

علمی - پژوهشی

# بررسی آزمایشگاهی اثر سرعت جریان روی ناپایداری انگشتی شدن جریان لزج امتزاجی برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی در محیط متخلخل

حمید صفاری<sup>۳</sup>

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید مصطفی حسینعلی پور<sup>۲</sup>

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۸)

بهروز زارع وامرزانی<sup>۱</sup>

دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

## چکیده

در این مطالعه ناپایداری انگشتی لزج در فصل مشترک دو سیال در محیط متخلخل به صورت آزمایشگاهی برای سیالات نیوتنی و غیر نیوتنی مورد بررسی قرار گرفته است. محیط متخلخل آزمایش حاضر با استفاده از فناوری لیزر CO<sub>2</sub> ساخته شده است. محلول آب/گلیسرین به عنوان پایه نیوتنی و افزودنی پلیمر گزانتان گام به عنوان عامل غیر نیوتنی مورد استفاده بوده است. همچنین، متانول به عنوان سیال تزریقی در نظر گرفته شده است. مشاهدات آزمایشگاهی و عکس‌های ضبط شده با بهره‌گیری از کد نگارش شده در نرم‌افزار متلب پردازش و اطلاعات آماری مفیدی استخراج گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که بازده جاروب شدن محیط متخلخل برای سیالات غیر نیوتنی در مقابل سیال نیوتنی افزایش یافته و این روند صعودی آن با افزایش درصد وزنی پلیمر نیز ادامه می‌یابد. همچنین زمان گشایش که یکی از مهم‌ترین پارامترهای بررسی پدیده انگشتی لزج می‌باشد با استفاده از سیالات غیر نیوتنی افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از مشاهدات بیانگر این مسئله است که استفاده از سیالات غیر نیوتنی در کاهش شدت ناپایداری رخداد انگشتی لزج کارایی مناسبی داشته است. کاهش شدت ناپایداری از مطالعه پارامترهای مهم طول مرز مشترک در راستای سلول محاسباتی و رصد حرکت انگشتی قالب بررسی شده است.

**کلیدواژه‌ها:** انگشتی شدن لزج، مشاهدات آزمایشگاهی، محیط متخلخل، سیال غیر نیوتنی، بازده، زمان گشایش

## Experimental Investigation of Miscible Viscous Fingering Phenomenon for Newtonian/Non-Newtonian Fluids at the Porous Media

B. Zare Vamerzani

University of Science and  
Technology Iran, Tehran, Iran

M. Hoseinalipour

Iran University of Science and  
Technology Iran, Tehran, Iran

H. saffari

Iran University of Science and  
Technology Iran, Tehran, Iran

(Received: 2023/February/20; Accepted: 2023/July/30)

## ABSTRACT

In this paper the experimental of the viscous fingering phenomena at the interfacial of the two fluids at the porous media for Newtonian and Non-Newtonian fluids investigated. The viscous fingering challenged at the industrial/academic at the recently years. In this experimental study the porous media made with the Co<sub>2</sub> laser technology. The water/glycerol as the Newtonian and Xanthan gum polymer used as the polymeric additive. Also, the methanol with the color used as the injection fluid to porous media cell. The experimental observation recorded and processed with the MATLAB code. The results shown that the efficiency for non-Newtonian fluid increased than the Newtonian. Also, the breakthrough time properties increased for polymeric fluid. The max position and perimeter in the porous media detected and the results shown that instability intensity of viscous fingering reduced when the Non-Newtonian used as the bulk fluid.

**Keywords:** Viscous Fingering, Experimental Observation, Porous media, Non-Newtonian Fluid, Efficiency, Breakthrough time.

۱- دانشجوی دکتری تخصصی: behrooz.zarev@gmail.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): alipour@iust.ac.ir

۳- دانشیار: saffari@iust.ac.ir

## ۱- مقدمه

برهم کنش دو سیال با ویسکوزیته‌های متفاوت یکی از پرکاربردترین چالش‌های حوزه صنعت در سال‌های اخیر شناخته شده است. تزریق دو سیال با ویسکوزیته متفاوت در محیط متخلخل منجر به ناپایداری به شکل و الگوی انگشتی مانند می‌گردند. از این‌رو، این پدیده به انگشتی شدن<sup>۱</sup> جریان معروف است [۱]. پدیده انگشتی لزج یکی از شناخته شده‌ترین ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در محیط متخلخل است [۲-۴]. از مهم‌ترین کاربردهای بررسی این پدیده می‌توان به برداشت ثانویه از میادین نفتی<sup>۲</sup>، بررسی آلودگی منابع زیرزمینی آب، ستون‌های جداسازی مایعات و کروماتوگرافی اشاره کرد [۵].

نخستین بار هیل<sup>۳</sup> [۶] در سال ۱۹۵۲ این پدیده را مطرح و مطالعه نمود. او بر پایه نیروی حاصل از اختلاف فشار و نیز اغتشاش در سطح مشترک محلول شکر و آب به بررسی این ناپایداری پرداخته است. یکی از معروف‌ترین دسته‌بندی پدیده انگشتی شدن جریان لزج، مربوط به امتزاجی بودن<sup>۴</sup> و غیرامتزاجی بودن<sup>۵</sup> دو سیال است. در حالت امتزاجی جریان دو سیال، اختلاف غلظت و در حالت غیرامتزاجی، اختلاف فشار موینگی در فصل مشترک دو سیال عوامل مهم این ناپایداری شناخته شده‌اند [۷-۱۰]. پرین<sup>۶</sup> [۱۱] به بررسی جریان امتزاجی با استفاده از تحلیل اغتشاشات پرداخته است. گزارشات پژوهش ایشان حاکی از این مسأله است که، تولید انگشتی‌ها از ناپایداری کوچک که در ابتدا به صورت اغتشاشات هستند شروع می‌شوند. برخی از این اغتشاشات میرا شده و از بین می‌روند و شماری از آنها رشد کرده و تشکیل انگشتی‌های بزرگتر را می‌دهند. تن و هومسی<sup>۷</sup> [۱۲] در سال ۱۹۸۶ به بررسی پایداری جریان در جابجایی امتزاجی پرداختند. آنها از روش تقریب شبه پایا<sup>۸</sup> برای پیش‌بینی نرخ رشد انگشتی‌ها استفاده کردند. در مطالعه ایشان جریان به صورت سرعت ثابت و در محیط مستطیلی شکل در نظر گرفته شده است. در ادامه نیز روش تحلیل غیرخطی برای بررسی جابجایی‌های امتزاجی مورد استفاده

قرار گرفت [۱۳]. با گذشت زمان و بررسی پژوهشگران مشخص شد در روش‌های تحلیل غیرخطی که با استفاده از روش تفاضل محدود انجام می‌گیرد مقادیر خطا در پیش‌بینی شکل انگشتی‌ها وجود داشته است. همچنین هومسی [۵] ناپایداری انگشتی را در ادامه فعالیت‌های خود برای سازوکارهای غالب، جداسازی نوک انگشتی و پخش‌شوندگی در یک سلول هل-شاو<sup>۹</sup> دوبعدی بررسی نمود. این کار توسط گروه‌های علمی دیگر به صورت آزمایشگاهی بررسی گردید [۱۴-۱۶]. سلول هل-شاو متشکل از دو صفحه با فاصله بسیار کم از یکدیگر می‌باشند که تقریب خوبی از حل جریان دو بعدی در محیط متخلخل را می‌تواند دنبال داشته باشد. مهم‌ترین محدودیت این سلول کارآمدی و اعتبار داده‌های حاصل از آن صرفاً برای جریان خزشی می‌باشد. از این‌رو، در تحقیق حاضر برای بررسی جریان در محدوده وسیع‌تری از سرعت سیال، محیط متخلخل ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است. بهنام و همکاران [۱۷] به بررسی تجربی ناپایداری انگشتی لزج در سلول هل-شاو پرداختند. اخیراً، بررسی عددی پدیده انگشتی لزج در یک جریان امتزاجی در محیط متخلخل برای دو سیال نیوتنی انجام شده است [۱۸]. در این پژوهش اثر سرعت جریان ورودی به محیط متخلخل روی پارامترهای مهم و اثرگذار پدیده انگشتی لزج مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین اثر نیروی گرانش با تغییر زاویه محیط متخلخل و تاثیر آن روی برخی از پارامترها دنبال شده است. مطالعه عددی دیگری برای جریان داری<sup>۱۰</sup> و غیرداری و تفاوت این معادلات ساختاری در شبیه‌سازی شکل‌گیری انگشتی‌ها و رشد و گسترش آنها انجام یافته است [۱۹]. آنها علاوه بر بررسی اثرات تغییرات نرخ تزریق، تغییرات لزجت دو سیال را برای دو معادله ساختاری بیان شده مطالعه نمودند. نتایج حاکی از این مسأله بوده است که افزایش نسبت ویسکوزیته باعث پیچیده‌تر شدن انگشتی‌های تولیدی و افزایش ناپایداری در جبهه جلوبرنده خواهد شد. همچنین بررسی تغییرات نسبت ویسکوزیته و عدد پکلت<sup>۱۱</sup> در حالت نیوتنی بودن دو سیال انجام شده است. در این مطالعه زمان گشایش و بازده جاروب برای بازه‌ای از تغییرات نسبت ویسکوزیته بررسی شده است [۲۰]. تحلیل پایداری خطی پدیده انگشتی شدن امتزاجی در سیال غیرنیوتنی در

<sup>1</sup>Viscous fingering instability<sup>2</sup>Secondary oil recovery<sup>3</sup>Hill<sup>4</sup>Miscible<sup>5</sup>Immiscible<sup>6</sup>Perrine<sup>7</sup>Tan & Homsy<sup>8</sup>Quasi-steady-state approximation<sup>9</sup>Hele-Shaw<sup>10</sup>Darcy<sup>11</sup>Peclet

بوده است. در این مطالعه یک محیط متخلخل که تخلخل و نفوذپذیری مشخص نیز دارد ساخته و مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین استفاده از سیالات غیرنیوتنی به واسطه ارزان و دردسترس بودن و فرایند ساده ساخت سیالات غیرنیوتنی همواره می‌تواند برای کنترل و کاهش شدت ناپایداری انگشتی لزج مورد توجه باشد که در این مقاله به آن پرداخته شده است. در بسیاری از کاربردهای صنعتی پدیده ناپایداری انگشتی لزج در محیطی صورت می‌گیرد که سیال جابه‌جاشونده غیرنیوتنی می‌باشد. مطالعه حاضر برای بررسی این شرایط انجام شده است. بازده جاروب شدن، موقعیت مکانی بلندترین انگشتی و تأثیر انگشتی غالب روی حرکت دیگر انگشتی و زمان گشایش انگشتی‌ها برای هر یک از سیالات تزریقی و بستر مطالعه و مورد بحث قرار گرفته است.

## ۲- روش آزمایش

در این مقاله به بررسی پدیده انگشتی شدن جریان در حضور تزریق سیال نیوتنی و غیرنیوتنی پرداخته می‌شود. بررسی تأثیر غیرنیوتنی بودن سیال محیط از اهداف اصلی این مقاله می‌باشد. روش آزمایش به این صورت است که سیال محیط ابتدای به امر تمام سلول محیط متخلخل را پرکرده به گونه‌ای که هیچ حباب هوایی در محیط متخلخل وجود نداشته باشد و کاملاً اشباع شده باشد. پس از آن سیال تزریق شونده و جلوبرنده که حاوی رنگ خوراکی بوده به سلول تزریق شده و شروع به پیشروی در آن می‌کند.

### ۲-۱- سیالات

همانگونه که پیش‌تر بیان گردید دو سیال محیط (جابجا شونده) و تزریقی (جابجا کننده) در این آزمایش مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیال جابجاکننده همواره متانول حاوی رنگ خوراکی است. درصد رنگ اضافه شده به گونه‌ای است که تأثیری روی پارامترهای سیالاتی متانول نداشته باشد که این مسأله مورد بررسی قرار گرفته است. این در صد همواره در تمام آزمایشات یکسان و مقدار 0.3% وزنی متانول بوده است. سیال جابجا شونده در این آزمایش محلول آب/گلیسرین با درصد حجمی 66٪/ گلیسرین به عنوان پایه نیوتنی و پلیمر گزانتان گام<sup>۶</sup> به عنوان افزودنی غیرنیوتنی می‌باشد. محلول گلیسرین/آب به

سلول هل-شاو انجام پذیرفته است [۲۱]. مدل ساختاری مورد استفاده در این مطالعه کاریو-یاسودا<sup>۱</sup> بوده است. نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد رفتار سیال غیرنیوتنی نازک شونده<sup>۲</sup> تأثیر زیادی بر پدیده انگشتی شدن دارد. در واقع شکل انگشتی‌های پدید آمده نسبت به حالت نیوتنی متفاوت بوده و در حالت استفاده از جریان سیال غیرنیوتنی پایداری دو سیال در فصل مشترک آنها بیشتر بوده است [۲۲]. نتایج عددی حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که بازده جاروب به صورت چشم‌گیر افزایش یافته و سلول محیط متخلخل مورد بررسی بیشتر جاروب می‌گردد. مطالعه عددی و آزمایشگاهی روی تأثیر سیالات غیرنیوتنی در سلول هل-شاو نیز به صورت گسترده ادامه داشته است [۲۳-۲۷]. در ادامه مطالعات برای سیالات غیرنیوتنی ناپایداری انگشتی لزج در حالتی که دو سیال غیرنیوتنی باشد و از معادله ساختاری قانون توانی<sup>۳</sup> استفاده شده است در سلول هل-شاو مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از روش آنالیز پایداری خطی بهره گرفته شده است [۲۸]. اخیراً بررسی عددی جریان سیال پلاستیک بینگهام<sup>۴</sup> در محیط شامل سیال غیرنیوتنی کاریو-یاسودا<sup>۵</sup> انجام شده است. در این پژوهش تغییرات نسبت ویسکوزیته دو سیال روی کنترل پدیده انگشتی شدن جریان بررسی شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که مقادیر نسبت ویسکوزیته دو سیال مورد مطالعه به تنهایی در کنترل ناپایداری انگشتی کافی نبوده و مقادیر رئولوژی سیالات مورد استفاده مهم و حائز اهمیت می‌باشد [۲۹].

در این مقاله به بررسی پدیده ناپایداری انگشتی لزج با تغییر سرعت جریان ورودی در حضور سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی به صورت آزمایشگاهی پرداخته شده است. هدف از انجام این پژوهش مطالعه تأثیر غیرنیوتنی بودن سیال و بازخورد آن روی پارامترهای مهم شناخته شده در رخ داد انگشتی لزج می‌باشد. بیشتر مطالعات در خصوص انگشتی لزج در محیط آزمایشگاهی همان‌طور که در مرور منابع بیان شد به استفاده از سلول هل - شاو منتهی می‌گردیده است. دلیل این موضوع به پیچیدگی ساخت یک محیط متخلخل واقعی برمی‌گردد و متعاقباً استفاده از این سلول بجای محیط متخلخل با محدودیت‌هایی از نظر شبیه‌سازی صحیح همراه

<sup>1</sup>Carriue-Yasuda

<sup>2</sup>Shear thinning

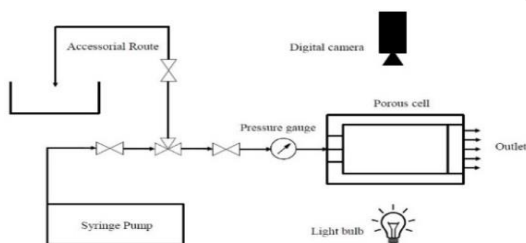
<sup>3</sup>Power-law

<sup>4</sup>Bingham Plastic

<sup>5</sup>Carriu-Yasuda

<sup>6</sup>Xantham gum

محیط متخلخل، دوربین عکسبرداری، پردازش نور، تانک ذخیره و پمپ گریز از مرکز می‌باشد. پمپ سرنگی مورد استفاده در این پژوهش ساخت شرکت زیست راه دانش بوده و دارای ۴ خروجی برای اتصال به سرنگ‌ها می‌باشد. دقت تزریق این پمپ 0.07 ml/min می‌باشد. این پمپ قابلیت اتصال به کامپیوتر داشته و برنامه‌پذیر بوده است. پمپ‌های سرنگی در فعالیتهایی که دقت بالا در تزریق را نیاز دارند استفاده می‌شوند. عموماً کارایی اصلی آنها در صنعت پزشکی، داروسازی و صنایع آزمایشگاهی است. در آزمایش حاضر پمپ سرنگی جهت تزریق سیال جابجا شونده به محیط متخلخل مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، از یک پمپ گریز از مرکز کوچک با توان ۷۰ وات و دبی 0.1 L/s برای شست‌وشوی محیط متخلخل و تمامی لوله‌ها و اتصالات در پایان انجام هر آزمایش و یا تغییر هر یک از سیالات مورد استفاده قرار گرفته است. نقش این پمپ صرفاً به عنوان شست و شو دهنده مجموعه آزمایشگاهی بوده است. سلول محیط متخلخل دارای اندازه مؤثر ۳۳×۲۰ سانتی‌متر بترتیب عرض و طول می‌باشد. سلول متخلخل شامل دو صفحه از جنس پلکسی شفاف با ضخامت ۱ سانتی‌متر می‌باشد. برای ساخت محیط متخلخل با استفاده از دستگاه لیزر کربن دی‌اکسید مدل تولید شده در نرم افزار<sup>۱</sup> مطابق شکل شماتیک (۲) ساخته و آماده سازی گردیده است.



الف



ب

شکل ۱. الف) شماتیک و ب) عکس مربوط به مجموعه

آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش

همراه افزودنی پلیمری گزانتان گام یک محلول شناخته شده است که تمامی خواص سیالاتی و شیمیایی آن در دسترس و مشخص می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل کاربرد بالای آن در صنعت و خواص غیر سمی و آتش‌زا نبودن آن در اینجا به عنوان پایه غیرنیوتنی مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول شماره (۱) خواص سیالات مورد استفاده در این مقاله بیان شده است. مقادیر ویسکوزیته بیان شده در جدول شماره (۱) با دستگاه MCR300 به روش دورانی اندازه‌گیری شده است. گزانتان گام یک پلی ساکارید با جرم مولکولی تقریبی  $2 \times 10^6$  g/mol در دسته پلیمرها با جرم مولکولی بالا دسته بندی می‌شود. برای ساخت محلول پلیمری غیرنیوتنی محیط جابجا شونده نکات مهمی می‌بایست مدنظر قرار گیرد. ابتدای امر پس از توزین هر یک از فازها با درصدهای حجمی و جرمی مشخص می‌بایست پلیمر گزانتان با آب مقطر با سرعت کم هم خورده و همگن گردد. پس از آن گلیسرین به محلول بدست آمده اضافه شده و می‌بایست حداقل ۲۴ ساعت با سرعت کم هم بخورد [۳۰]. در این مقاله از هم زن مغناطیسی برای ساخت محلول غیرنیوتنی استفاده شده است. باید در نظر گرفت محلول غیرنیوتنی ایجاد شده به روش بیان شده در صورت تغییر درصد وزنی پلیمر گزانتان گام تغییرات زیادی در ویژگی‌های سیالاتی را بدنبال دارد. عبارات دیگر تغییرات اندک درصد جرمی پلیمر تغییرات زیاد سیالاتی محلول را بدنبال دارد. همان‌طور که بیان شد سیال تزریقی به محیط متخلخل، به عنوان سیال جلوبرنده متانول می‌باشد که برای مشخص کردن مسیر آن در محیط متخلخل مورد بررسی، رنگ خوراکی به آن اضافه شده است.

جدول ۱. مشخصات و ویژگی‌های سیالات مورد استفاده در مقاله حاضر

ویسکوزیته ( $mPa.s$ )	چگالی ( $g.cm^{-3}$ ) رمول شیمیایی	چگالی	سیال
2.65	$C_2H_8O_3$	1.131	آب/گلیسرین
20 ( $\eta_0$ )	$C_3H_{49}O_{29}$	0.98	آب/گلیسرین + ۰.۱٪ گزانتان گام
135 ( $\eta_0$ )	$C_3H_{49}O_{29}$	0.98	آب/گلیسرین + ۰.۳٪ گزانتان گام
0.594	$C_3H_8O$	0.792	متانول حاوی رنگ

## ۲-۲- مجموعه آزمایشگاهی

شماتیک و عکس مجموعه آزمایشگاهی در این پژوهش در شکل (۱) قابل مشاهده است. مجموعه آزمایشگاهی شامل یک عدد پمپ سرنگی، لوله و شیرآلات اتصالی، سلول

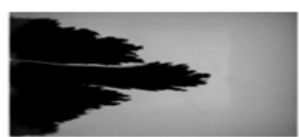
<sup>1</sup> corel software

### ۲-۳- پردازش تصاویر

عکس‌ها و تصاویر ذخیره شده به وسیله یک کد برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب<sup>۲</sup> پردازش گردیده است. برای این کار عکس‌های به‌دست‌آمده به محیط باینری<sup>۳</sup> انتقال داده می‌شود و برای مشخص کردن مرزها و به‌دست‌آوردن اطلاعات مفید خطاها فیلتر شده و با استفاده از کد نگارش شده تبدیل به اطلاعات عددی و قابل‌ارائه می‌گردد. یک نمونه از تبدیل تصاویر را می‌توان در شکل (۳) مشاهده نمود. در واقع تبدیل یک عکس به محیط باینری شرایط تبدیل عکس به ماتریس دارای مفهوم عددی و قابل‌بررسی را ایجاد می‌نماید. کد نوشته شده قابلیت استخراج مرز دو سیال جابه‌جاکننده و شونده را بادقت بالا دارا است که برای این منظور نمونه‌ای از آن در شکل (۴) ارائه شده است. دقت بالای کد نگارش شده امکان نمایش مرز با جزئیات را فراهم می‌سازد.



الف



ب



ج

شکل ۳. الف) عکس ضبط شده ب) محیط سیاه و سفید

شده در نرم افزار ج) محیط باینری شدن عکس



الف



ب

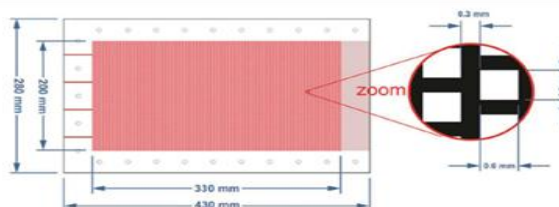
شکل ۴. الف) عکس ضبط شده ب) پردازش تصویر همان

عکس با استفاده از کد نرم افزار متلب

عمق محیط متخلخل ایجاد شده در سراسر سلول ۳ میلی‌متر می‌باشد. عدد تخلخل سلول ایجاد شده با ویژگی‌های فیزیکی نشان داده شده در شکل (۲) مقدار ۰.۵۲ می‌باشد. مقدار عدد تخلخل با استفاده از معادله (۱) قابل محاسبه می‌باشد [۳۲].

$$\phi = \frac{v_v}{v_t} \quad (1)$$

در معادله فوق  $v_v$  نشان دهنده حجم خالی مؤثر محیط متخلخل که نقش عبور دهنده سیال تزریقی را دارد و  $v_t$  بیانگر حجم کل محیط متخلخل می‌باشد. با استفاده از اطلاعات شکل (۲) بدست آوردن عدد تخلخل برای سلول مورد استفاده امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین، برای ورود سیال تزریق شده بوسیله پمپ سه راهگانه ورودی در ابتدای سلول طراحی و تعبیه شده است.



شکل ۲. طراحی محیط متخلخل مورد استفاده در پژوهش

حاضر

در انتهای سلول، سیال امکان تخلیه در محیط و شرایط فشار اتمسفریک را داراست و به‌صورت یک نوار ۲۰ سانتی متری که کل عرض سلول را شامل می‌شود، می‌باشد. تمامی پارامترهای مربوط به محیط متخلخل در جدول (۲) ارائه شده است. نفوذپذیری محیط متخلخل معرفی شده که عدد آن نشان دهنده مقاومت محیط متخلخل در مقابل عبور سیال است با بهره‌گیری از روش معادله هیزن-دارسی<sup>۱</sup> محاسبه شده است [۳۳]. برای ثبت تصاویر از یک دوربین عکاسی نیکون مدل D-300 که قابلیت اتصال و فرمان گرفتن از کامپیوتر و ضبط تصاویر با کیفیت بالا را داراست استفاده شده است. لوله‌های ارتباطی از نوع سیلیکونی و شفاف و شیرآلات برای قطع/وصل جریان و تعویض مسیر جریان تزریقی/شست‌وشو دهنده مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سلول محیط متخلخل آزمایش

۱	طول × عرض	۳۳ × ۲۰ سانتی متر
۲	تخلخل	۰/۵۲
۳	نفوذپذیری ماتریس	۲/۱ × ۱۰ <sup>-۱۱</sup>
۴	عمق محیط متخلخل	۳ میلی متر

<sup>۲</sup>Matlab  
<sup>۳</sup>Binary

<sup>۱</sup>Heyzen-Darcy

## ۳- نتایج

پلیمر گزانتان گام به عنوان افزودنی با درصد وزنی به سیال پایه محلول گلیسیرین/آب با درصد حجمی مشخص و ثابت استفاده شده است. سیال غیرنیوتنی به دست آمده از نوع رقیق شونده یا برشی بوده است. به عبارت دیگر با افزایش نرخ برش وارده بر سیال غیرنیوتنی مقدار ویسکوزیته آن به صورت لگاریتمی کاهش پیدا می کند.

تمامی آزمایش های در شرایط دما و فشار استاندارد صورت گرفته است. در ادامه به مطالعه برخی از پارامترهای مهم در بررسی پدیده انگشتی شدن جریان پرداخته می شود.

تمامی آزمایش های در سرعت سیال تزریقی ۲۰ میلی متر در دقیقه انجام شده است. سرعت بیان شده در واقع سرعت تزریق پمپ سرنگی بوده که دقت بالایی را داراست. سلول محاسباتی در حالت کاملاً افقی قرار دارد از اینرو، از اثر نیروی گرانش صرف نظر شده است. نسبت حجمی گلیسیرین به آب به ترتیب ۲ به ۱ بوده است و این درصد حجمی در تمامی آزمایشات برای فاز سیال پرکننده محیط متخلخل یکسان و ثابت در نظر گرفته شده است.

همچنین درصد جرمی پلیمر گزانتان گام مقادیر ۰,۱٪ و ۰,۳٪ در نظر گرفته شده است. در تمام آزمایشات انجام شده سیال تزریقی متانول همراه با رنگ خوراکی بوده است.

با بررسی نتایج که در ادامه به آن خواهیم پرداخت زمان های ثانیه ۵ و ۱۲ به عنوان زمان هایی بودند که تغییرات در آنها بیشتر و معمولاً به عنوان زمان های مهم شناخته می شوند. بنابراین تمامی نتایج با حساسیت بیشتری در این دو زمان بررسی و گزارش شده اند.

در شکل (۵) جریان سیال در محیط متخلخل پر شده از سیال نیوتنی و غیرنیوتنی برای دو زمان ۵ و ۱۲ ثانیه پس از تزریق ارائه شده است. مقایسه زمان اول (ثانیه ۵) نشان می دهد که پیشروی جریان سیال تزریقی متانول در محلول نیوتنی آب/گلیسیرین سریعتر انجام می گیرد. در واقع شدت ناپایداری جریان سیال در فصل مشترک دو سیال در حالت نیوتنی برای زمان های اولیه بیشتر است. به عبارت دیگر، وجود سیال غیرنیوتنی در سلول محیط متخلخل در زمان های ابتدایی دارای مقاومتی در برابر حرکت سیال تزریقی بوجود می آورد. این مقاومت به واسطه داشتن حداکثر ویسکوزیته در نرخ های برش کمتر و نزدیک به صفر می باشد. عبارت دیگر در سیالات غیرنیوتنی از نوع رقیق شونده بیشترین مقدار ویسکوزیته در نرخ برش نزدیک صفر رخ می دهد. در ابتدای تزریق که سیال محیط در حالت سکون قرار دارد بیشترین ویسکوزیته سیال در حالت غیرنیوتنی وجود دارد. افزایش مقادیر ویسکوزیته با افزایش درصد جزء پلیمری نسبت مستقیم دارد. با پیشروی سیال و افزایش نرخ برش در طول سلول محاسباتی ویسکوزیته سیال غیرنیوتنی به صورت لگاریتمی کاهش یافته و سرعت پیشروی انگشتی های تولیدی در این نوع سیالات افزایش می یابد.

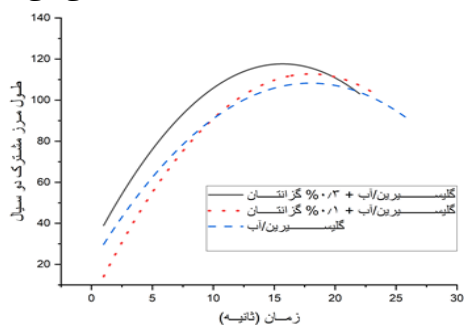
یکی از پارامترهای مهم در بررسی پدیده انگشتی شدن جریان طول مرز مشترک در جبهه جلو برنده است. این پارامتر در واقع مقدار طول عرضی در فصل مشترک دو سیال برای زمان های مختلف و موقعیت های مختلف طولی سلول را نمایش می دهد. همچنین این پارامتر نشان دهنده شدت ناپایداری در فصل مشترک دو سیال بوده و هر چه این عدد مقادیر بالاتری داشته باشد نشان از تعدد انگشتی های تولیدی بالاتری دارد.

زمان (ثانیه)	الف	ب	ج
۵			
۱۲			

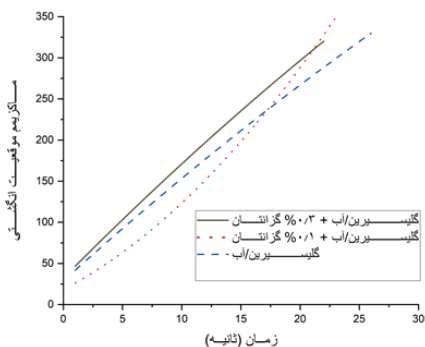
شکل (۵). مقایسه جریان سیال تزریقی متانول درحالتی که سیال پرکننده محیط متخلخل شامل الف) سیال نیوتنی گلیسیرین/آب ب) سیال غیرنیوتنی گلیسیرین/آب+۰,۱٪ گزانتان گام ج) سیال غیرنیوتنی گلیسیرین/آب+۰,۳٪ گزانتان گام

در حال انجام است. این فرایند در طول محیط متخلخل وابسته به سرعت جریان، طول محیط متخلخل و ویژگی‌های محیط متخلخل چندین مرتبه تشکیل می‌شود. موقعیت بلندترین نوک انگشتی در واقع نشان‌دهنده مقدار پیشروی بلندترین انگشتی غالب در طول محیط متخلخل است. اهمیت این پارامتر به واسطه مشخص کردن حرکت انگشتی‌های غالب است. در شکل (۷) موقعیت مکانی - زمانی بلندترین انگشتی برای جریان سیالات مختلف در سرعت ۲۰ میلی‌لیتر در دقیقه ارائه شده است. برای درک حرکت انگشتی غالب شکل (۸) جریان سیال را در زمان ثانیه ششم برای سیالات مختلف ارائه شده است.

مطابق شکل (۸) بیشترین پیشروی انگشتی غالب مربوط به جریان متانول در بستر سیال نیوتنی آب/گلیسیرین است. مشاهده می‌شود که سیالات غیرنیوتنی روند پیشروی انگشتی غالب را در طول محیط متخلخل نسبت به حالت نیوتنی کندتر می‌کند [۲۲]. این مسأله به پایدارتر بودن پدیده انگشتی جریان لزج کمک می‌کند. بعبارت دیگر، جریان سیال متانول در محیط سیال غیرنیوتنی دارای پایداری بیشتری نسبت به جریان در سیال نیوتنی می‌باشد.



شکل ۶. تغییرات پارامتر طول مرز مشترک با گذشت زمان در طول سلول برای سیالات مختلف پر شده محیط متخلخل



شکل ۷. موقعیت مکانی نوک بلندترین انگشتی در طول سلول محیط متخلخل برای سیالات مختلف

در شکل (۶) به بررسی طول مرز مشترک دو سیال در محیط متخلخل برای سیالات مختلف نیوتنی/غیرنیوتنی پرداخته شده است. با توجه به بررسی شکل (۶) مشاهده می‌شود که برای همه زمان‌های پیشروی سیال در طول محیط متخلخل پارامتر مرز مشترک برای سیال نیوتنی بیشتر از دو سیال غیرنیوتنی می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر بیان کردیم پارامتر طول مرز مشترک یکی از نشانه‌های شدت ناپایداری می‌باشد. بنابراین، در حالتی که سیال پرکننده محیط متخلخل سیال نیوتنی باشد شدت ناپایداری در مقابل استفاده از سیالات غیرنیوتنی بیشتر است.

همچنین تا ثانیه دوازدهم تزریق متانول در سلول متخلخل مقادیر طول مرز مشترک سیال غیرنیوتنی ۰.۱٪ نسبت به ۰.۳٪ گزانتان گام کمتر و بعد تغییرات آن بر عکس می‌گردد. دلیل این مسأله، تغییرات سریعتر ویسکوزیته سیال غیرنیوتنی با ۰.۱٪ افزودنی پلیمر می‌باشد. بعبارت دیگر در ثانیه ۱۲ این تغییر در مقادیر ویسکوزیته دو سیال غیرنیوتنی رخ می‌دهد. کاهش لگاریتمی ویسکوزیته سیال غیرنیوتنی ۰.۱٪ در ثانیه ۱۲ بعد از تزریق اتفاق می‌افتد. از اینرو با تحلیل نتایج بدست آمده مشاهده گردید ثانیه ۱۲ بعد از تزریق بعنوان یک زمان مهم می‌باشد و با توجه به همین مسأله در نتایج مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین شکست انتهایی مشاهده شده در شکل (۶) هر سه سیال مربوط به رسیدن آن سیالات به انتهای سلول محاسباتی می‌باشد. در واقع با رسیدن سیالات به انتهای سلول، کانال مناسب برای انتقال سیال تزریقی بوجود می‌آید و طول مرز مشترک در این زمان شدیداً کاهش پیدا خواهد کرد. این مقادیر بعنوان یک پارامتر مهم در بررسی پدیده انگشتی شدن جریان می‌باشد که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

یکی از پارامترهای مهم در بررسی پدیده انگشتی شدن جریان لزج موقعیت نوک بلندترین انگشتی<sup>۱</sup> در طول سلول برای زمان‌های مختلف است. در طول فرایند جریان سیال در محیط متخلخل و تشکیل انگشتی‌ها همواره سیکل تشکیل انگشتی، ادغام آنها و تشکیل انگشتی غالب که به واسطه تزریق بیشتر جلوتر از انگشتی‌های دیگر حرکت می‌کنند و دوباره تقسیم نوک انگشتی به انگشتی‌های دیگر

<sup>1</sup>max position

زمانی که طول می کشد اولین انگشتی به انتهای سلول محاسباتی برسد تعریف می گردد. با رسیدن اولین انگشتی به انتهای سلول محیط متخلخل در واقع کانالی برای عبور جریان تزریقی به محیط اتمسفریک فراهم می گردد که مقاومت کمتری نسبت به جریان در سیال لزج بستر را دارد. زمانی که اولین انگشتی به انتهای سلول رسیده با عنایت به اینکه سهم زیادی از جریان میل به عبور از کانال فراهم شده دارد سرعت تشکیل و توسعه انگشتی های دیگر تحت تأثیر قرار گرفته و رشد آنها به شدت کاهش می یابد. داده های جدول (۲) نشان می دهد کمترین مدت زمان گشایش مربوط به محلول آب/گلیسیرین نیوتنی و بیشترین آن مربوط به محلول غیرنیوتنی آب/گلیسیرین + ۰,۳٪ گزانتان گام بوده است. افزایش مدت زمان گشایش می تواند منجر به افزایش بازده جاروب شدن سلول گردد که در جدول (۲) ارائه شده است.

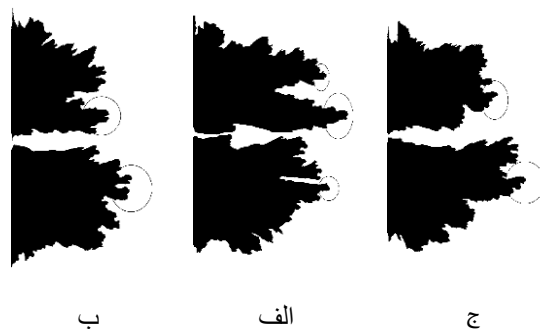
#### جدول ۲. بررسی تغییرات بازده / بازده میانگین سلول /

زمان گشایش برای سیالات مختلف بستر و تزریق متانول با سرعت ثابت ۲۰ میلی لیتر در دقیقه

نوع سیال	بازده کل (%)	میانگین بازده (%)	زمان گشایش (ثانیه)
آب / گلیسیرین	۵۰,۱	۲۶,۳۹	۲۱
آب / گلیسیرین + ۰,۱٪ گزانتان	۵۰,۷	۲۶,۸۵	۲۲
آب / گلیسیرین + ۰,۳٪ گزانتان	۵۲	۲۸	۲۴

#### ۴- نتیجه گیری

بررسی پدیده انگشتی شدن جریان در محیط متخلخل به عنوان یکی از کاربردی ترین مسائل موجود در حوزه فیلتراسیون و ازدیاد برداشت از مخازن شناخته می شود. در پژوهش حاضر به بررسی آزمایشگاهی تزریق سیال نیوتنی در محیط اشباع شده از سیال نیوتنی / غیرنیوتنی در محیط متخلخل پرداخته شده است. سیال بستر محلول آب و گلیسیرین برای حالت نیوتنی و همان محلول به همراه درصد مشخص از پلیمر گزانتان گام بوده است. در تمام



شکل ۸. پیشروی انگشتی غالب تولید شده در محیط متخلخل در ثانیه ششم تزریق برای سیال بستر الف) گلیسیرین / آب ب) گلیسیرین / آب + ۰,۱٪ گزانتان گام ج) گلیسیرین / آب + ۰,۳٪ گزانتان گام

ناپایداری انگشتی شدن جریان یکی از رخ داده های مهم در بازیافت از مخازن نفتی است. هدف از بازیافت های ثانویه و ثالثیه برداشت حداکثری از مخازن می باشد. از این رو، بازده جاروب شدن مخزن یکی از عوامل مهم در انتخاب و تعیین روش / سیال مناسب می باشد. بازده جاروب شدن محیط متخلخل مقدار حجمی از سیال اولیه محیط می باشد که با رسیدن سیال تزریقی به انتها از سلول خالی شده به کل حجم سیال محیط تعریف می گردد. برای به دست آوردن بازده جاروب شدن سلول می بایست حجم سیالات محیط و تزریق شده را بادقت بالا محاسبه نمود. در جدول (۲) مقادیر بازده کلی و میانگین سلول و زمان گشایش برای سیالات محیط نیوتنی و غیرنیوتنی در سرعت تزریق ۲۰ میلی لیتر در دقیقه ارائه شده است. مقادیر بازده کل زمانی محاسبه می شود که اولین انگشتی به انتهای سلول محاسباتی رسیده باشد. پردازش تصاویر به دست آمده از نتایج آزمایش نشان می دهد که بازده کلی در حالت نیوتنی بودن سیال دارای کمترین مقدار نسبت به سیالات غیرنیوتنی مورد استفاده می باشد [۲۲، ۳۴]. پارامتر میانگین بازده به صورت بازده در هر گام زمانی برای هر سیال تا رسیدن به انتهای محیط متخلخل محاسبه شده است. روند تغییرات میانگین بازده حاکی از بهبود بازده در صورت استفاده از سیالات غیرنیوتنی در مقابل سیالات نیوتنی می باشد.

زمان گشایش<sup>۱</sup> یک پارامتر مهم در بررسی انگشتی لزج به حساب می آید. زمان گشایش در واقع به صورت مدت

<sup>1</sup> break through time



## ۸- مراجع

1. Saffman, P.G., and Taylor, G.I. "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,PP.312-329,1958.  
<https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0085>
2. Taylor, G.I. "The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences" Vol.201,(1065)pp.192-196,1950.  
<https://doi.org/10.1098/rspa.1950.0052>
3. Lewis, D. "The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. II. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences" vol,202(1068)pp.81-96.1950.  
<https://doi.org/10.1098/rspa.1950.0052>
4. Malhotra, S., Sharma, M.M.,and Lehman, E.R. "Experimental study of the growth of mixing zone in miscible viscous fingering. Physics of Fluids", Vol. 27(1): pp. 014105. 2015. DOI:10.1063/1.4905581
5. Homsy, G.M. "Viscous fingering in porous media. Annual review of fluid mechanics", Vol.19(1): pp. 271-311, 1987.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.fl.19.010187.001415>
6. Hill, S., "Channeling in packed columns. Chemical Engineering Science", Vol.1(6): pp. 247-253. 1952. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(52\)87017-4](https://doi.org/10.1016/0009-2509(52)87017-4)
7. Lenormand, R., E. Touboul, and C. Zarcone, Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media. Journal of fluid mechanics", Vol. 189: pp. 165-187.1988. DOI:  
<https://doi.org/10.1017/S0022112088000953>
8. Chen, J.-D. and D. Wilkinson, "Pore-scale viscous fingering in porous media. Physical review letters", Vol.55(18),pp.1892.1985. DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.1892>
9. Blackwell, R., J. Rayne, and W. Terry, "Factors influencing the efficiency of miscible displacement. Transactions of the AIME, Vol.217(01)pp.1-8.1959.  
<https://doi.org/10.2118/1131-G>
10. Chuoke, R., P. Van Meurs, and C. van der Poel, "The instability of slow, immiscible, viscous

آزمایش‌های از متانول حاوی رنگ خوراکی به‌عنوان سیال تزریقی و جلوبرنده استفاده شده است. رخداد انگشتی شدن جریان در فصل مشترک دو سیال در محیط متخلخل یکی از موضوعات مهم در صنعت نفت و فیلتراسیون است که دارای کاربردهای زیادی می‌باشد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طول مرز در فصل مشترک دو سیال برای حالت نیوتنی همواره بیشتر از حالات غیرنیوتنی بودن سیال می‌باشد که این مسئله حاکی از پایداری بیشتر پدیده انگشتی لزج در حالت غیرنیوتنی بودن سیال بستر است. کنترل و کاهش ناپایداری انگشتی شدن جریان یک هدف مهم در کاربردهای صنعتی است که خصوصاً در ازدیاد برداشت از مخازن نفتی مورد چالش می‌باشد. همچنین بررسی نحوه رفتار این ناپایداری در روند پخش آلودگی‌های زیست‌محیطی شامل منابع آب‌وخاک مورد اهمیت می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم بررسی ناپایداری رصد موقعیت مکانی بلندترین انگشتی در طول سلول محاسباتی متخلخل می‌باشد. بررسی این پارامتر که نشان‌دهنده رفتار انگشتی‌های غالب و بلندترین انگشتی غالب است شدت ناپایداری در مدت‌زمان تزریق را نشان می‌دهد. بازده جاروب شدن محیط متخلخل را می‌توان مهم‌ترین پارامتر در بررسی رخ داد انگشتی محسوب نمود. اغلب مطالعات در این حوزه باهدف افزایش درصد بازده جاروب یا به بررسی عوامل کاهش/افزایش این پارامتر معطوف شده است. مشاهدات آزمایشگاهی حاکی از این مسئله است که بازده جاروب با بهره‌گیری از سیالات غیرنیوتنی در مقابل سیال نیوتنی افزایش می‌یابد. این موضوع در مورد زمان گشایش نیز برقرار است. این پارامتر به دلیل ایجاد کانال جریانی برای سیال تزریقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

## ۷- فهرست علائم و اختصار

علائم	علامت اختصار	واحد اندازه‌گیری
چگالی	$\rho$	$m^3/kg$
ویسکوزیته	$\mu$	Pa.s
تخلخل	$\phi$	بدون واحد
حجم	$V$	$m^3$
نفوذپذیری	$K$	$m^2$

22. Siavashi, M., Numerical simulation of two-phase non-Newtonian polymer flooding in porous media to enhance oil recovery. *Modares Mechanical Engineering*, 2016. 16(7): p. 297-307.
23. Li, H., B. Maini, and J. Azaiez, Experimental and numerical analysis of the viscous fingering instability of Shearthinning fluids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 84(1): pp. 52-62. 2006.
24. Delshad, M., "et al. Mechanistic interpretation and utilization of viscoelastic behavior of polymer solutions for improved polymer-flood efficiency. in *SPE Symposium on Improved Oil Recovery*. 2008. Society of Petroleum Engineers".
25. Jackson, G.T., et al., CFD-based representation of non-Newtonian polymer injectivity for a horizontal well with coupled formation-wellbore hydraulics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011. 78(1): p. 86-95.
26. Fontana, J.V., E.O. Dias, and J.A. Miranda, Controlling and minimizing fingering instabilities in non-Newtonian fluids. *Physical Review E*, 2014. 89(1): p. 013016.
27. Shoghi, M.R. and M. Norouzi, Linear stability analysis and nonlinear simulation of non-Newtonian viscous fingering instability in heterogeneous porous media. *Rheologica Acta*, 2015. 54(11): p. 973-991.
28. Logvinov, O.A., Viscous fingering in poorly miscible power-law fluids. *Physics of Fluids*, 2022. 34(6): p. 063105.
29. Jangir, P., R. Mohan, and P. Chokshi, Stability analysis of miscible viscous fingering in bingham and carreau fluids. *Transport in Porous Media*, 2022. 141(2): p. 561-583.
30. Vamerzani, B., M. Norouzi, and B. Firoozabadi, Theoretical and experimental study on the motion and shape of viscoelastic falling drops through Newtonian media. *Rheologica Acta*, 2016. 55(11): p. 935-955.
31. Brandão, L.V., et al., Bioconversion from crude glycerin by *Xanthomonas campestris* 2103: xanthan production and characterization. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2013. 30: p. 737-746.
32. Athy, L.F., Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *Aapg Bulletin*, 1930. 14(1): p. 1-24. <https://doi.org/10.1306/3D93289E-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- liquid-liquid displacements in permeable media. *Transactions of the AIME*, Vol. 216(01) , pp. 188-194. 1959. <https://doi.org/10.2118/1141-G>
11. Perrine, R.L., "The development of stability theory for miscible liquid-liquid displacement. *Society of Petroleum Engineers Journal*", Vol.1(01): pp. 17-25. 1961. <https://doi.org/10.2118/1509-G>
12. Tan, C. and G. Homsy, "Stability of miscible displacements in porous media: Rectilinear flow. *The Physics of fluids*", Vol. 29(11): pp. 3549-3556. 1986. <https://doi.org/10.1063/1.865832>
13. Christie, M. and D. Bond, "Detailed simulation of unstable processes in miscible flooding. *SPE Reservoir Engineering*", 1987. 2(04): p. 514-522.
14. Kopf Sill, A.R. and G. Homsy, "Nonlinear unstable viscous fingers in Hele-Shaw flows. I. Experiments. *The Physics of fluids*", 1988. 31(2): p. 242-249.
15. Ruith, M. and E. Meiburg, "Miscible rectilinear displacements with gravity override. Part 1. Homogeneous porous medium. *Journal of Fluid Mechanics*", 2000. 420: p. 225-257.
16. Jiao, C. and T. Maxworthy, "An experimental study of miscible displacement with gravity-override and viscosity-contrast in a Hele Shaw cell. *Experiments in fluids*", 2008. 44(5): p. 781-794.
17. Benham, A. and R. Olson, A model study of viscous fingering. *Society of petroleum engineers journal*, 1963. 3(02): p. 138-144.
18. Hosseinalipoor, S.M., et al., Experimental study of finger behavior due to miscible viscous and gravity contrast in a porous model. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020. 42(19): p. 2434-2447.
19. Miri, H., H. Saffari, and S. Hosseinalipoor, Numerical Investigation of Miscible Viscous Fingering Instability in Darcian and Non-Darcian Porous Media. *Modares Mechanical Engineering*, 2020. 20(10): p. 2471-2482.
20. Keable, D., et al., The effect of viscosity ratio and Peclet number on miscible viscous fingering in a Hele-Shaw cell: A combined numerical and experimental study. *Transport in Porous Media*, 2022. 143(1): p. 23-45.
21. Azaiez, J. and B. Singh, Stability of miscible displacements of shear thinning fluids in a Hele-Shaw cell. *Physics of Fluids*, 2002. 14(5): p. 1557-1571.

33. Darcy, H., Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application. 1856: Victor Dalmont.
34. Clarke, A., et al., How viscoelastic-polymer flooding enhances displacement efficiency. SPE Journal, 2016. 21(03): p. 0675-0687. <https://doi.org/10.2118/174654-PA>