

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

Amirhossein Molaei<sup>1</sup>, Mohammad Simjoo<sup>2\*</sup>

1- M.Sc. in Petroleum Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

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

Email: simjoo@sut.ac.ir

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.

**Keywords:** Foam injection, Gas injection, Heterogeneous Micromodel, Fluid diversion, Mobility, Enhanced oil recovery

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

امیرحسین مولایی<sup>۱</sup>، محمد سیم‌جو<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

۲- دانشیار مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

پیام‌نگار: simjoo@sut.ac.ir

## چکیده

کنترل مسیر سیال تزریقی برای بهبود عملکرد فرآیندهای 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 کم تراوا می‌شود. با این حال، برای دستیابی به این عملکرد، بررسی رفتار جریان فوم در مقیاس حفره ضروری است تا مکانیسم‌های مؤثر در انحراف سیال به خوبی تبیین شوند. در این مطالعه، رفتار جریان فوم در شرایط عدم حضور نفت (مشابه شرایط آبخوان) و در حضور نفت باقی‌مانده بررسی شد. بدین منظور، الگویی از محیط متخلخل طراحی شد که شامل دو لایه با تراوایی مختلف بوده که با یکدیگر در ارتباط سیالی هستند. نتایج نشان داد 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 پتانسیل فوم جهت ارتقای فرآیندهای 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 ویسکوزیته سیال، مقاومت جریان را در لایه‌های با تراوایی بالا افزایش داده و باعث انحراف سیال به سمت مناطق هدف کم‌تراوا و متعاقباً بهبود کارایی فرآیند تزریق گاز می‌شود.

کلمات کلیدی: تزریق فوم، تزریق گاز، میکرومدل ناهمگن، انحراف سیال، تحرک‌پذیری، ازدیاد برداشت نفت

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

## ۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، تزریق گاز به‌طور گسترده‌ای جهت اهداف تولید نفت مورد بررسی قرار گرفته است [۱]. این فرایند را می‌توان به‌طور کلی به دو دسته اصلی تزریق امتزاجی و غیرامتزاجی تقسیم نمود [۲]. در روش امتزاجی، گاز تزریقی با نفت موجود در مخزن کاملاً ممزوج شده و یک سیستم تک‌فازی را تشکیل می‌دهد که این امر منجر به کاهش ویسکوزیته نفت و بهبود جابجایی آن به سمت چاه‌های تولیدی می‌شود. در مقابل در روش غیرامتزاجی، گاز تزریقی به‌طور کامل با نفت امتزاج نمی‌یابد و مکانیزم‌های اصلی جابجایی شامل افزایش فشار مخزن و رانش نفت است. در روش‌های تزریق گاز پایه خصوصاً شرایط غیرامتزاجی، به دلیل چالش‌هایی نظیر ویسکوزیته 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 تحرک پذیری گاز در گستره مخزن است. این روش می‌تواند به صورت تزریق همزمان گاز و عوامل فوم ساز و یا با تزریق متناوب آنها انجام گیرد که سبب تشکیل فوم در محیط متخلخل می‌شود [۴]. فوم با افزایش ویسکوزیته ظاهری، تحرک پذیری فاز گازی را کاهش می‌دهد [۵-۷]. نتایج آزمایشگاهی و میدانی نشان داده است که فوم دارای پتانسیل بالایی برای کنترل تحرک پذیری فاز گازی دارد [۸-۱۰]. براساس مطالعات انجام شد در مخازن ناهمگن، فوم در لایه‌های با نفوذپذیری بالا ویسکوزیته بیشتری از خود نشان داده و این لایه‌ها را مسدود می‌کند، که این امر می‌تواند شرایطی را ایجاد نماید که سیال تزریقی به سمت لایه‌های با نفوذپذیری پایین‌تر هدایت شود [۱۱].

مکانیزم جریان متقاطع بین دو لایه با تراوایی متفاوت، یکی از جنبه‌های کلیدی در عملکرد فوم در مخازن ناهمگن لایه‌ای است که تعامل پویا بین خواص سیال و ساختار مخزن را به نمایش می‌گذارد. اثر جریان در بین لایه‌های موازی که در ارتباط مویبندی با هم هستند، به‌عنوان جریان متقاطع در نظر گرفته می‌شود. این مکانیسم 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 شده و بازده جاروبی کل افزایش می‌یابد [۱۲]. با این حال، برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل فوم، بررسی رفتار جریانی فوم و مکانیزم‌های مؤثر بر آن در مقیاس حفرات 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 باشند اما عموماً در این نوع آزمایشها نمی‌توان جابجایی فوم در محیط را به صورت بصری و در مقیاس حفره مشاهده نمود. بنابراین استفاده از سیستم‌های بصری مبتنی بر میکرومدل می‌تواند دیدگاه مکانیزمی با ارزشی در مقیاس حفرات محیط متخلخل ارائه دهد و به درک بهتر رفتار جریانی فوم کمک نماید [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 جابجایی

افزایش دهد. این امر منجر به جابجایی 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 سیستم دولایه، مکانیزمهای تزریق فوم را تحلیل کرده و نتیجه گرفتند که جریان متقاطع بین دو لایه، مکانیزم کلیدی برای کنترل فرآیند جابجایی است [۱۵]. کانن و همکاران نیز در مطالعه‌ای مشابه به بررسی تولید نفت توسط 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 جابجا کند [۱۶]. گوا و همکاران در یک مطالعه تجربی، اثرات تزریق گاز و فوم به یک محیط متخلخل اشباع از آب نمک را با استفاده از میکرومدل مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که تزریق فوم به طور قابل توجهی کنترل تحرک پذیری گاز را در میکرومدل افزایش می‌دهد [۱۷]. چن و همکاران به بررسی تأثیر نفت بر روی عملکرد جریان 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 جابجایی مناسبی نیستند 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 مکانیزمی مناسبی برای انحراف سیال از لایه پرتراوا به کم‌تراوا ایجاد کند. برخلاف تحقیقات قبلی که اغلب روی سیستم‌های تک‌لایه یا آزمایش‌های مغزه متمرکز بودند، این پژوهش با طراحی یک میکرومدل دولایه با تراوایی متضاد و ارتباط بین لایه‌ها، امکان مشاهده بصری و دقیق جابجایی فوم را در مقیاس حفره‌ای فراهم کرده است. برای این منظور، نتایج آزمایش‌های تزریق فوم و گاز در حضور و عدم حضور نفت (مشابه شرایط آبخوان) مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- بخش تجربی

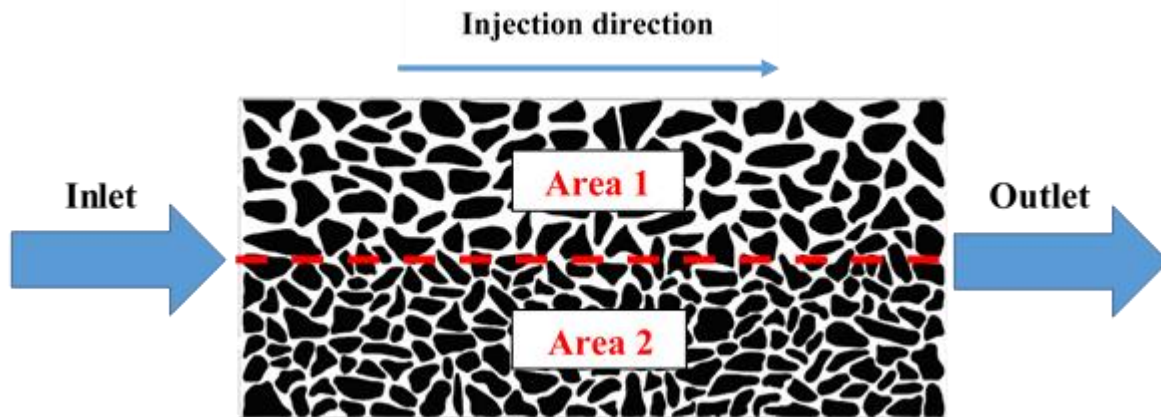
### ۲-۱- طراحی و ساخت میکرومدل

در این پژوهش، از نرم‌افزار کورل‌دراو<sup>۱</sup> برای طراحی محیط متخلخل بهره گرفته شد. محیط متخلخل موردنظر از دو بخش اصلی تشکیل شده است که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. بخش‌های بالایی و پایینی این محیط به ترتیب "ناحیه ۱" و "ناحیه ۲" نام‌گذاری شده‌اند. ناحیه ۱ دارای تراوایی دوبرابری نسبت به ناحیه ۲ است و این دو ناحیه با یکدیگر در ارتباط سیالی هستند. مشخصات دولایه در جدول ۱ ارائه شده است. برای ساخت میکرومدل، از دو صفحه شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شده است. ابتدا، الگوی موردنظر بر روی یکی از صفحات شیشه‌ای حکاکی می‌شود. سپس، برای ایجاد عمق در نواحی حکاکی شده، شیشه با استفاده از اسید هیدروفلوئوریک<sup>۲</sup> ۴۸ درصد شسته می‌شود تا به عمق مطلوب برسد. به‌منظور ایجاد جریان در داخل میکرومدل، بخش‌های ورودی و خروجی مته‌کاری می‌شوند. در مرحله بعد، دو صفحه شیشه‌ای روی هم قرار داده شده و در

<sup>۱</sup> CoreIDRAW

<sup>۲</sup> HF

کوره تا دمای ۷۱۰ درجه سانتی‌گراد گرم می‌شوند. پس از رسیدن به این دما، کوره خاموش شده 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 تست‌های مورد نظر می‌شود.



شکل ۱- شماتیک الگوی میکرومدل.

Figure 1- Schematic of the micromodel pattern.

جدول ۱- پارامترهای فیزیکی میکرومدل.

Table 1: Micromodel Physical Parameters.

Zone	Lenth (cm)	Width (cm)	Average depth(cm)	Porosity (%)	Pore throat <sub>avg</sub> (cm)	Pore volume (cm <sup>3</sup> )
A	8	1.6	0.02	27.29	0.073	0.142
B	8	1.6	0.02	21.7	0.035	0.113

## ۲-۲- مواد و فرایند آزمایش

نفت خام مورد استفاده در این آزمایش از یکی از مخازن نفتی جنوب ایران تهیه شده بود. خواص نفت خام، از جمله چگالی، ویسکوزیته و کشش سطحی آن در حضور آب سازندی و در شرایط محیطی، در جدول ۲ نشان داده شده است. در این آزمایش، گاز هوا به‌عنوان گاز مورد استفاده انتخاب شد. به‌منظور ایجاد فوم، از محلول فوم‌ساز سدیم دودسیل سولفات<sup>۳</sup> 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 سناریو تزریق فوم،

<sup>3</sup> SDS

تزریق هم‌زمان محلول سورفکتانت و گاز هوا جهت 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 به‌منظور مشاهده بهتر جریان سیال در طول آزمایش، از رنگ متیلن بلو برای رنگ کردن محلول آب‌نمک استفاده شد.

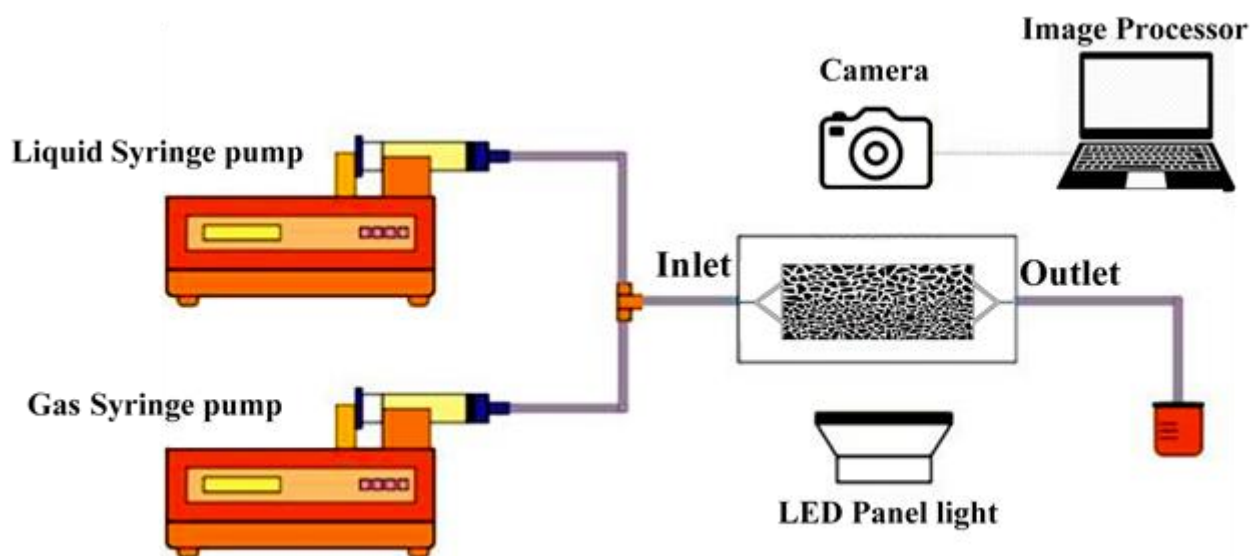
جدول ۲- خواص نفت مورد استفاده در این مطالعه.

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

Oil	viscosity ( $10^{-3}$ Pa.s)	density ( $\text{g/cm}^3$ )	IFT <sub>oil/brine</sub> (mN/m)
	11.1	0.86	21.44

## ۲-۳- طراحی آزمایش

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



شکل ۲- شماتیک سیستم تزریق میکرومدل.

Figure 2- Schematic of the micromodel injection system.

در ابتدا، آزمایش‌های پایه بدون حضور نفت انجام شدند. سپس، به‌منظور تعیین تأثیر نفت بر عملکرد جریانی فوم، آزمایش‌ها در حضور نفت انجام گرفتند. 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  $0/006$  میلی‌لیتر در دقیقه برای گاز و  $0/002$  میلی‌لیتر در دقیقه برای آب انجام شد. در سناریوی تزریق فوم، میکرومدل ابتدا با محلول سورفکتانت اشباع شد و سپس تزریق فوم با کیفیت<sup>۴</sup> ۷۵ درصد (نرخ تزریق  $0/006$  میلی‌لیتر در دقیقه برای گاز و  $0/002$  میلی‌لیتر در دقیقه برای محلول سورفکتانت) انجام شد. لازم به ذکر است که کیفیت فوم یکی از پارامترهای مهم در توصیف رفتار جریانی فوم بوده 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 شده و سپس نفت با دبی  $0/2$  میلی‌لیتر در دقیقه تزریق گردید. لازم به ذکر است که در تمامی آزمایش‌ها، قسمت ابتدایی ناحیه ورودی میکرومدل فاقد نفت بوده و این ناحیه به‌عنوان 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. نهایتاً سناریوهای تزریق گاز و فوم به میکرومدل حاوی نفت باقیمانده انجام گرفت. در سناریوی تزریق فوم، محلول سورفکتانت با دبی  $0/008$  میلی‌لیتر در دقیقه به میکرومدل تزریق و سپس فوم با کیفیت ۷۵ تزریق گردید.

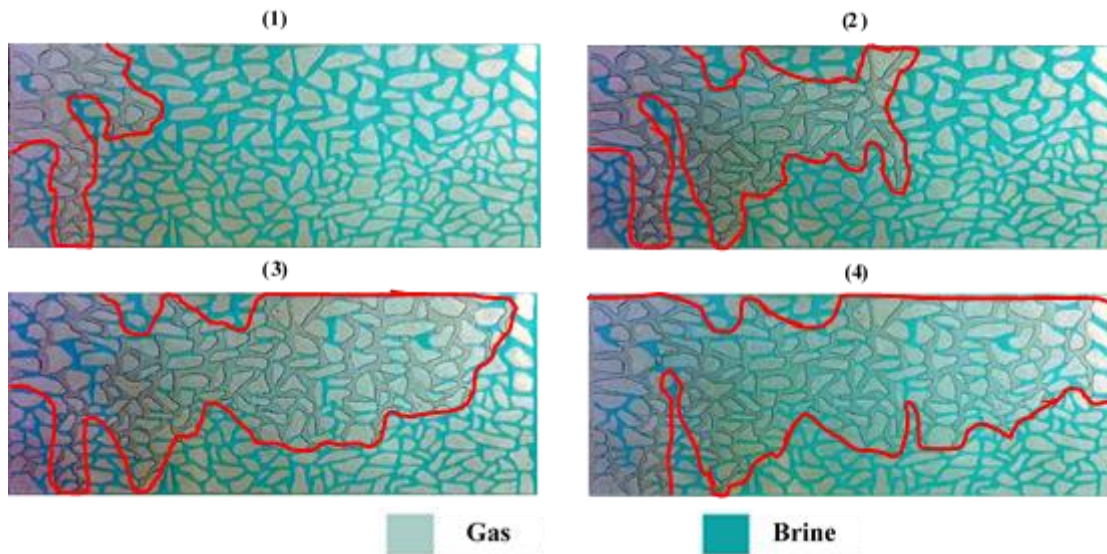
### ۳- نتیجه‌ها و بحث

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، بر اساس 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 عدم حضور 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). باگذشت زمان، پیشروی در این لایه ادامه یافته و لایه کم‌تراوا دست‌نخورده باقی می‌ماند (۷۲۰ ثانیه). این مسئله به دلیل تحرک بالای گاز و ویسکوزیته پایین‌تر آن نسبت به آب است که منجر به تمایل گاز به عبور از مسیرهای با تراوایی بیشتر می‌شود. این روند باگذشت زمان موجب ایجاد کانال در این لایه می‌شود (۱۵۰۰ ثانیه). با شکل‌گیری کانال‌ها، گاز از طریق این مسیرها از محیط خارج می‌شود و لایه‌های کم‌تراوا عملاً دست‌نخورده باقی می‌مانند.

<sup>۴</sup>  $Q = \frac{Vq}{Vq+Vl} * 100$

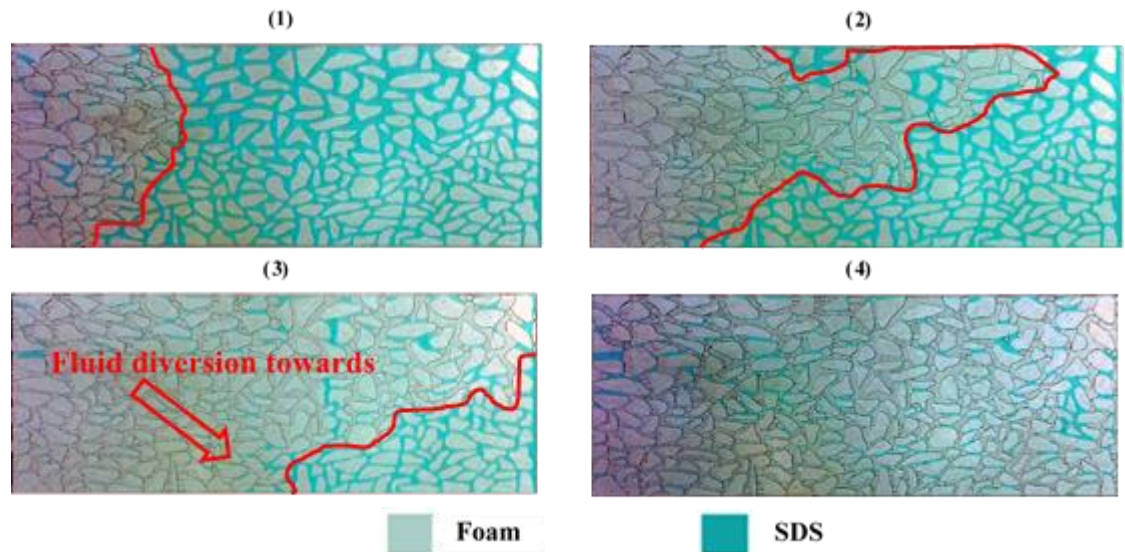


شکل ۳- تصاویر میکرومدل در طول تزریق گاز در شرایط عدم حضور نفت در زمانهای مختلف به ترتیب از شکل ۱ تا ۴: زمان ۲۴۰، ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۵۰۰ ثانیه.

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.

### ۳-۲- تزریق فوم در شرایط عدم حضور نفت در محیط

در محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای نسبت‌های تحرک نامطلوب بین فاز تزریقی و تولیدی منجر به کانال زنی و از دست رفتن گاز تزریقی می‌شود (شکل ۳)، اما فوم سازی گاز تزریقی منجر به افزایش ویسکوزیته گاز و باعث کنترل حرکت جبهه گاز می‌شود. مطابق تصاویر میکرومدل در شکل ۴، تزریق فوم به میکرومدل اشباع از محلول سورفکتانت صورت گرفت. 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 در بر می‌گیرد (۱۵۶۰ ثانیه) که نشان‌دهنده عملکرد کارآمد فوم در کنترل تحرک پذیری در مقایسه با تزریق گاز در یک محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای است.

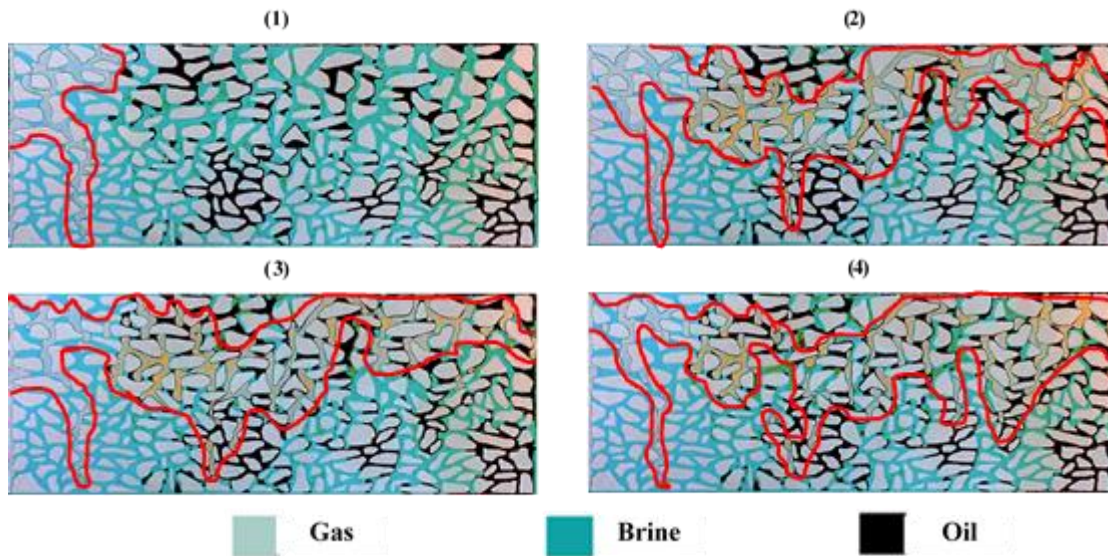


شکل ۴- تصاویر میکرومدل در طول تزریق فوم در شرایط عدم حضور نفت در زمانهای مختلف به ترتیب از شکل ۱ تا ۴: زمان ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۲۰۰، ۱۵۶۰ ثانیه.

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.

### ۳-۳- تزریق گاز در شرایط نفت باقیمانده

پس از تزریق آب و رسیدن به اشباع نفت باقی مانده، 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 باقی مانده منجر به عملکرد ضعیفتری می شود و کانال زنی سریعتری رخ می دهد (۴۸۰ ثانیه) و گسترش جبهه گاز کمتر از شرایط تزریق گاز در آبخوان است. پس از کانال زنی، 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 ویژگی های 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 عملاً تمایلی به عبور از مناطق با تراوایی کم را نداشته است.

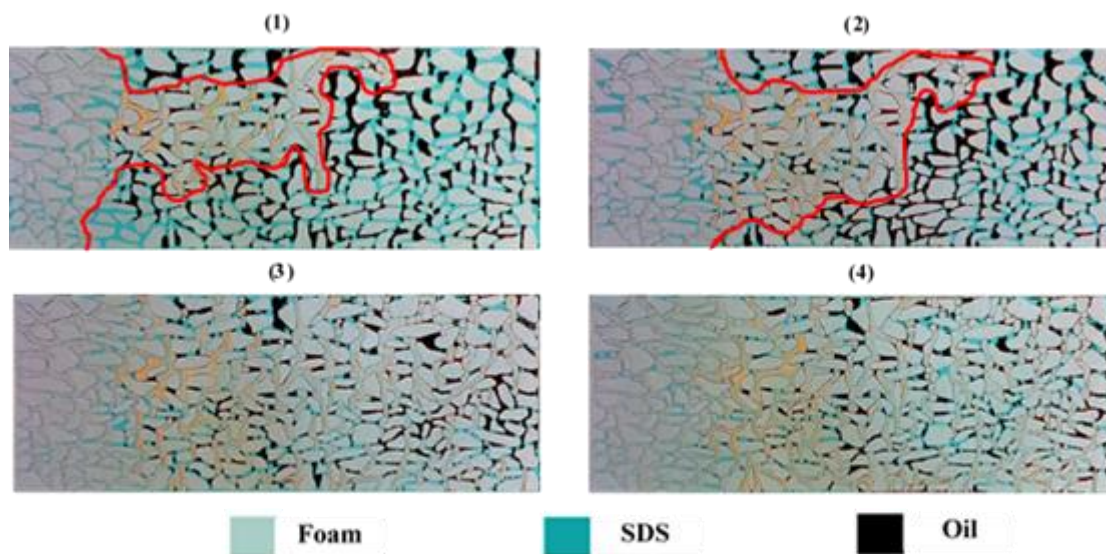


شکل ۵- تصاویر میکرومدل در طول تزریق گاز در شرایط نفت باقی مانده در زمانهای مختلف به ترتیب از شکل ۱ تا ۴: زمان ۲۴۰، ۴۸۰، ۷۲۰، ۱۵۰۰ ثانیه.

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.

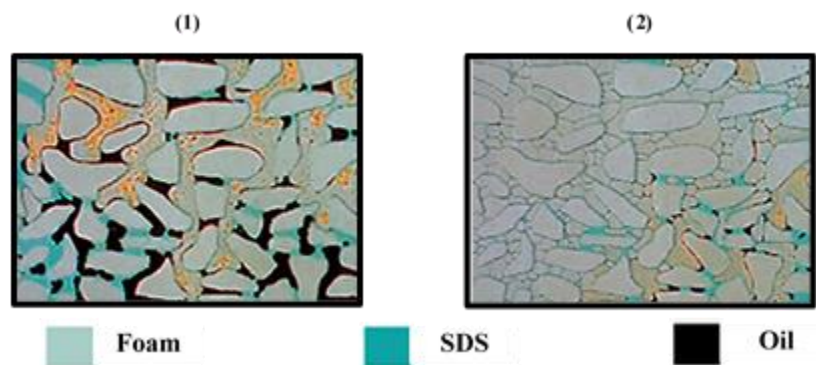
### ۳-۴- تزریق فوم در شرایط نفت باقیمانده

پس از رسیدن به شرایط اشباع نفت باقی مانده، تزریق فوم به میکرومدل انجام شد (شکل ۶). باگذشت زمان و تشکیل فوم در محیط، فوم آغاز به پیشروی در محیط متخلخل نمود (۴۸۰ ثانیه). هنگامی که جبهه پیشرونده فوم با نفت برخورد می کند، به واسطه حضور نفت تا حدی ساختار آن تخریب می شود. تحت این شرایط حضور فوم با حباب های درشت در محیط مشهود است که اصطلاحاً به فوم ضعیف اطلاق می شود. این فوم ضعیف نتوانسته است به طور کامل وارد لایه کم تراوا شود و از لایه پرتراوا میان شکنی کرده است (۴۸۰ و ۷۲۰ ثانیه). باگذشت زمان و با افزایش جابه جایی نفت و متعاقباً کاهش نفت باقی مانده در مسیر جریان فوم، پایداری و قدرت فوم (فوم با حباب ریزتر) افزایش می یابد (شکل ۷). این امر سبب افزایش مقاومت در برابر جریان فوم شده و در نتیجه، فوم به سمت نواحی کم تراوا منحرف می گردد. در ادامه، فوم قوی تشکیل شده محیط متخلخل را به طور کامل در بر می گیرد که این امر منجر به افزایش تولید ۵۰ درصدی نفت باقی مانده از لایه کم تراوا نیز می شود.



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.



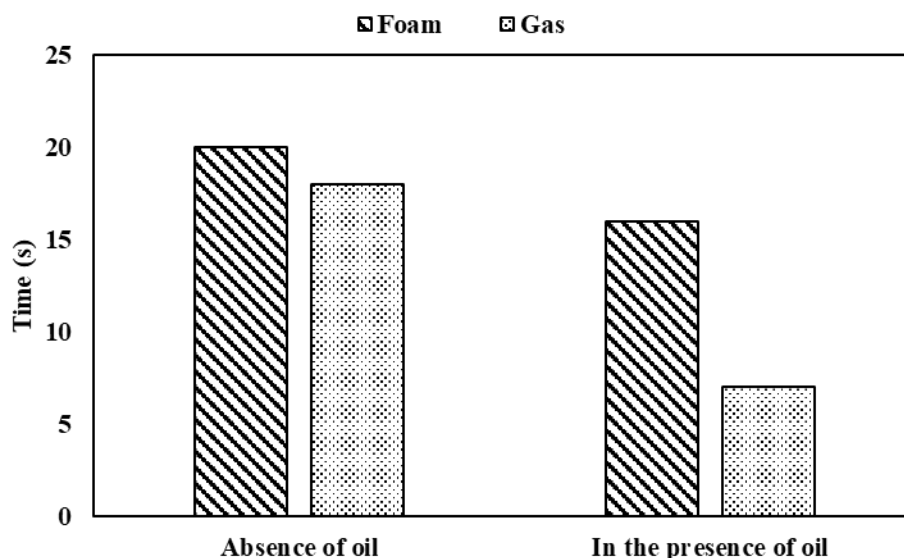
شکل ۷- تصویر میکرو مقیاس در طول تزریق فوم در شرایط اشباع نفت باقیمانده در یک مکان مشخص در دو زمان مختلف به ترتیب: زمان ۴۸۰ و ۲۸۸۰ ثانیه.

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.

## ۳-۴- مشاهدات تجربی

### ۳-۴-۱- میان شکنی گاز

در این مطالعه، زمان میان شکنی به عنوان معیاری برای ارزیابی پایداری و کارایی تزریق گاز و فوم در محیط متخلخل بررسی شده است. این زمان نشان دهنده لحظه‌ای است که گاز برای نخستین بار به خروجی میکرومدل می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، بیشترین زمان میان شکنی در شرایط آبخوان رخ داده است، در حالی که در حضور نفت باقی مانده، میان شکنی سریع‌تر اتفاق افتاده است. این موضوع نشان می‌دهد که وجود نفت باعث کاهش تأثیر فرآیند کنترل شده تزریق گاز شده و مسیرهای جریان به واسطه اختلاف تحرک سیالات تسریع می‌شوند. با این حال، نتایج نشان می‌دهد که تزریق فوم نسبت به گاز عملکرد بهتری داشته است، به‌ویژه در حضور نفت باقی مانده. در شرایط آبخوان، فوم توانسته است جبهه گاز را به شکل بهتری کنترل کند و حضور آن در هر دو لایه پرتراوا و کم‌تراوا مشهود بوده است. این امر نشان دهنده توزیع یکنواخت‌تر و کاهش کانال‌زنی گاز است که موجب تأخیر در رسیدن گاز به خروجی شده است. از سوی دیگر، در تزریق گاز، به دلیل تحرک بالای فاز گازی، کانال‌زنی در لایه‌های پرتراوا تشدید شده و در نتیجه، میان شکنی با سرعت بیشتری رخ داده است. در شرایط نفت باقی مانده، اثر نامطلوب تحرک گاز بر افزایش سرعت میان شکنی مشهود است، به طوری که گاز تمایل بیشتری به حرکت از میان لایه‌های پرتراوا داشته و جبهه گاز به سرعت گسترش یافته است. این امر منجر به کاهش کارایی تزریق گاز در جابه‌جایی نفت و افزایش هدررفت آن شده است. اما در این شرایط، فوم توانسته است پایداری جبهه گاز را افزایش داده و از میان شکنی سریع جلوگیری کند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که فوم به واسطه افزایش ویسکوزیته ظاهری و کاهش تحرک گاز، پدیده کانال‌زنی را مهار کرده و منجر به بهبود راندمان جابه‌جایی نفت در محیط متخلخل شده است.

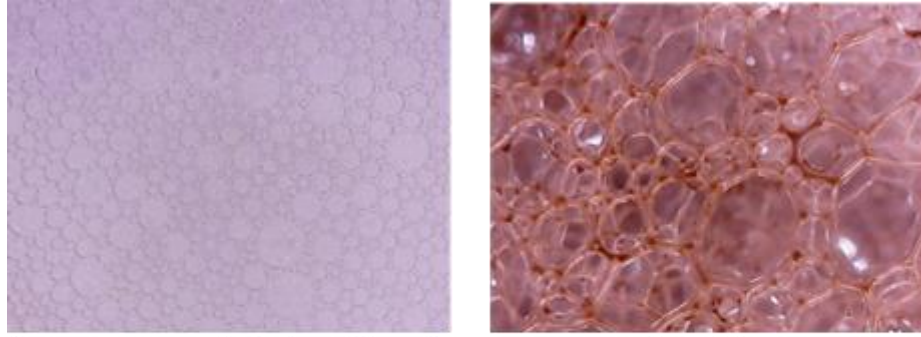


شکل ۸- زمان میان شکنی در سناریوهای مختلف تزریق گاز و فوم.

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

### ۳-۴-۲- تاثیر حضور نفت بر روی رفتار جریان فوم

توانایی فوم برای پایدار ماندن 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 انجام شده 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 آنها و کاهش نیمه‌عمر فوم می‌شود [۱۹]. جهت توصیف بهتر اثر نفت بر روی فوم، مقایسه‌ای از تست بالک فوم در حضور و عدم حضور نفت در شکل ۹ نشان داده شده است. 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 نشان دهنده فوم ضعیف‌تری هستند. با این حال، در عدم حضور نفت، حباب‌های فوم همگن‌تری دیده می‌شود.

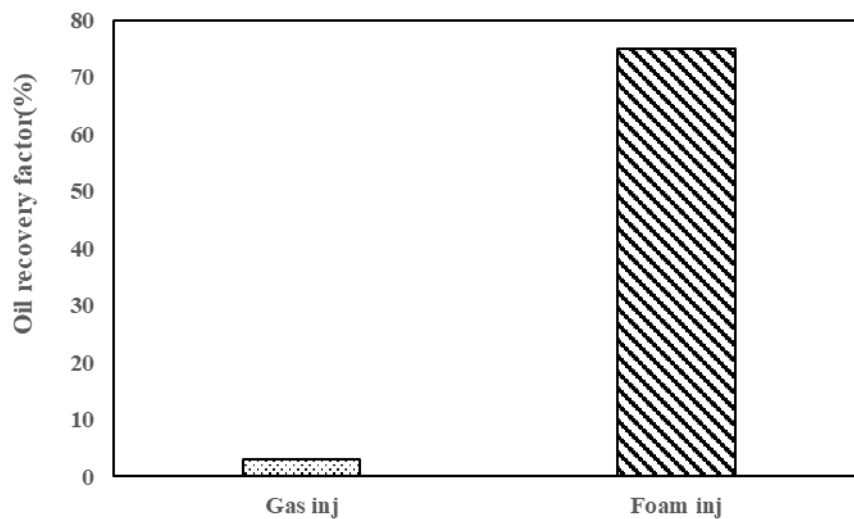


شکل ۹- تاثیر حضور نفت بر روی فوم و اندازه حبابهای آن .

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

### ۳-۴-۳- پتانسیل فوم به عنوان عامل ازدیاد برداشت نفت

باتوجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات، 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 می‌دهند 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 عملکرد ناکارآمد تزریق گاز برای افزایش بازیافت نفت در مخازن ناهمگن با اختلافات تراوایی است.

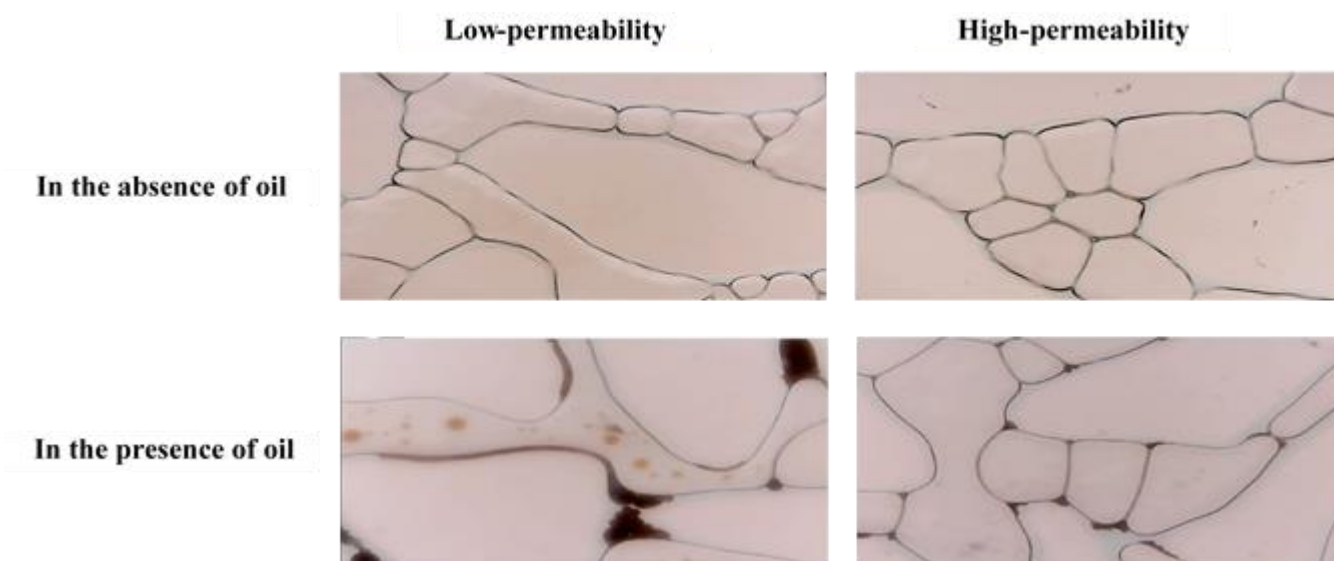


شکل ۱۰- مقایسه ضریب بازیافت نفت در تزریق گاز و فوم.

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

### ۳-۴-۴- بررسی میکروسکوپیک حباب های فوم در میکرومدل

مطابق نتایج حاصله از آنالیز تصاویر فوم در مقیاس حفرات، فوم موجود در لایه‌ی پرتراوا از منظر بافت و ساختار، تفاوت قابل‌ملاحظه‌ای با فوم موجود در لایه‌ی کم‌تراوا دارد. تصاویر میکروسکوپی ارائه شده در این بخش پس از دستیابی سیستم رفتار جریان‌ی فوم در شرایط پایا<sup>۵</sup> به دست آمده‌اند. شکل ۱۱ مقایسه‌ای از حباب‌های فوم شکل‌گرفته در لایه‌های پرتراوا و کم‌تراوا را در حضور و عدم حضور نفت نشان می‌دهد. مطابق تصاویر حاصله می‌توان دریافت که با کاهش نفوذپذیری محیط و متعاقباً افزایش اثر فشار مویینگی، ساختار فوم شکننده‌تر شده و در نتیجه، حباب‌ها با ابعاد بزرگ‌تری ایجاد شده و نهایتاً بافت فوم درشت‌تر<sup>۶</sup> می‌گردد. این رخداد در حضور فاز نفتی در محیط بیشتر نمود خواهد داشت به‌نحوی که در هر دو محیط پرتراوا و کم‌تراوا، بافت فوم و اندازه حباب‌های آن دستخوش تغییر شده و حباب‌های بزرگ‌تری در شرایط پایا حاصل شده‌اند. باین‌حال نکته حائز اهمیت این است که فوم توانسته در حضور فاز نفتی کماکان عملکرد خود را حفظ کرده و حباب‌های گاز را به‌صورت منفصل در محیط ایجاد نماید که همین امر در کنترل تحرک‌پذیری فازی گازی و متعاقباً جابه‌جایی نفت در محیط تأثیرگذار است.



شکل ۱۱- مقایسه فوم تشکیل شده در لایه‌های پرتراوا و کم‌تراوا در شرایط حضور و عدم حضور نفت

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

<sup>5</sup> steady-state

<sup>6</sup> Coarse foam texture

## ۴- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بررسی عملکرد پتانسیل 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 دو لایه‌ای ناهمگن با اختلاف تراوایی که بخش‌های پر تراوا و کم‌تراوا آن با هم در ارتباط سیالی هستند، استفاده شد تا اثر جریان متقاطع بررسی گردد. آزمایش‌ها در محیط متخلخل تحت شرایط عدم حضور نفت (مشابه شرایط آبخوان) و در حضور نفت باقی‌مانده به واسطه تزریق آب انجام شدند. بر اساس مشاهدات و آزمایش‌های انجام‌شده، مشخص شد که فوم تشکیل‌شده در محیط متخلخل در حضور جریان متقاطع، توانایی انحراف سیال از بخش‌های پر تراوا به کم‌تراوا را در هر دو شرایط دارد. نتایج اصلی پژوهش به شرح زیر است:

- مطابق نتایج حاصله مقایسه بین تزریق گاز و فوم در هر دو شرایط حضور و عدم حضور نفت نشان داد که فوم به‌خوبی توانست انحراف سیال به سمت مناطق با تراوایی کمتر را ایجاد کند که این امر منجر به افزایش بازده جاروبی در این لایه شد.
- تزریق گاز منجر به ایجاد کانال در لایه پر تراوا و هدررفت گاز تزریقی و متعاقباً تسریع در زمان میان شکنی شد. مطابق نتایج حاصله رخداد این مسئله در شرایط نفت باقی‌مانده شدیدتر بود.
- تزریق فوم نسبت به تزریق گاز، عملکرد بهتری در جهت افزایش بازیافت نفت باقی‌مانده داشت که این موضوع نقش مهمی را در ارتقای بازیافت نفت از بخش کم‌تراوا میکرومدل ناهمگن لایه‌ای ایفا نمود.
- مطابق نتایج حاصله، 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 نموده به‌طوری‌که در پایان تزریق، کل محیط اعم از لایه کم‌تراوا و پر تراوا توسط فوم دربرگرفته شد که این امر منجر به ارتقای تولید نفت باقیمانده در محیط متخلخل ناهمگن خصوصاً در لایه کم‌تراوا شد.

## ۵-مراجع

1. Enick, R. M., Olsen, D., Ammer, J., & Schuller, W. (2012, April). Mobility and conformance control for CO<sub>2</sub> 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 (Vol. 1, p. 1). Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers.
3. Han, J., Lee, M., Lee, W., Lee, Y., & Sung, W. (2016). Effect of gravity segregation on CO<sub>2</sub> sequestration and oil production during CO<sub>2</sub> flooding. Applied Energy, 161, 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.021>

- 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>
  8. Sanders, A. W., Jones, R. M., Linroth, M., & Nguyen, Q. P. (2012, October). Implementation of a CO<sub>2</sub> 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., Kovsky, A. R., & Tchelep, 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>
  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 CO<sub>2</sub> in megaporous saline aquifers using nanoparticle-stabilized CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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)