



Experimental Investigation of Foam Flow Dynamics for Enhancing Gas Injection Performance in Layered Heterogeneous Micromodels

A. H. Molaei¹, M. Simjoo^{2*}

1- MSc. in Petroleum Engineering, Tabriz University of Technology

2- Assistant Professor of Petroleum Engineering, Tabriz University of Technology

Email: simjoo@sut.ac.ir

Abstract

Controlling the flow path of injected fluids in layered heterogeneous oil reservoirs remains a critical challenge for enhancing the performance of gas-based enhanced oil (EOR) recovery processes. Foaming the injected gas is a promising method to address this challenge by creating selective flow resistance and improving fluid diversion. Foam generates resistance in high-permeability layers, effectively diverting injected fluids toward lower-permeability zones and improving sweep efficiency. To optimize this process, a pore-scale understanding of foam flow behavior and the underlying mechanisms of fluid diversion is essential. In this study, the flow behavior of foam was investigated under two conditions: (1) in the absence of oil (simulating aquifer conditions) and (2) in the presence of water-flood residual oil. A micromodel with two interconnected layers of contrasting permeabilities was designed to simulate layered heterogeneous porous media. Results demonstrated that in the absence of oil, foam generation effectively diverted the injected fluid flow into the lower-permeability layer. In the presence of oil, foam effectively controlled the injected gas front, significantly increasing residual oil production from 3% to 75%. These findings support the significant potential of foam to enhance gas-based EOR processes and increase incremental oil recovery. This study also highlights foam injection as an effective strategy for controlling fluid flow paths in layered heterogeneous porous media and significantly boosting residual oil production. By increasing fluid viscosity and flow resistance in high-permeability layers, foam diverts fluids to low-permeability zones, thereby enhancing the efficiency of gas injection processes.

Received: 9 July 2024

Accepted: 8 April 2025

Page Number: 8-20

Keywords:

Foam Injection,
Gas Injection,
Heterogeneous
Micromodel,
Fluid Diversion,
Mobility,
Enhanced Oil Recovery

Please Cite this Article Using:

Molaei, A. H., & Simjoo, M. (2026). Experimental Investigation of Foam Flow Dynamics for Enhancing Gas Injection Performance in Layered Heterogeneous Micromodels. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(143), 8-20, [In Persian].



مطالعه آزمایشگاهی دینامیک جریان فوم برای افزایش عملکرد تزریق گاز در میکرومدل لایه‌ای ناهمگن

امیرحسین مولایی^۱، محمد سیم جو^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی تبریز

۲- دانشیار مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی تبریز

پیام‌نگار: simjoo@sut.ac.ir

چکیده

کنترل مسیر سیال تزریقی برای بهبود عملکرد فرایندهای گازپایه به‌ویژه در شرایط مخازن نفتی ناهمگن، یکی از چالش‌های اساسی در تولید نفت است. یکی از روش‌های مؤثر برای مقابله با این چالش، فوم‌سازی گاز تزریقی است. فوم با ایجاد مقاومت در لایه‌های با تراوایی بالا، موجب انحراف جریان سیال به سمت لایه‌های کم‌تراوا می‌شود. با این حال، برای دستیابی به این عملکرد، بررسی رفتار جریانی فوم در مقیاس حفره ضروری است تا سازوکارهای مؤثر در انحراف سیال به‌خوبی تبیین شود. در این مطالعه، رفتار جریان فوم در شرایط غیاب نفت (مشابه شرایط آبخوان) و در حضور نفت باقی‌مانده بررسی شد. بدین منظور، الگویی از محیط متخلخل طراحی شد که شامل دولایه با تراوایی مختلف است که بایکدیگر در ارتباط سیالی هستند. نتایج نشان داد که در شرایط بدون نفت، حضور فوم سبب می‌شود تا جریان سیال تزریقی به سمت لایه با تراوایی کمتر منحرف شود. همچنین، در حضور نفت، فوم توانست عملکرد مطلوبی در کنترل جبهه حرکت گاز تزریقی داشته باشد، به طوری که منجر به افزایش تولید نفت باقی‌مانده از ۳ درصد به ۷۵ درصد شد. این نتایج، بیانگر ظرفیت فوم برای ارتقای فرایندهای گازپایه به‌منظور ازدیاد برداشت نفت است. نتایج همچنین، نشان داد که تزریق فوم می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر برای کنترل مسیر سیال تزریقی در شرایط مخازن ناهمگن لایه‌ای و نیز افزایش تولید نفت باقی‌مانده باشد. فوم با افزایش گرانروی سیال، مقاومت جریان را در لایه‌های با تراوایی بالا افزایش می‌دهد و باعث انحراف سیال به سمت مناطق هدف کم‌تراوا و متعاقباً بهبود کارایی فرایند تزریق گاز می‌شود.

کلیدواژه‌ها:

تزریق فوم،
تزریق گاز،
میکرومدل ناهمگن،
انحراف سیال،
تحرك پذیری،
ازدیاد برداشت نفت

* تبریز، دانشگاه صنعتی تبریز، دانشکده مهندسی نفت و گاز

استناد به مقاله:

مولایی، امیرحسین و سیم جو، محمد. (۱۴۰۴). مطالعه آزمایشگاهی دینامیک جریان فوم برای افزایش عملکرد تزریق گاز در میکرومدل لایه‌ای ناهمگن، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۳)، ۸-۲۰.

۱. مقدمه

در دهه‌های گذشته، تزریق گاز به‌طور گسترده‌ای برای اهداف تولید نفت بررسی شده است [۱]. این فرایند را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته اصلی تزریق امتزاجی و غیرامتزاجی تقسیم کرد [۲]. در روش امتزاجی، گاز تزریقی با نفت موجود در مخزن کاملاً ممزوج می‌شود و یک سامانه تک‌فازی تشکیل می‌دهد که به کاهش گرانروی نفت و بهبود جابه‌جایی آن به سمت چاه‌های تولیدی می‌انجامد. در مقابل، در روش غیرامتزاجی، گاز تزریقی به‌طور کامل با نفت امتزاج نمی‌یابد و سازوکارهای اصلی جابه‌جایی، شامل افزایش فشار مخزن و رانش نفت است. در روش‌های تزریق گاز پایه خصوصاً شرایط غیرامتزاجی، به دلیل چالش‌هایی نظیر گرانروی و چگالی پایین گاز و ناهمگنی مخزن - که منجر به حرکت گاز به سمت لایه‌های با نفوذپذیری بالا می‌شود - [۲،۳]، فومی کردن گاز تزریقی، یک روشی مناسب برای کنترل تحرک‌پذیری گاز در گستره مخزن است. این روش می‌تواند به صورت تزریق همزمان گاز و عوامل فوم‌ساز و یا با تزریق متناوب آن‌ها انجام‌گیرد که سبب تشکیل فوم در محیط متخلخل می‌شود [۴]. فوم با افزایش گرانروی ظاهری، تحرک‌پذیری فاز گازی را کاهش می‌دهد [۵-۷]. نتایج آزمایشگاهی و میدانی نشان داده است که فوم دارای ظرفیت بالایی برای کنترل تحرک‌پذیری فاز گازی است [۸-۱۰]. براساس مطالعات مخازن ناهمگن، فوم در لایه‌های با نفوذپذیری بالا، گرانروی بیشتری از خود نشان می‌دهد و این لایه‌ها را مسدود می‌کند، که این امر می‌تواند شرایطی را ایجاد کند که سیال تزریقی به سمت لایه‌های با نفوذپذیری پایین‌تر هدایت شود [۱۱]. سازوکار جریان متقاطع بین دو لایه با تراوایی متفاوت، یکی از جنبه‌های کلیدی در عملکرد فوم در مخازن ناهمگن لایه‌ای است که تعامل پویا را بین خواص سیال و ساختار مخزن به‌نمایش می‌گذارد. اثر جریان در بین لایه‌های موازی که در ارتباط موئینگی باهم هستند، به‌عنوان جریان متقاطع در نظر گرفته می‌شود. این سازوکار به‌عنوان عاملی مثبت برای بهبود تولید سیال در یک محیط متخلخل ناهمگون شناخته می‌شود، زیرا به دلیل جریان متقاطع، سیال تزریقی از لایه پرتراوا به لایه کم‌تراوا منحرف می‌شود و بازده جارویی کل افزایش می‌یابد [۱۲] با این حال، برای بهره‌برداری کامل از ظرفیت فوم، بررسی رفتار جریانی فوم و سازوکارهای مؤثر بر آن در مقیاس حفره‌ها ضروری است. اگرچه انجام مطالعات جریانی فوم

با استفاده از مغزه‌ها - که نماینده خوبی از شرایط سازند هستند - می‌تواند برای توصیف عملکرد فوم در محیط متخلخل مناسب باشد، اما عموماً در این نوع آزمایش‌ها نمی‌توان جابه‌جایی فوم در محیط را به صورت بصری و در مقیاس حفره مشاهده کرد. بنابراین، استفاده از سامانه‌های بصری مبتنی بر میکرومدل می‌تواند دیدگاه مکانیسمی با ارزشی در مقیاس حفره‌های محیط متخلخل ارائه دهد و به درک بهتر رفتار جریانی فوم کمک کند [۱۳].

مطالعات متعددی در زمینه بررسی رفتار جریانی فوم در شرایط محیط متخلخل انجام شده است. کنگ و همکاران با استفاده از آزمایش تزریق فوم و شبیه‌سازی عددی نشان دادند که فوم می‌تواند اختلاف فشار را در طول جابه‌جایی افزایش دهد. این امر منجر به جابه‌جایی بهتر جبهه سیال از لایه با نفوذپذیری بالا به لایه‌های با نفوذپذیری متوسط و پایین شود [۱۴]. سینگ و همکاران با بررسی جریان فوم در یک سامانه دولایه، سازوکارهای تزریق فوم را تحلیل کردند و نتیجه گرفتند که جریان متقاطع بین دو لایه، سازوکار کلیدی برای کنترل فرایند جابه‌جایی است [۱۵]. کانن و همکاران نیز در مطالعه‌ای مشابه، به بررسی تولید نفت با تزریق آب، گاز، تزریق متناوب آب-گاز و فوم پرداختند. در این مطالعه، فوم تنها روشی بود که توانست فاز نفت قرار گرفته در ناحیه‌ای با تراوایی پایین را جابه‌جا کند [۱۶]. گوا و همکاران در یک مطالعه تجربی، اثرات تزریق گاز و فوم را به یک محیط متخلخل اشباع از آب نمک، با استفاده از میکرومدل بررسی کردند. نتایج نشان داد که تزریق فوم به‌طور چشم‌گیری کنترل تحرک‌پذیری گاز را در میکرومدل افزایش می‌دهد [۱۷]. چن و همکاران به بررسی تأثیر نفت بر روی عملکرد جریانی فوم پرداختند و دریافتند که نفت موجود در محیط متخلخل می‌تواند تأثیر منفی بر روی عملکرد فوم داشته باشد [۱۸]. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که روش‌های تزریق مبتنی بر گاز در محیط‌های متخلخل لایه‌ای ناهمگن دارای عملکرد جابه‌جایی مناسبی نیست و سیال تزریقی نمی‌تواند به‌طور مناسبی با لایه‌های کم‌تراوا تماس پیدا کند. از این رو، این مطالعه تلاش دارد با بررسی رفتار جریانی فوم در مقیاس میکرو، دید مکانیسمی مناسبی برای انحراف سیال از لایه پرتراوا به کم‌تراوا ایجاد کند. برخلاف تحقیقات قبلی که اغلب روی سامانه‌های تک‌لایه یا آزمایش‌های مغزه متمرکز بودند، این پژوهش با طراحی یک میکرومدل دولایه با

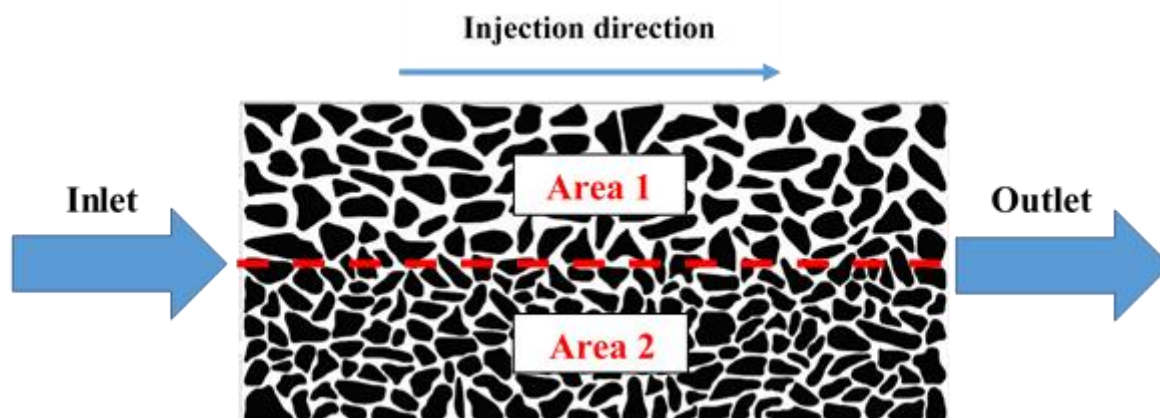
مشخصات دو لایه در جدول (۱) ارائه شده است. برای ساخت میکرومدل، از دو صفحه شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. ابتدا، الگوی مورد نظر بر روی یکی از صفحات شیشه‌ای حکاکی می‌شود. سپس، برای ایجاد عمق در نواحی حکاکی شده، شیشه با استفاده از اسید هیدروفلوئوریک^۲ ۴۸ درصد شسته می‌شود تا به عمق مطلوب برسد. به منظور ایجاد جریان در داخل میکرومدل، بخش‌های ورودی و خروجی مته‌کاری می‌شود. در مرحله بعد، دو صفحه شیشه‌ای روی هم قرار داده و در کوره تا دمای ۷۱۰ درجه سلسیوس گرم می‌شود. پس از رسیدن به این دما، کوره، خاموش و به مدت ۲۴ ساعت زمان داده می‌شود تا دمای شیشه‌ها به دمای محیط برسد. در نهایت، با قراردادن سرسوزن‌ها در ورودی و خروجی، میکرومدل آماده انجام آزمون‌های مورد نظر می‌شود.

تراوایی متضاد و ارتباط بین لایه‌ها، امکان مشاهده بصری و دقیق جابه‌جایی فوم را در مقیاس حفره‌ای فراهم کرده است. برای این منظور، نتایج آزمایش‌های تزریق فوم و گاز در حضور و غیاب نفت (مشابه شرایط آبخوان) بررسی شده است.

۲. بخش تجربی

۲-۱ طراحی و ساخت میکرومدل

در این پژوهش، از نرم‌افزار کورل دراو^۱ برای طراحی محیط متخلخل بهره گرفته شد. محیط متخلخل مورد نظر از دو بخش اصلی تشکیل شده است که در شکل (۱) نشان داده شده است. بخش‌های بالایی و پایینی این محیط به ترتیب «ناحیه ۱» و «ناحیه ۲» نام‌گذاری شده است. ناحیه ۱ دارای تراوایی دوبرابری نسبت به ناحیه ۲ است و این دو ناحیه بایکدیگر در ارتباط سیالی هستند.



شکل ۱. طرحواره الگوی میکرومدل.

Figure 1. Schematic of the micromodel pattern.

جدول ۱. مشخصه‌های فیزیکی میکرومدل.

Table 1. Micromodel Physical Parameters.

Zone	Lenth (cm)	Width (cm)	Average depth (cm)	Porosity (%)	Pore throat _{avg} (cm)	Pore volume (cm ³)
A	8	1.6	0.02	27.29	0.073	0.142
B	8	1.6	0.02	21.7	0.035	0.113

1. CorelDRAW

2. HF

۲-۲ مواد و فرایند آزمایش

نفت خام استفاده شده در این آزمایش از یکی از مخازن نفتی جنوب ایران تهیه شده بود. خواص نفت خام، از جمله: چگالی، گرانروی و کشش سطحی آن در حضور آب سازندی و در شرایط محیطی، در جدول (۲) نشان داده شده است. در این آزمایش، گاز هوا به عنوان گاز مورد استفاده انتخاب شد. به منظور ایجاد فوم، از محلول فوم ساز سدیم دودسیل سولفات^۱ با غلظت ۰/۳۳ درصد وزنی و در شرایط شوری ۳۵۰۰۰ پی‌پی‌ام سدیم کلرید استفاده شد. لازم به ذکر است که مبنای انتخاب غلظت‌ها بر اساس مطالعات پیشین و آزمایش‌های اولیه انجام شده، متناسب با غلظت بحرانی مایسلی محلول فوم ساز استفاده شده، بوده است. در سناریوی تزریق فوم، تزریق هم‌زمان محلول سورفکتانت و گاز هوا برای تشکیل فوم استفاده شد. در سناریوی تزریق گاز، گاز و آب به طور هم‌زمان با دبی مشابه آزمایش فوم تزریق شدند تا بتوان تأثیرات مختلف حضور/عدم حضور فوم را مقایسه کرد. برای سهولت در اخذ تصاویر میکرومدل و به منظور مشاهده بهتر جریان سیال در طول آزمایش، از رنگ متیلن‌بلو برای

رنگ کردن محلول آب‌نمک استفاده شد.

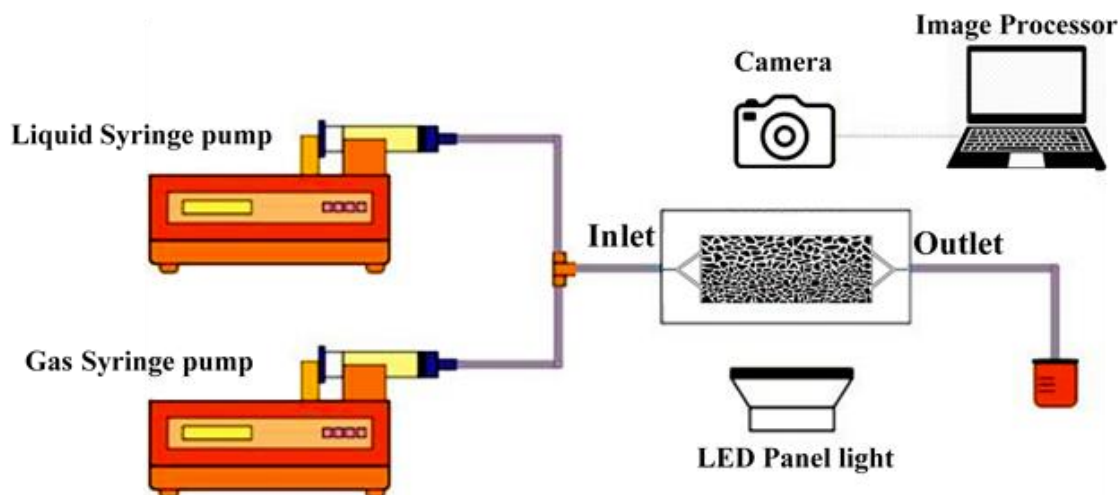
۳-۲ طراحی آزمایش

آزمایش‌های میکرومدل تحت شرایط فشار و دمای محیط و به صورت یک سامانه جریان افقی و در قالب تزریق امتزاج‌ناپذیر انجام شد. فرایند تزریق، شامل دو پمپ سرنگی برای تزریق سیال، دوربین دیجیتال و منبع نور بود (شکل (۲)). پیش از تزریق هرگونه سیال، سامانه میکرومدل ابتدا با تولوئن و آب شسته شد و به مدت ۲۴ ساعت در آن خشک شد. برای آزمایش‌های تزریق هم‌زمان، از یک قطعه T شکل برای اختلاط دو فاز تزریقی به میکرومدل استفاده شد. برای مشاهده حرکت جبهه جابه‌جایی سیالات در میکرومدل، یک دوربین دیجیتال، رفتار جریانی سیال را در طول آزمایش ثبت کرد. سپس، تصاویر به دست آمده برای توصیف عملکرد فوم و گاز و همچنین، محاسبه میزان نفت تولیدی از راه نرم‌افزارهای تحلیل تصویر بررسی شد.

جدول ۲. خواص نفت استفاده شده در این مطالعه.

Table 2. Properties of the oil used in this study.

Oil	viscosity (10^{-3} Pa·s)	density (g/cm^3)	IFT _{oil/brine} (mN/m)
	11.1	0.86	21.44



شکل ۲. طرحواره سامانه تزریق میکرومدل.

Figure 2. Schematic of the micromodel injection system.

۰/۰۰۸ میلی‌لیتر در دقیقه به میکرومدل تزریق و سپس، فوم با کیفیت ۷۵ تزریق شد.

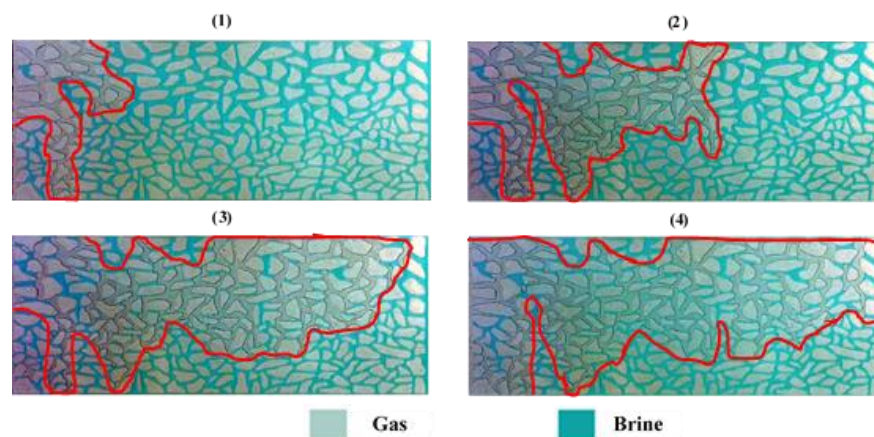
۳. نتیجه‌ها و بحث

در تمامی آزمایش‌های این مطالعه، قسمت چپ تصاویر بیانگر ناحیه ورودی به میکرومدل و قسمت راست تصاویر ناحیه خروجی را نشان می‌دهد. در بخش‌های پیشرو، براساس آنالیز تصاویر میکرومدل، به بررسی و تحلیل کیفی ویژگی‌های جریان سیال اعم از گاز و فوم در سناریوهای مختلف تزریق پرداخته خواهد شد.

۳-۱- تزریق گاز در شرایط غیاب نفت در محیط

تصاویر میکرومدل در طول فرایند تزریق گاز به میکرومدل اشباع از آب در شکل (۳) نشان داده شده است. با شروع تزریق، گاز پیشروی خود را از لایه با تراوایی بیشتر آغاز می‌کند (۴۸۰ ثانیه). با گذشت زمان، پیشروی در این لایه ادامه می‌یابد و لایه کم‌تراوا دست‌نخورده باقی می‌ماند (۷۲۰ ثانیه). این مسأله به دلیل تحرک بالای گاز و گرانروی پایین تر آن نسبت به آب است که منجر به تمایل گاز به عبور از مسیرهای با تراوایی بیشتر می‌شود. این روند با گذشت زمان، موجب ایجاد کانال در این لایه می‌شود (۱۵۰۰ ثانیه). با شکل‌گیری کانال‌ها، گاز از این مسیرها از محیط خارج می‌شود و لایه‌های کم‌تراوا عملاً دست‌نخورده باقی می‌ماند.

در ابتدا، آزمایش‌های پایه، بدون حضور نفت انجام شد. سپس، به منظور تعیین تأثیر نفت بر عملکرد جریانی فوم، آزمایش‌ها در حضور نفت انجام گرفت. در غیاب نفت و برای سناریوی تزریق گاز، میکرومدل ابتدا با آب اشباع شد و سپس، تزریق هم‌زمان گاز و آب به ترتیب با نرخ تزریق ۰/۰۰۶ میلی‌لیتر در دقیقه برای گاز و ۰/۰۰۲ میلی‌لیتر در دقیقه برای آب انجام شد. در سناریوی تزریق فوم، میکرومدل ابتدا با محلول سورفکتانت اشباع شد و سپس، تزریق فوم با کیفیت^۱ ۷۵ درصد (نرخ تزریق ۰/۰۰۶ میلی‌لیتر در دقیقه برای گاز و ۰/۰۰۲ میلی‌لیتر در دقیقه برای محلول سورفکتانت) انجام شد. لازم به ذکر است که کیفیت فوم یکی از مشخصه‌های مهم در توصیف رفتار جریانی فوم و نشان‌دهنده میزان گاز موجود در ساختار فوم است. به طور دقیق‌تر، کیفیت فوم بیانگر نسبت حجم گاز موجود در فوم به حجم کل فوم (مجموع حجم گاز و حجم مایع) اطلاق می‌شود. در حضور نفت، ابتدا میکرومدل با آب، اشباع و سپس، نفت با دبی ۰/۲ میلی‌لیتر در دقیقه تزریق شد. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها، قسمت ابتدایی ناحیه ورودی میکرومدل فاقد نفت است و این ناحیه، به عنوان بخش ایجادکننده فوم در محیط متخلخل در نظر گرفته شد. سپس، میکرومدل حاوی نفت تحت تزریق آب قرار گرفت تا به شرایط اشباع باقی‌مانده نفت برسد. در نهایت، سناریوهای تزریق گاز و فوم به میکرومدل حاوی نفت باقی‌مانده انجام گرفت. در سناریوی تزریق فوم، محلول سورفکتانت با دبی



شکل ۳. تصاویر میکرومدل در طول تزریق گاز در شرایط غیاب نفت در زمان‌های مختلف، به ترتیب از شکل (۱) تا (۴): زمان ۲۴۰، ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۵۰۰ ثانیه.

Figure 3. Micromodel images during gas injection in the absence of oil at different times, in order from Figures (1) to (4): 240, 480, 720, 1500 seconds.

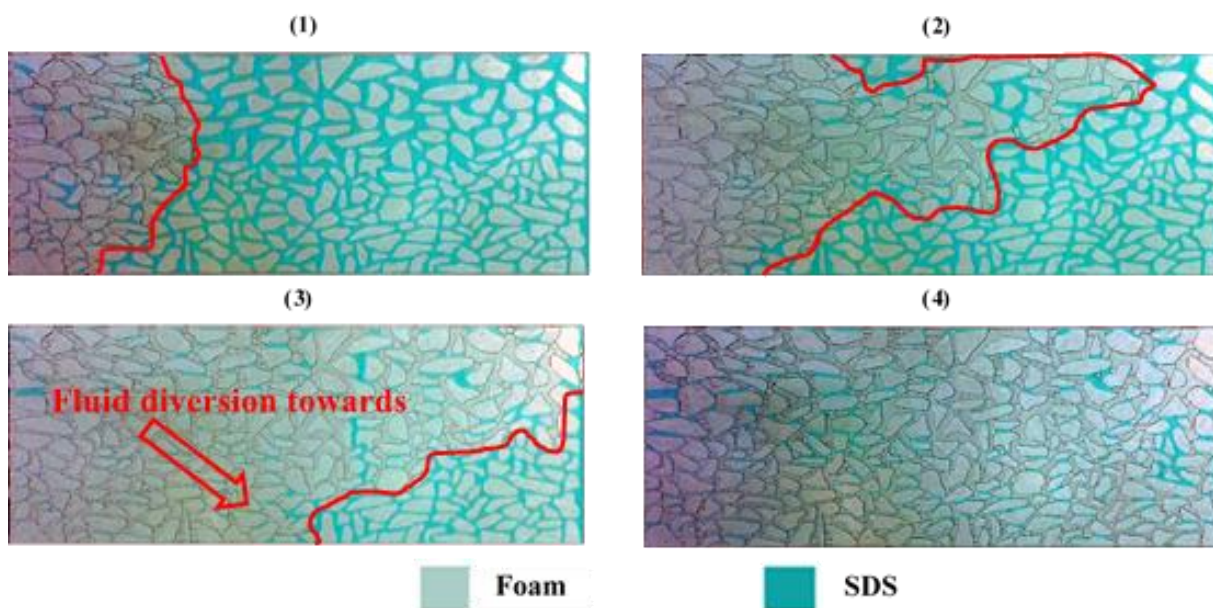
$$1. Q = \frac{Vq}{Vq+Vl} * 100$$

۲-۲ تزریق فوم در شرایط غیاب نفت در محیط

در محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای نسبت‌های حرکت نامطلوب بین فاز تزریقی و تولیدی منجر به کانال‌زنی و ازدست‌رفتن گاز تزریقی می‌شود (شکل (۳))، اما فوم‌سازی گاز تزریقی منجر به افزایش گرانروی گاز و باعث کنترل حرکت جبهه گاز می‌شود. مطابق تصاویر میکرومدل در شکل (۴)، تزریق فوم به میکرومدل اشباع از محلول سورفکتانت رخ داد. با شروع تزریق، فوم پیشروی خود را شروع کرد (۴۸۰ ثانیه). با گذشت زمان، فوم با پیشروی در لایه‌های باتراوایی بالا منجر به انسداد مسیرهای پرتراوا شد (۷۲۰ ثانیه). این انسداد منجر به انحراف سیال از لایه پرتراوا به لایه کم تراوا می‌شود (۱۲۰۰ ثانیه). در پایان تزریق، فوم کل محیط را دربرمی‌گیرد (۱۵۶۰ ثانیه) که نشان‌دهنده عملکرد کارآمد فوم در کنترل حرکت‌پذیری در مقایسه با تزریق گاز در یک محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای است.

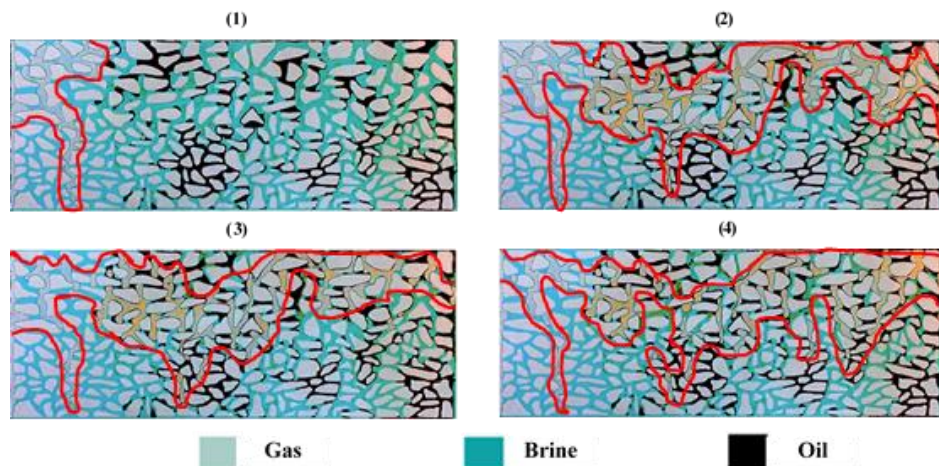
۳-۳ تزریق گاز در شرایط نفت باقی‌مانده

پس از تزریق آب و رسیدن به اشباع نفت باقی‌مانده، تزریق گاز به میکرومدل آغاز شد (شکل (۵)). گاز پیشروی خود را در لایه با تراوایی بالا آغاز کرد (۲۴۰ ثانیه). مشاهده شد که تزریق گاز در حضور نفت باقی‌مانده منجر به عملکرد ضعیف‌تری می‌شود و کانال‌زنی سریع‌تر رخ می‌دهد (۴۸۰ ثانیه) و گسترش جبهه گاز کمتر از شرایط تزریق گاز در آبخوان است. پس از کانال‌زنی، تغییر چندانی در الگوی حرکت جبهه گاز ایجاد نشد و گاز از مسیری که ایجاد کرده بود، خارج شد (۷۲۰ و ۱۵۰۰ ثانیه). هم‌چنین، حضور نفت در محیط متخلخل ناهمگن بر عملکرد گاز تزریقی تأثیرگذار بوده و منجر به افزایش سرعت پیشروی جبهه گاز در میکرومدل شده است. تأثیر حضور نفت باقی‌مانده بر تزریق گاز، عمدتاً به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نفت و شرایط محیط متخلخل بستگی دارد. علاوه بر این، مقدار نفت تولیدی در تزریق گاز به میزان ناچیزی بود، زیرا گاز تمایلی به عبور از مناطق با تراوایی کم نداشته است.



شکل ۴. تصاویر میکرومدل در طول تزریق فوم در شرایط غیاب نفت در زمان‌های مختلف، به ترتیب از شکل (۱) تا (۴): زمان ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۲۰۰، ۱۵۶۰ ثانیه.

Figure 4. Micromodel images during foam injection in the absence of oil at different times, in the order of Figure (1) to (4): 480, 720, 1200, 1560 seconds.



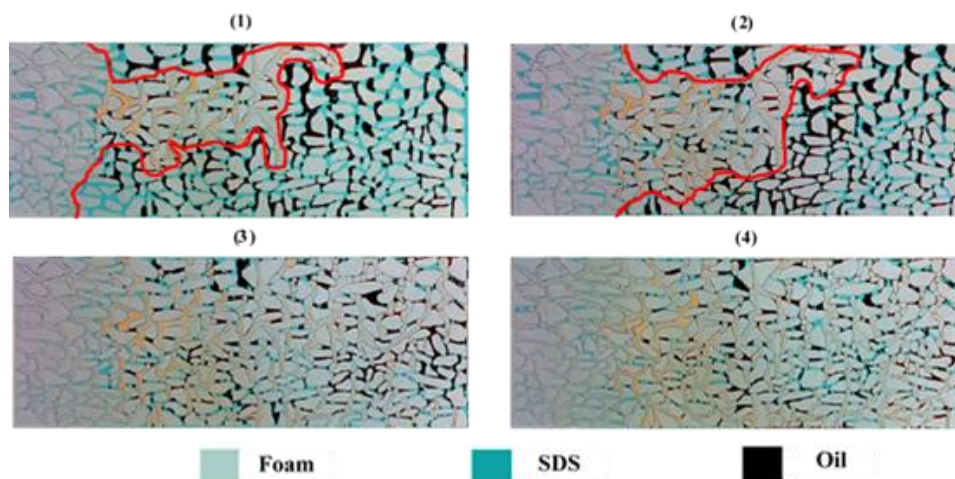
شکل ۵. تصاویر میکرومدل در طول تزریق گاز در شرایط نفت باقی مانده در زمان‌های مختلف به ترتیب از شکل (۱) تا (۴): زمان ۲۴۰، ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۵۰۰ ثانیه.

Figure 5. Micromodel images during gas injection under residual oil conditions at different times, in the order of Figures (1) to (4): 240, 480, 720, 1500 seconds.

کامل وارد لایه کم‌تراوا شود و از لایه پرتراوا میان‌شکنی کرده‌است (۴۸۰ و ۷۲۰ ثانیه). با گذشت زمان و با افزایش جابه‌جایی نفت و متعاقباً کاهش نفت باقی مانده در مسیر جریان فوم، پایداری و قدرت فوم (فوم با حباب ریزتر) افزایش می‌یابد (شکل ۷). این امر سبب افزایش مقاومت در برابر جریان فوم و در نتیجه، انحراف فوم به سمت نواحی کم‌تراوا می‌شود. در ادامه، فوم قوی تشکیل شده، محیط متخلخل را به‌طور کامل در برمی‌گیرد که این امر منجر به افزایش تولید ۵۰ درصدی نفت باقی مانده از لایه کم‌تراوا نیز می‌شود.

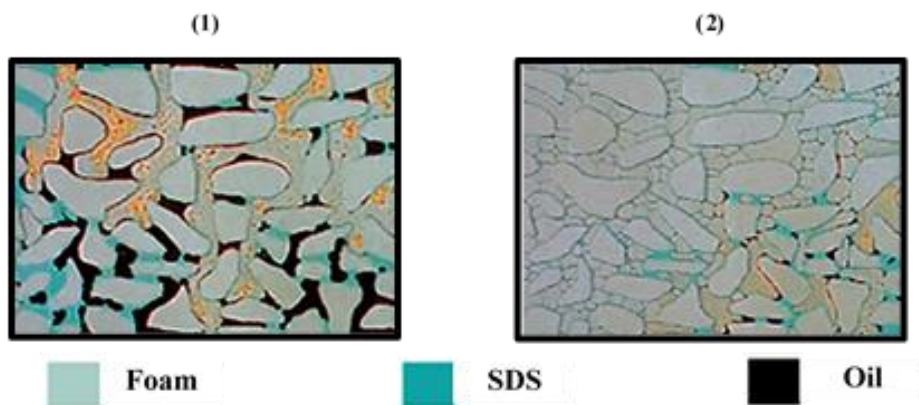
۳-۴ تزریق فوم در شرایط نفت باقی مانده

پس از رسیدن به شرایط اشباع نفت باقی مانده، تزریق فوم به میکرومدل انجام شد (شکل ۶). با گذشت زمان و تشکیل فوم در محیط، فوم آغاز به پیش‌روی در محیط متخلخل کرد (۴۸۰ ثانیه). هنگامی که جبهه پیش‌رونده فوم با نفت برخورد می‌کند، به واسطه حضور نفت تا حدی ساختار آن تخریب می‌شود. تحت این شرایط، حضور فوم با حباب‌های درشت در محیط مشهود است که اصطلاحاً به فوم ضعیف اطلاق می‌شود. این فوم ضعیف نتوانسته‌است به‌طور



شکل ۶. تصاویر میکرومدل در طول تزریق فوم در شرایط اشباع نفت باقی مانده در زمان‌های مختلف به ترتیب از شکل (۱) تا (۴): زمان ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۲۰۰، ۱۵۶۰ ثانیه.

Figure 6. Micromodel images during foam injection under residual oil saturation conditions at different times, in the order of Figures (1) to (4): 480, 720, 1200, 1560 seconds.



شکل ۷. تصویر میکرومقیاس در طول تزریق فوم در شرایط اشباع نفت باقی‌مانده در یک مکان مشخص در دو زمان مختلف به ترتیب: زمان ۴۸۰ و ۲۸۸۰ ثانیه.

Figure 7. Pore-scale image during foam injection under residual oil saturation conditions at a specific location at two different times, respectively: 480 and 2880 seconds.

۳-۵ مشاهدات تجربی

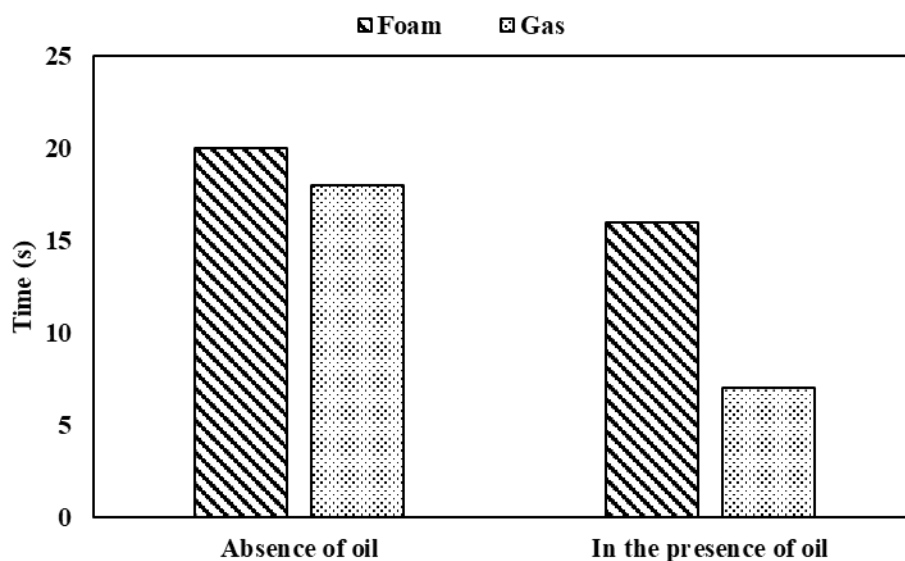
۳-۵-۱ میان‌شکنی گاز

در این مطالعه، زمان میان‌شکنی به‌عنوان معیاری برای ارزیابی پایداری و کارایی تزریق گاز و فوم در محیط متخلخل بررسی شده‌است. این زمان نشان‌دهنده لحظه‌ای است که گاز برای نخستین بار به خروجی میکرومدل می‌رسد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، بیشترین زمان میان‌شکنی در شرایط آبخوان رخ داده‌است؛ در حالی که در حضور نفت باقی‌مانده، میان‌شکنی سریع‌تر رخ داده‌است. این موضوع نشان می‌دهد که وجود نفت، باعث کاهش تأثیر فرایند کنترل‌شده تزریق گاز شده، مسیرهای جریان به سبب اختلاف تحرک سیالات تسریع می‌شود. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که تزریق فوم نسبت به گاز عملکرد بهتری داشته‌است، به‌ویژه در حضور نفت باقی‌مانده. در شرایط آبخوان، فوم توانسته‌است جبهه گاز را به شکل بهتری کنترل کند و حضور آن در هر دو لایه پرتراوا و کم‌تراوا مشهود بوده‌است. این امر، نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر و کاهش کانال‌زنی گاز است که موجب تأخیر در رسیدن گاز به خروجی شده‌است. از سوی دیگر، در تزریق گاز، به دلیل تحرک بالای فاز گازی، کانال‌زنی در لایه‌های پرتراوا تشدید شده و در نتیجه، میان‌شکنی با سرعت بیشتری رخ داده‌است. در شرایط نفت باقی‌مانده، اثر نامطلوب تحرک گاز بر افزایش سرعت میان‌شکنی مشهود است؛ به طوری که گاز تمایل بیشتری به حرکت از میان لایه‌های پرتراوا داشته و جبهه گاز به سرعت گسترش یافته‌است. این

امر منجر به کاهش کارایی تزریق گاز در جابه‌جایی نفت و افزایش هدررفت آن شده‌است. اما در این شرایط، فوم توانسته‌است که پایداری جبهه گاز را افزایش دهد و از میان‌شکنی سریع جلوگیری کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فوم به سبب افزایش گرانروی ظاهری و کاهش تحرک گاز، پدیده کانال‌زنی را مهار کرده و منجر به بهبود راندمان جابه‌جایی نفت در محیط متخلخل شده‌است.

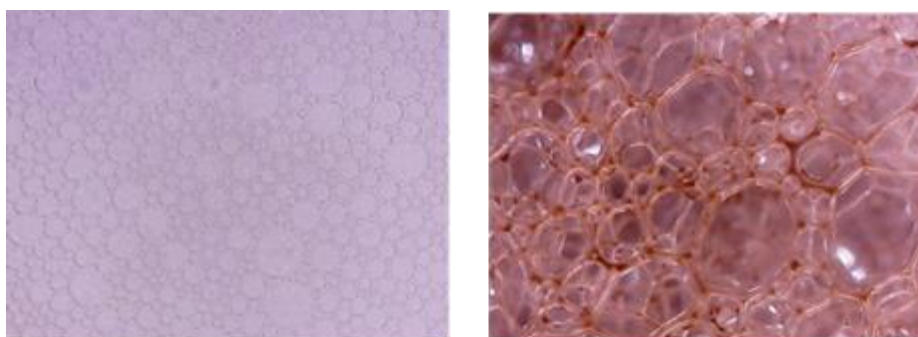
۳-۵-۲ تأثیر حضور نفت بر روی رفتار جریانی فوم

توانایی فوم برای پایدارماندن در هنگام تماس با نفت، یکی از چالش‌های اساسی در تزریق فوم به منظور افزایش تولید نفت است. این امر، برای دستیابی به کنترل حرکتی مطلوب و هم‌چنین، بهبود نرخ بازیافت نفت، حائز اهمیت است. مطالعات نشان می‌دهد که حضور نفت در محیط متخلخل، تأثیر منفی بر روی عملکرد تزریق فوم دارد. نفت با قرار گرفتن در فیلم فوم (لاملاها)، منجر به تخریب آن و کاهش نیمه‌عمر فوم می‌شود [۱۹]. برای توصیف بهتر اثر نفت بر روی فوم، مقایسه‌ای از آزمون بالک فوم در حضور و غیاب نفت در شکل (۹) نشان داده شده‌است. در حضور فاز نفتی در محیط، قطرات نفت با قرار گرفتن در لاملاها، باعث تخریب فوم می‌شود و هم‌چنین، حباب‌های فوم درشت‌تری نسبت به شرایطی که نفت وجود ندارد، مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده فوم ضعیف‌تری است. با این حال، در غیاب نفت، حباب‌های فوم همگن‌تری دیده می‌شود.



شکل ۸. زمان میان‌شکنی در سناریوهای مختلف تزریق گاز و فوم.

Figure 8. Breakthrough time during gas and foam injection scenarios.



شکل ۹. تأثیر حضور نفت بر روی فوم و اندازه حباب‌های آن.

Figure 9. Effect of oil presence on foam and bubble size.

عملکرد ناکارآمد تزریق گاز برای افزایش بازیافت نفت در مخازن ناهمگن با اختلافات تراوایی است.

۳-۵-۴ بررسی میکروسکوپی حباب‌های فوم در میکرومدل مطابق نتایج حاصل از آنالیز تصاویر فوم در مقیاس حفره‌ها، فوم موجود در لایه پرتراوا از منظر بافت و ساختار، تفاوت قابل ملاحظه‌ای با فوم موجود در لایه کم‌تراوا دارد. تصاویر میکروسکوپی ارائه شده در این بخش، پس از دستیابی سامانه رفتار جریانی فوم در شرایط پایا^۱ به دست آمده‌اند. شکل (۱۱) مقایسه‌ای را از حباب‌های فوم شکل گرفته در لایه‌های پرتراوا و کم‌تراوا در حضور و غیاب نفت نشان می‌دهد. مطابق تصاویر می‌توان دریافت که با کاهش نفوذپذیری

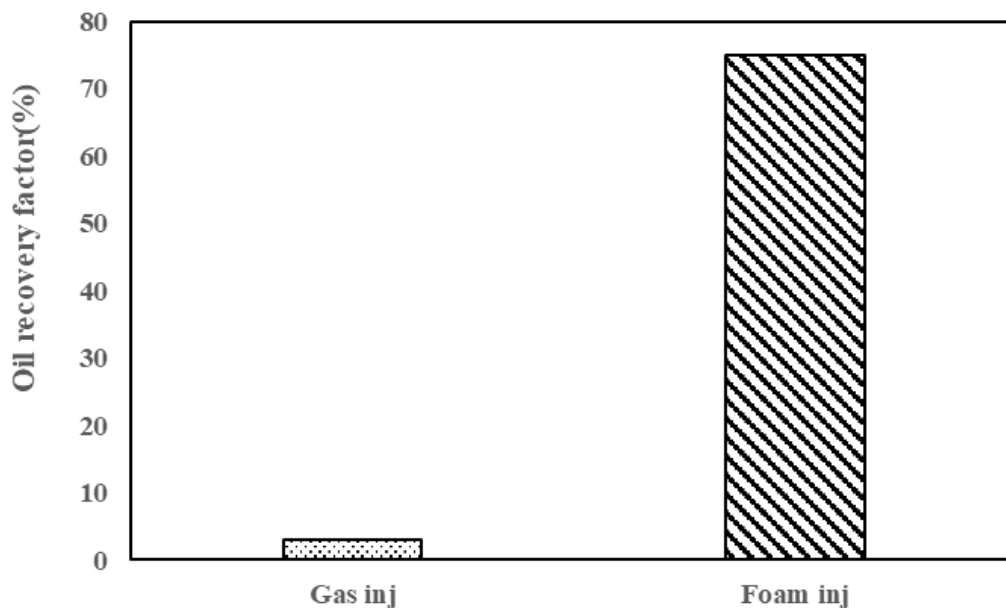
1. Steady-State

۳-۵-۳ ظرفیت فوم به‌عنوان عامل ازدیاد برداشت نفت

باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها، تزریق گاز در حضور نفت تنها منجر به بازیافت ۳٪ از نفت باقی مانده شده است، اما تزریق فوم باعث افزایش چشم‌گیری در بازیافت نفت شده است؛ به طوری که، ۷۵٪ از نفت باقی مانده بازیافت شده است (شکل (۱۰)). در لایه‌های با تراوایی کم، تزریق گاز کمترین تأثیر را داشته است، در حالی که تزریق فوم به دلیل قابلیت مطلوب آن در انحراف جریان سیال از لایه با تراوایی بالا به لایه با تراوایی کم، به طور قابل توجهی تولید نفت را افزایش داده است. این نتایج نشان می‌دهد که تزریق فوم نسبت به تزریق گاز عملکرد بهتری داشته و توانایی مناسبی در بازیافت نفت از لایه‌های با تراوایی کم دارد. در حالی که تزریق گاز، توانایی کمی در تغییر توزیع نفت از خود نشان می‌دهد که این موضوع، نشان‌دهنده

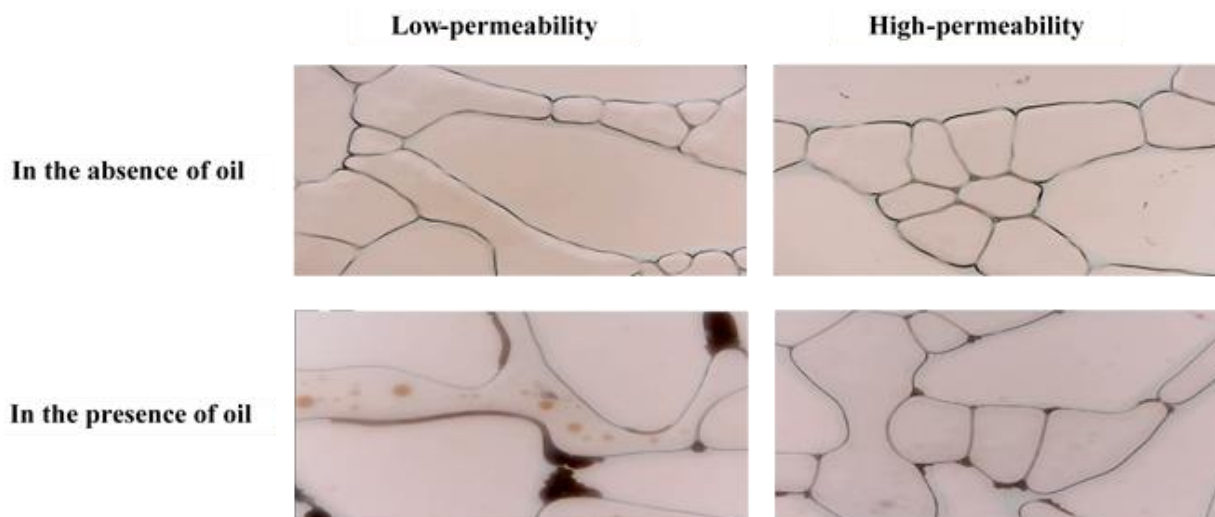
حباب‌های بزرگ‌تری در شرایط پایا حاصل شده‌است. با این حال، نکته مهم این است که فوم توانسته در حضور فاز نفتی کماکان عملکرد خود را حفظ و حباب‌های گاز را به صورت منفصل در محیط ایجاد کند که همین امر در کنترل تحرک پذیری فازی گازی و سپس، جابه‌جایی نفت در محیط تأثیرگذار است.

محیط و به دنبالش، افزایش اثر فشار موئینگی، ساختار فوم شکننده‌تر می‌شود و در نتیجه، حباب‌ها با ابعاد بزرگ‌تری ایجاد و در آخر، بافت فوم درشت‌تر می‌شود. این رخداد در حضور فاز نفتی در محیط بیشتر نمود دارد، به نحوی که در هر دو محیط پرتراوا و کم‌تراوا، بافت فوم و اندازه حباب‌های آن دستخوش تغییر شده و



شکل ۱۰. مقایسه ضریب بازیافت نفت در تزریق گاز و فوم.

Figure 10. Comparison of oil recovery factor during gas and foam injection.



شکل ۱۱. مقایسه فوم تشکیل‌شده در لایه‌های پرتراوا و کم‌تراوا در شرایط حضور و غیاب نفت.

Figure 11. Comparison of foam generation in high-permeability and low-permeability layers in the absence and presence of oil.

مراجع

- [1] Enick, R. M., Olsen, D., Ammer, J., & Schuller, W. (2012, April). Mobility and conformance control for CO₂ EOR via thickeners, foams, and gels-a literature review of 40 years of research and pilot tests. In SPE Improved Oil Recovery Conference, (pp. SPE-154122). SPE. <https://doi.org/10.2118/154122-MS>
- [2] Lake, L. W., Johns, R., Rossen, B., & Pope, G. A. (2014). Fundamentals of enhanced oil recovery 1(1). Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
- [3] Han, J., Lee, M., Lee, W., Lee, Y., & Sung, W. (2016). Effect of gravity segregation on CO₂ sequestration and oil production during CO₂ flooding. *Applied Energy*, 161, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.021>
- [4] Pedroni, L. G. (2017). Experimental study of mobility control by foams: potential of a FAWAG process in pre-salt reservoir conditions (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
- [5] Ding, L., Jouenne, S., Gharbi, O., Pal, M., Bertin, H., Rahman, M. A., ... & Guérrillot, D. (2022). An experimental investigation of the foam enhanced oil recovery process for a dual porosity and heterogeneous carbonate reservoir under strongly oil-wet condition. *Fuel*, 313, 122684. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122684>
- [6] Wu, Q., Ding, L., Zhang, L., Ge, J., Rahman, M. A., Economou, I. G., & Guérrillot, D. (2023). Polymer enhanced foam for improving oil recovery in oil-wet carbonate reservoirs: A proof of concept and insights into the polymer-surfactant interactions. *Energy*, 264, 126256. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126256>
- [7] Shahmarvand, S., & Ameli, F. (2021). A Review on Recent Studies on the Simulation of Foam Flooding in Porous Media. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 20(116), 64-83. <https://doi.org/10.22034/ijche.2021.260314.1074>, [In Persian].
- [8] Sanders, A. W., Jones, R. M., Linroth, M., & Nguyen, Q. P. (2012, October). Implementation of a CO₂ foam pilot study in the SACROC field: Performance evaluation. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition? (pp. SPE-160016). Spe. <https://doi.org/10.2118/160016-MS>
- [9] Roman, S., Abu-Al-Saud, M. O., Tokunaga, T., Wan, J., Kovscek, A. R., & Tchelepi, H. A. (2017). Measurements and simulation of liquid films during drainage displacements and snap-off in constricted capillary tubes. *Journal of colloid and interface science*, 507, 279-289. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.092>

۴. نتیجه‌گیری

هدف از این مطالعه، بررسی عملکرد ظرفیت فوم برای انحراف سیال به سمت لایه‌های با تراوایی کمتر در یک محیط متخلخل لایه‌ای ناهمگن بوده است. برای دستیابی به این هدف، از یک میکرومدل دولایه‌ای ناهمگن با اختلاف تراوایی که بخش‌های پرتراوا و کم‌تراوا آن باهم در ارتباط سیالی هستند، استفاده شد تا اثر جریان متقاطع بررسی شود. آزمایش‌ها در محیط متخلخل تحت شرایط غیاب نفت (مشابه شرایط آبخوان) و در حضور نفت باقی‌مانده به سبب تزریق آب انجام شد. براساس مشاهدات و آزمایش‌های انجام‌شده، مشخص شد که فوم تشکیل‌شده در محیط متخلخل در حضور جریان متقاطع، توانایی انحراف سیال از بخش‌های پرتراوا به کم‌تراوا را در هر دو شرایط دارد. نتایج اصلی پژوهش به شرح زیر است:

- طبق نتایج، مقایسه بین تزریق گاز و فوم در هر دو شرایط حضور و غیاب نفت نشان داد که فوم به خوبی توانست انحراف سیال را به سمت مناطق با تراوایی کمتر ایجاد کند که این امر منجر به افزایش بازده جاروبی در این لایه شد.
- تزریق گاز منجر به ایجاد کانال در لایه پرتراوا و هدررفت گاز تزریقی و به دنبالش، تسریع در زمان میان‌شکنی شد. طبق نتایج، رخداد این مسأله در شرایط نفت باقی‌مانده شدیدتر بود.
- تزریق فوم نسبت به تزریق گاز، عملکرد بهتری برای افزایش بازیافت نفت باقی‌مانده داشت که این موضوع نقش مهمی را در ارتقای بازیافت نفت از بخش کم‌تراوای میکرومدل ناهمگن لایه‌ای ایفا کرد.
- براساس نتایج، حضور نفت در محیط بر روی پیشروی جبهه گاز و فوم در میکرومدل ناهمگن لایه‌ای تأثیر داشت که منجر به تسریع زمان میان‌شکنی گاز شد. با این حال، فومی کردن گاز تزریقی توانست جبهه حرکت گاز را بهتر کنترل کند؛ به طوری که در پایان تزریق، کل محیط اعم از لایه کم‌تراوا و پرتراوا با فوم دربرگرفته شد که این امر منجر به ارتقای تولید نفت باقی‌مانده در محیط متخلخل ناهمگن، به ویژه در لایه کم‌تراوا شد.

- [10] Hosseini-Nasab, S. M., Gholipour Sangelaji, K., & Hormozi, F. (2025). Evaluation of Enhanced Oil Recovery Mechanisms Using Foam Stabilized by Surfactant-Nanosilica Hybrid. *Iranian Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.22034/ijche.2025.488822.1466>
- [11] Lv, M., Liu, Z., Ji, C., Jia, L., & Jiang, Y. (2018). Investigation of pore-scale behaviors of foam flow in a polydimethylsiloxane micromodel. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(44), 15172-15180. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b03366>
- [12] Nguyen, Q. P., Currie, P. K., & Zitha, P. L. (2005). Effect of crossflow on foam-induced diversion in layered formations. *SPE Journal*, 10(01), 54-65. <https://doi.org/10.2118/82270-PA>
- [13] Yang, W., Lu, J., Wei, B., Yu, H., & Liang, T. (2021). Micromodel studies of surfactant flooding for enhanced oil recovery: a review. *ACS omega*, 6(9), 6064-6069. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05750>
- [14] Kong, D., Li, Y., Yu, M., Ma, R., Guo, H., Peng, Y., ... & Yan, H. (2019). Experimental investigation on block and transport characteristics of foam in porous media for enhanced oil recovery processes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 570, 22-31. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.02.067>
- [15] Singh, R., & Mohanty, K. K. (2017). Foam flow in a layered, heterogeneous porous medium: A visualization study. *Fuel*, 197, 58-69. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.02.019>
- [16] Conn, C. A., Ma, K., Hirasaki, G. J., & Biswal, S. L. (2014). Visualizing oil displacement with foam in a microfluidic device with permeability contrast. *Lab on a Chip*, 14(20), 3968-3977. <https://doi.org/10.1039/C4LC00620H>
- [17] Guo, F., Aryana, S. A., Wang, Y., McLaughlin, J. F., & Coddington, K. (2019). Enhancement of storage capacity of CO₂ in megaporous saline aquifers using nanoparticle-stabilized CO₂ foam. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 87, 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.024>
- [18] Jian, G., Fernandez, C. A., Puerto, M., Sarathi, R., Bonneville, A., & Biswal, S. L. (2021). Advances and challenges in CO₂ foam technologies for enhanced oil recovery in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 202, 108447. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108447>
- [19] Aveyard, R., & Clint, J. H. (1996). Foam and thin film breakdown processes. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 1(6), 764-770. [https://doi.org/10.1016/S1359-0294\(96\)80079-3](https://doi.org/10.1016/S1359-0294(96)80079-3)