscous liquid, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 245, 242, pp. 312-329, 1958.

[16] B. Habermann, The efficiency of miscible displacement as a function of mobility ratio, *Journal of Petroleum Transactions*, Vol. 219, No. 1, pp. 264-272, 1960.

[17] G. Daccord, J. Nittmann, H. E. Stanley, Radial viscous fingers and diffusion-limited aggregation: Fractal dimension and growth sites, *Physical Review Letters*, Vol. 56, No. 4, pp. 336, 1986.

[18] M. Z. Saghir, O. Chaalal, M. R. Islam, Numerical and experimental modeling of viscous fingering during liquid–liquid *miscible displacement*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 253-262, 2000.

[19] S. Malhotra, M. M. Sharma, Impact of fluid elasticity on miscible viscous fingering, *Chemical Engineering Science*, Vol. 117, No. 1, pp. 125-135, 2014.

[20] B. K. Hartline, C. Lister, An experiment to verify the permeability of Hele-Shaw cells, *Geophysical Research Letters*, Vol. 5, No. 4, pp. 225-227, 1978.

[21] M. Kaviany, *Principles of Heat Transfer in Porous Media*, pp. 20-28, New York: Springer Science & Business Media, 2012.

[22] A. Rushton, R. Holdich, *Solid-Liquid Filtration and Separation Technology*, pp. 212, New York: John Wiley & Sons, 2008

[23] C. T. Hsu, *Handbook of Porous Media*, pp.56, New York: Taylor & Francis Group, 2005.