

# رفتار جریان‌ی فوم جهت انحراف سیال در یک محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای: مطالعه آزمایشگاهی در مقیاس میکرو

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

۱- دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- شرکت مهندسی و توسعه نفت، تهران، ایران

× مسئول مکاتبات  
simjoo@sut.ac.ir

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

1- Faculty of Petroleum and Gas Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Petroleum Engineering and Development Company, Tehran, Iran

×Correspondence Officer

## چکیده

یکی از چالش‌های مهم در مطالعات ازدیاد برداشت نفت، کنترل و انحراف مسیر سیال تزریقی به سمت مناطق هدفی است که نفت باقیمانده بیشتری را دارند. یکی از روش‌های مناسب برای این کار، استفاده از فوم است که می‌تواند سبب ارتقای عملکرد جریان سیال تزریقی شود. با این حال جهت بهینه کردن عملکرد فوم لازم است که رفتار آن در مقیاس حفرات بررسی شود تا مکانیسم‌های دخیل در فرایند انحراف سیال تبیین شوند. در این راستا الگویی از محیط متخلخل طراحی شد که شامل دو لایه با تراوایی مختلف و با شرایط وجود ارتباط سیالی بین لایه‌ها بود. در این مطالعه از عامل فوم‌ساز سدیم‌دودسیل‌سولفات و شرایط شوری ۳۵۰۰ ppm کلرید سدیم استفاده شد. در انجام تست‌ها، ابتدا میکرومدل اشباع از نفت تحت تزریق آب قرار گرفت، سپس عملکرد فوم در قالب تزریق هم‌زمان گاز و عامل فوم‌ساز بررسی شد. نتایج نشان داد که در طول تزریق گاز بواسطه تحرک پذیری بالای سیال تزریقی و عدم ایجاد افت فشار اضافی جهت انحراف سیال، تولید نفت عملاً از لایه پرتراوا صورت گرفته و لایه کم‌تراوا مشارکت پایینی در تولید نفت داشت. اما فوم کردن گاز تزریقی سبب افزایش ویسکوزیته فاز گازی و بهبود بازده جارویی در سیستم دو لایه ناهمگن شد، به گونه‌ای که انحراف سیال تزریقی از لایه پرتراوا به کم‌تراوا اتفاق افتاد. مطابق نتایج حاصله، انحراف سیال توسط فوم منجر به افزایش تولید نفت باقیمانده از لایه کم‌تراوا شده و بازده تولید را از ۹ درصد به ۸۵ درصد افزایش داد. اثربخشی فوم در محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای و متعاقباً افزایش تولید نفت باقیمانده در قالب رخدادهای جریان متقاطع

ویسکوز، انحراف سیال تزریقی از نواحی پرتراوا به کم تراوا و نیز ارتقای عملکرد جبهه جابه‌جایی گاز توصیف شدند. نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر پتانسیل مطلوب فوم به‌عنوان یک عامل انحراف سیال جهت کنترل تحرک‌پذیری سیال تزریقی در یک سیستم ناهمگن لایه‌ای می‌باشد.

کلمات کلیدی: فوم، میکرومدل، محیط متخلخل لایه‌ای، انحراف سیال، کنترل تحرک‌پذیری

## **Foam flow behavior for fluid diversion in heterogeneous, layered porous medium: Microscale experimental study**

One of the significant challenges in enhanced oil recovery studies is controlling and diverting the path of injected fluid towards target zones containing more remaining oil. One of the promising methods for fluid diversion is using foam to increase the performance of injected flow behavior. However, to achieve such a performance, it is necessary to investigate the foam flow behavior at the pore scale to elucidate the governing mechanisms involved in the diversion process. To this end, a porous medium pattern was designed, consisting of dual-layer with different permeabilities and cross flow between them. To conduct experiments, first the oil-saturated micro-model was flooded by brine to reach its residual oil saturation condition. Subsequently, foam performance was examined in the form of simultaneous gas and foaming agent injection. In this study, sodium dodecyl sulfate was used as the foaming agent at 35000 ppm of NaCl brine. Results showed that in gas injection, due to very high gas mobility and thus no enough pressure gradient for liquid diversion, oil recovery was only obtained from high permeability layer with almost no contribution from low permeability layer. However, foaming the injected gas improved gas apparent viscosity and thus improving in the heterogeneous dual-layer system in a way that diversion of the injected fluid from the high permeability to low permeability layer occurred. Accordingly, fluid diversion by foam led to an increase in residual oil production from the low permeability layer, increasing the production efficiency from 9% to 85%. The effectiveness of foam injection in a heterogeneous, layered porous media and subsequently increasing residual oil production could be described in the light of viscous cross-flow, diverting the injected fluid from high to low permeability regions, and also enhancing the performance of gas displacement front. Results of this study indicate the promising potential of foam as a viable fluid diversion agent for controlling the mobility of injected fluid in a heterogeneous, layered system.

**Keywords:** Foam, Micromodel, Layered porous medium, Fluid diversion, Mobility control

## ۱- مقدمه

یکی از روش‌های متداول جهت افزایش تولید نفت از مخازن، تزریق سیالات گاز پایه به سازندهای زیرزمینی جهت استخراج نفت موجود در منافذ می‌باشد [۱-۵]. دی اکسید کربن، نیتروژن و گازهای هیدروکربنی (عمدتاً متان) به طور معمول در روشهای ازدیاد برداشت گاز پایه مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶-۹]. مزیت عمده روشهای مبتنی بر تزریق گاز، جابه‌جایی میکروسکوپی بهتر آن در مقایسه با تزریق آب است که می‌تواند به اشباع نفت باقیمانده کمتر در منافذ سنگ منجر می‌شود [۲]. با این حال، چالش اصلی روشهای مبتنی بر تزریق گاز راندمان جابه‌جایی حجمی ضعیف تر آنها است که در نتیجه آن گاز با بخش زیادی از نفت تماس پیدا نکرده و متعاقباً میزان تولید نفت کمتری حاصل خواهد شد [۱۰، ۱۱]. این اتفاق به دلیل تشکیل کانال جریانی سیال در لایه‌های تراوایی بالا، انگشتی شدن و اختلاف چگالی بالا بین گاز و نفت ایجاد می‌شود [۱۲-۱۵].

یکی از روش‌های پیشنهادی برای ارتقای عملکرد روش‌های تزریق گاز پایه و متعاقباً ارتقای بازده جاروبی و تولید نفت باقیمانده، کاهش تحرک پذیری گاز تزریقی می‌باشد. این رخداد از طریق فوم کردن گاز تزریقی قابل حصول است. همچنین، تزریق فوم می‌تواند برای بهبود تأثیرات جریان متقاطع ویسکوز در محیط متخلخل لایه‌ای با اهداف انحراف جریان سیال نیز به کارگیری شود [۱۶، ۱۷]. با این حال جهت استفاده کامل از پتانسیل مطلوب فوم در فرایندهای تولید نفت و انحراف سیال، بررسی رفتار جریانی فوم و مکانیسم‌های موثر بر آن در سطح حفرات از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، استفاده از سیستم‌های بصری مبتنی بر میکرومدل می‌تواند دید مکانیسمی با ارزشی در مقیاس حفرات محیط متخلخل جهت توصیف رفتار جریانی فوم ارائه نماید که یکی از اهداف این مطالعه نیز می‌باشد.

در خصوص بررسی رفتار جریانی فوم برای مقاصد انحراف سیال مطالعات مختلفی انجام گرفته است. در مطالعه انجام شده توسط تامسون و همکاران، آزمایشهای مختلفی باهدف بررسی عملکرد فوم تزریقی برای مقاصد انحراف سیال در محیط متخلخل ناهمگن انجام گرفت. نتایج بیانگر تأثیر مثبت فوم در انحراف سیال تزریقی به سمت بخشهای کم تراوا داشت. آنها همچنین تأثیر کیفیت فوم تزریقی را نیز بررسی کردند که مطابق نتایج حاصله فوم باکیفیت تزریقی بالا (تا حدود ۸۰ درصد) تأثیر بهتری برای انحراف سیال ایجاد نمود [۱۸]. مطالعه آزمایشگاهی انجام شده توسط هندی و همکاران نشان داد که نحوه تزریق و تشکیل فوم در محیط متخلخل اهمیت به سزایی دارد. به طوری که فوم از پیش ساخته شده و فوم تزریق هم‌زمان قابلیت پوشش‌دادن به محیط متخلخل را به طرز کامل‌تری دارند. در مقابل، فوم تزریق متناوب که از محلول فوم‌ساز و گاز تشکیل می‌شود، توانایی کامل در پوشش‌دادن محیط متخلخل را ندارد و تنها به طریق جزئی‌تری قادر به پوشش‌دادن بخش‌های محیط متخلخل است [۱۹]. یک محیط متخلخل لایه‌ای بدون نفت توسط ما و همکاران جهت مقایسه راندمان روبش تزریق گاز و فوم مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایشات آنها در تزریق فوم منجر به انسداد جریان در ناحیه پرتراوا و انحراف جریان سیال به سمت لایه کم تراوا شد [۲۰]. نمونه مطالعه مشابهی توسط کانن و همکاران جهت بررسی برداشت نفت توسط تزریق آب، گاز، متناوب آب-گاز و فوم مورد استفاده قرار گرفته است. در این مطالعه فوم تنها عامل تزریقی بود که توانست فاز نفت قرار گرفته در ناحیه‌ای با تراوایی پایین را جابجا کند. آنها ادعا کردند که فوم باعث یک گرادیان فشار موضعی می‌شود که بواسطه آن هدایت جریان سیال تزریقی به سمت ناحیه با تراوایی پایین ایجاد خواهد شد [۲۱]. چن و همکاران به بررسی تأثیر نفت بر روی عملکرد جریانی فوم پرداختند، آنها تأثیر نفت خام را بر روی پایداری فوم مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که تحت شرایط مطالعه انجام شده، نفت موجود در محیط متخلخل می‌تواند تأثیر منفی بر روی عملکرد فوم داشته باشد [۲۲]. طالبیان و همکاران اثر تزریق گاز و فوم را در مغزه‌ای که با نفت باقیمانده اشباع شده بود، بررسی کردند. یافته‌های این تحقیق نشان داد که تزریق فوم منجر به افزایش بازیافت نفت می‌شود [۲۳]. یکین و همکاران با استفاده از مطالعات روی میکرومدل

ها اذعان کرده‌اند که مکانیسم‌های غالب برای جریان فوم و تحرک نفت باقیمانده در سیستم‌های آب‌دوست به ترتیب تقسیم لاملو و امولسیون‌سازی نفت می‌باشد [۲۴]. مطابق مجموع نتایج حاصله از مطالعات گذشته می‌توان دریافت که بکارگیری روشهای تزریق مبتنی بر گاز در محیط‌های متخلخل لایه ای ناهمگن عملکرد مناسبی ندارد و عملاً سیال تزریقی امکان تماس مناسب با لایه کم تراوا را نخواهد داشت. از سویی دیگر، اکثر مطالعات انجام شده بر روی فوم (اعم از تزریق در میکرومدل و یا در مغزه) در شرایط یک سیستم تک‌لایه و یا در یک نمونه سنگ با تراوایی مشخص بوده است. با این حال مطالعات محدودی عملکرد فوم را در یک سیستم لایه ای بررسی کرده‌اند که در آن جریان سیال تزریقی بتواند براساس میزان تراوایی لایه ها، در محیط متخلخل تقسیم شود. مطالعه پیشرو با احصای محدودیت مطالعات قبلی و با تمرکز بر روی کارکرد فوم برای اهداف انحراف سیال، به بررسی رفتار جریان فوم در یک سیستم دو لایه ناهمگن با امکان ایجاد شرایط جریان متقاطع (Cross-flow) بین دولایه پرداخته است. در واقع در سیستم میکرومدل طراحی شده هر لایه دارای توزیع مختلفی از حفرات است (لایه با تراوایی بالا و لایه با تراوایی پایین) که بین دولایه امکان تبادل سیال نیز وجود دارد. بر این اساس تلاش شده است که کارکرد فوم جهت انحراف سیال تزریقی از لایه پر تراوا به کم‌تراوا مورد بررسی مکانیسمی قرار گیرد. بدین منظور، نتایج آزمایش های تزریق فوم و گاز در حضور نفت باقی‌مانده با هم مقایسه شده‌اند. سپس نتایج میکروسکوپی جریان سیال از طریق آنالیز تصاویر میکرومدل و مکانیسم‌های تاثیرگذار بر انحراف سیال توسط فوم بررسی شدند.

## ۲- مواد و روش ها

### ۲-۱- طراحی و ساخت میکرومدل

یک نمونه میکرومدل دولایه ناهمگن با اختلاف تراوایی دو برابری که در ارتباط سیالی با یکدیگر هستند جهت بررسی مکانیسم‌های فعال در تزریق فوم و گاز طراحی شده است. در شکل ۱ بخش ۱ و ۲ به ترتیب برای تزریق و تولید سیالات مورد استفاده قرار گرفتند. میکرومدل طراحی شده در این مطالعه شامل یک سیستم دو لایه‌ای ناهمگن با ابعاد ۸ سانتی‌متر در ۳ سانتی‌متر با عمق ۰/۰۲ سانتی‌متر و تخلخل ۴۸٪ بود. همچنین، دو صفحه شیشه‌ای با ضخامت ۴ میلی‌متر، میکرومدل شیشه‌ای را تشکیل می‌دهند. برای تعیین تخلخل میکرومدل از تکنیک آنالیز تصویر استفاده شد. همچنین برای اندازه‌گیری تراوایی، از روش متداول تزریق سیال تک‌فازی و سپس اندازه‌گیری اختلاف فشار با توجه به تغییر در دبی تزریقی استفاده گردید. در ادامه، معادله دارسی برای تعیین تراوایی میکرومدل به کار گرفته شد.

جهت ساخت میکرومدل، ابتدا فرایند حکاکی الگوی طراحی شده روی سطح یکی از صفحه‌های شیشه‌ای با یک دستگاه لیزر پیش از فیوژن انجام گرفت. سپس نقاط مشخص شده بخش ۱ و ۲ در شکل ۱ جهت ایجاد جریان در میکرومدل مته‌کاری شده‌اند. در نهایت، محیط متخلخل با قراردادن شیشه‌های آماده شده در کوره و گرمایش تا ۷۱۰ درجه سانتی‌گراد آماده شد. سپس شیشه‌های گداخته شده در یک دوره ۲۴ ساعته خنک‌سازی شده‌اند [۲۵، ۲۶].

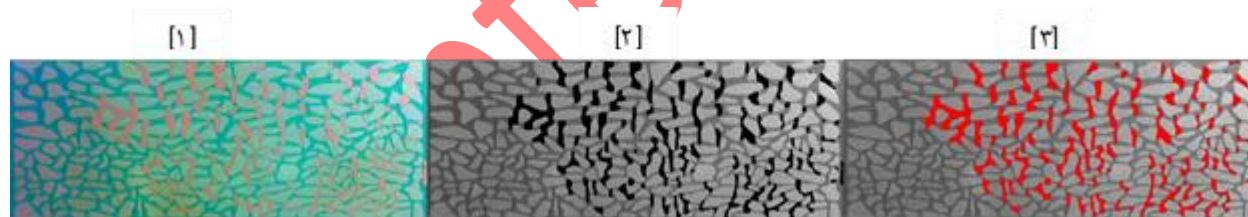


شکل ۱- شماتیک الگوی میکرومدل طراحی شده در این مطالعه

## ۲-۲- مواد و فرایند آزمایش

محلول فوم ساز استفاده شده در این مطالعه شامل سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات<sup>۱</sup> با غلظت ۰/۳۳ درصد وزنی بود که در آب با شوری ۳۵۰۰ ppm سدیم کلرید ساخته شد. متیلن بلو<sup>۲</sup> و سودان رد<sup>۳</sup> برای رنگ کردن محلول آب نمک و نفت سفید جهت سهولت در اخذ تصاویر میکرومدل مورد استفاده قرار گرفتند. آزمایش‌های اولیه از جمله اندازه‌گیری کشش سطحی برای اطمینان از عدم تأثیر عوامل رنگ‌دهنده بر رفتار عامل فوم ساز انجام شد.

فرایند تزریق شامل دو پمپ سرنگی جهت تزریق سیال، دوربین دیجیتال، منبع نور می‌باشد. برای آغاز آزمایشات، پیش از تزریق هر گونه سیال به میکرومدل، سیستم ابتدا با تولوئن و آب شسته شده و برای ۲۴ ساعت در آن خشک شد. سپس جهت اشباع میکرومدل، محلول آب نمک آبی رنگ به میکرومدل تزریق شد تا زمانی که محیط متخلخل کاملاً از آب اشباع شود. سپس نفت قرمز با دبی ۰/۲ میلی‌لیتر بر دقیقه به میکرومدل تزریق شد. لازم به ذکر است که در تمام آزمایش‌ها، قسمت ابتدایی ناحیه ورودی میکرومدل فاقد حضور نفت می‌باشد و این ناحیه به عنوان بخش ایجادکننده فوم در محیط متخلخل (In-situ foam chamber) در نظر گرفته شده است. در ادامه سناریوهای تزریق مختلفی از قبیل تزریق آب، گاز و فوم در محیط متخلخل انجام گرفت. در خصوص آزمایش‌های تزریق هم‌زمان گاز و عامل فوم ساز، یک قطعه T شکل جهت اختلاط دوفاز تزریقی به میکرومدل استفاده شد. جهت رصد نحوه حرکت جبهه جابه‌جایی سیالات در میکرومدل، یک دوربین دیجیتال رفتار جریان سیال را در طول آزمایش ثبت نمود. سپس تصاویر حاصله جهت توصیف عملکرد فوم در انحراف سیال و نیز محاسبه میزان نفت تولیدی از طریق نرم‌افزارهای آنالیز تصویر مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۲). در تحلیل نتایج، ضریب بازیافت نفت هر لایه به صورت مجزا از طریق روش‌های آنالیز تصویر محاسبه شد.



شکل ۲- تجزیه و تحلیل تصویر تزریق آب در میکرومدل با استفاده از نرم افزار پردازش تصویر: [۱] نفت باقیمانده در محیط متخلخل، [۲] باینری کردن تصویر، [۳] محاسبه نفت باقیمانده

## ۲-۳- طراحی آزمایش

در این مطالعه شرایط انجام آزمایش‌های میکرومدل در شرایط فشار و دمای محیط و به صورت یک سیستم جریان افقی بوده است. سه سناریو تزریق تحت عنوان تزریق آب، تزریق گاز و تزریق فوم انجام گرفت. مقایسه نتایج تست‌ها، شرایطی را جهت بررسی عملکرد فوم جهت کنترل تحرک‌پذیری سیال گازی و نیز نقش جریان متقاطع در سیستم لایه‌ای جهت برداشت نفت ارائه کرده است. در این پژوهش، رفتار جریانی فوم و گاز با کیفیت و دبی تزریق ثابت مورد بررسی قرار گرفت. موارد انتخاب‌شده بر اساس نتایج مجموعه آزمایش‌های قبلی انجام شده بر روی میکرومدل حاصله بوده‌اند. به این ترتیب که دبی تزریق (در محدوده هزارم میلی‌لیتر بر دقیقه) و متعاقباً کیفیت فوم (در بازه ۷۵ درصد) به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که امکان بررسی تأثیرات توأم ناشی از نیروهای موینگی و

<sup>1</sup> SDS

<sup>2</sup> Methylene Blue

<sup>3</sup> Sudan Red

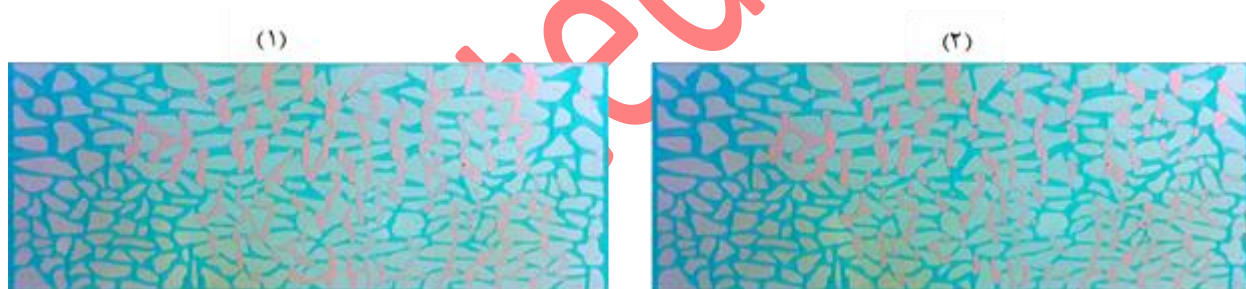
ویسکوز بر روی رفتار جریان فوم در یک سیستم لایه‌ای با رخداد جریان متقاطع فراهم گردد. در تست‌های پیشرو برای سناریوی تزریق فوم، دبی تزریق به صورت تزریق هم‌زمان گاز با دبی  $0/006$  میلی‌لیتر بر دقیقه و محلول سورفکتانت با دبی  $0/002$  میلی‌لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شد. همچنین در سناریو مربوط به گاز نیز تزریق هم‌زمان گاز و آب‌نمک (بدون حضور عامل فوم ساز) با همان دبی مشابه مرحله فوم انجام گرفت.

### ۳-نتایج

در تمام آزمایش‌های گزارش شده در این مطالعه، سمت چپ تصاویر بیانگر ناحیه ورودی سیستم و سمت راست بیانگر ناحیه خروجی است. در بخش‌های پیشرو، ابتدا، تجزیه و تحلیل کیفی ویژگی‌های جریان سیال در میکرومدل گزارش شده و سپس میزان نفت موجود در محیط متخلخل در سناریوهای مختلف با هم مقایسه می‌شوند. در انتها نیز مکانیسم‌های مشاهده شده که به نحوی بر روی عملکرد فوم بر روی انحراف جریان سیال در میکرومدل لایه‌ای تأثیر دارند بر مبنای آنالیز تصاویر میکرومدل مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

#### ۳-۱- تزریق آب در میکرومدل لایه ای حاوی نفت

تصاویر میکرومدل در طول فرایند تزریق آب در شکل ۳ نشان‌دادن شده است. میکرومدل ابتدا با نفت اشباع شد. در مرحله اولیه تزریق، آب با دبی  $0/002$  میلی‌لیتر بر دقیقه تزریق شد. این تزریق تا جایی ادامه داشت که نفتی در خروجی دیده نشود. سپس با افزایش دبی به  $0/02$  میلی‌لیتر بر دقیقه (بیانگر حالت Bump flow) مجدداً آب به میکرومدل تزریق شد تا شرایط اشباع نفت باقی‌مانده در محیط ایجاد شود.

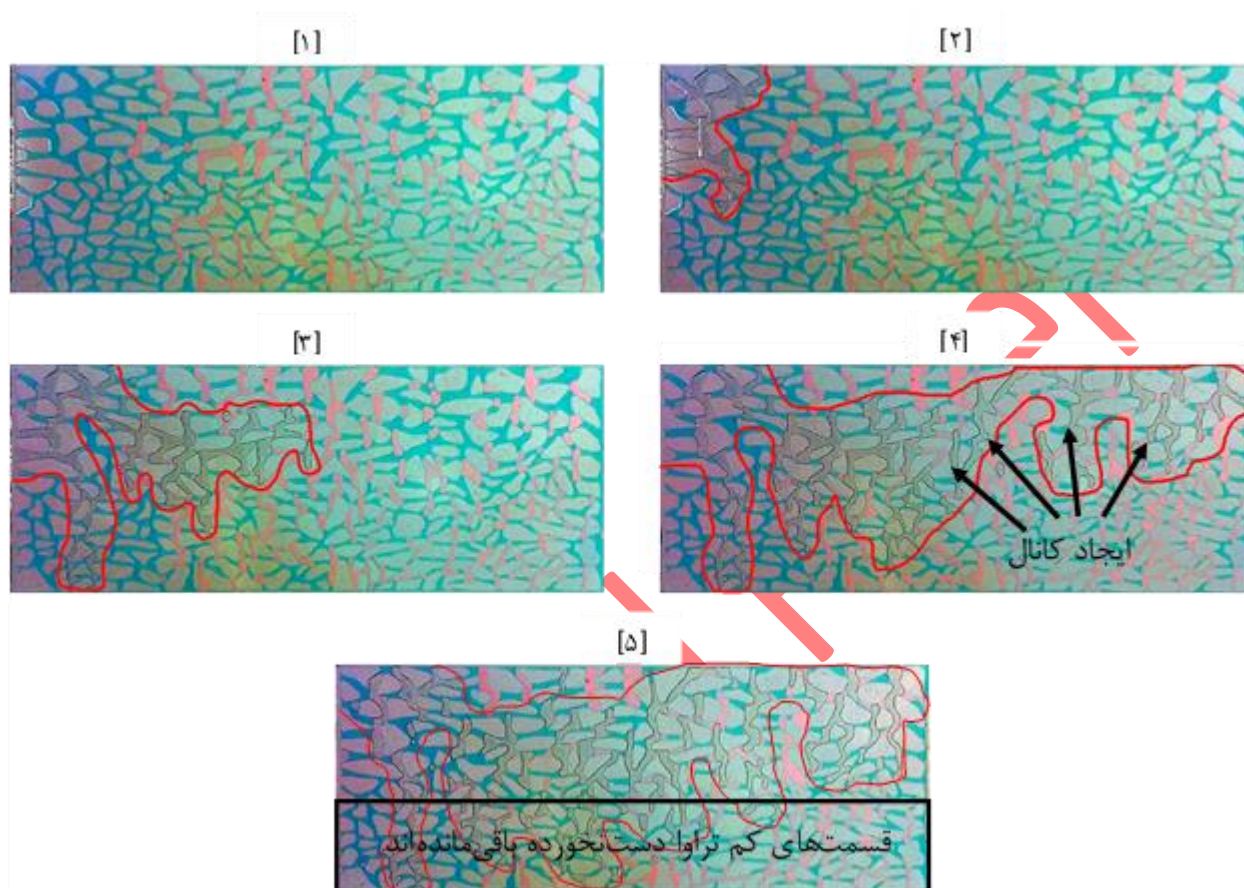


شکل ۳- تصاویر میکرومدل در طول تزریق آب با دبی: (۱)  $0/002$  میلی‌لیتر بر دقیقه، (۲)  $0/02$  میلی‌لیتر بر دقیقه

#### ۳-۲- تزریق گاز در میکرومدل لایه ای حاوی نفت باقیمانده

پس از تزریق آب و رسیدن به شرایط اشباع نفت باقی‌مانده، تزریق گاز در میکرومدل انجام شد. نتایج نشان داد که گاز توانایی حضور در نواحی با تراوایی کمتر را در ابتدا ندارد. مطابق تصاویر میکرومدل در شکل ۴، پس از تزریق  $0/06PV$  از آغاز فرایند، گاز از طریق نواحی با تراوایی بالاتر در محیط متخلخل جانمایی شده و در  $0/12PV$ ، پیشرفت خود را صرفاً در نواحی با تراوایی بالاتر ادامه می‌دهد. پس از  $0/37PV$ ، گاز از طریق کانال زدن در ناحیه پرتراوا از محیط متخلخل خارج شده و عملاً نفت باقیمانده موجود در قسمت‌های با تراوایی کمتر دست‌نخورده باقی‌مانده‌اند. در  $1/87PV$  تفاوت محسوسی در روند الگوی جریانی گاز نسبت به  $0/37PV$  در محیط متخلخل مشاهده نشد. مطابق نتایج حاصله می‌توان دریافت که تحرک فاز گازی در محیط متخلخل به نسبت نفت یا آب بسیار بالا

است. این تفاوت تحرک باعث می‌شود که گاز به علت ویسکوزیته کم‌تر به‌سرعت در مسیرهای با تراوایی بالا جابه‌جا شده و عبور نماید. تشکیل کانال‌ها و پدیده انگشتی شدن در شکل ۴ به‌وضوح قابل مشاهده است.

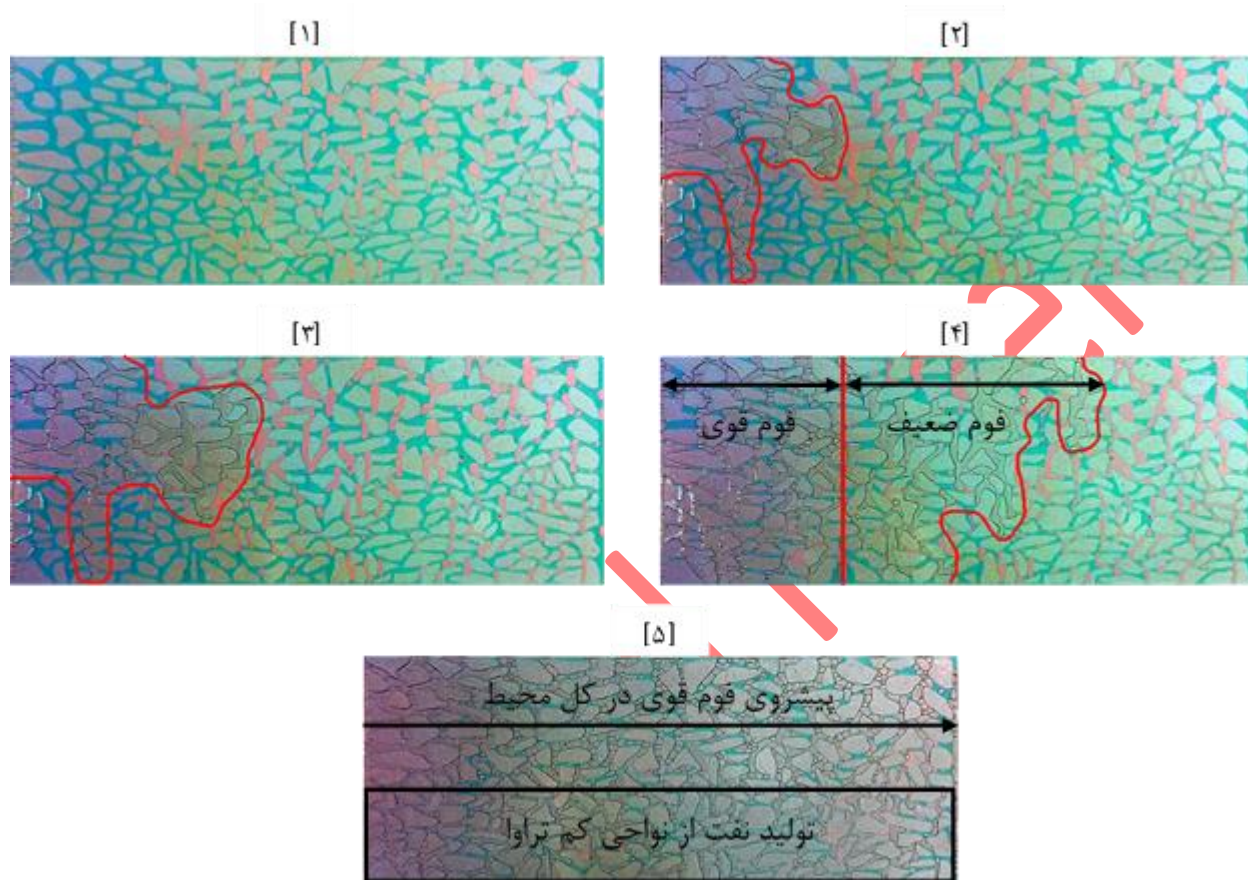


شکل ۴- تصاویر میکرومدل در طول تزریق گاز در زمانهای مختلف به ترتیب از شکل ۱ تا ۵: زمان ۰، ۰/۰۶، ۰/۱۲، ۰/۳۷، ۰/۸۷ PV

### ۳-۳- تزریق فوم در میکرومدل لایه ای حاوی نفت باقیمانده

پس از تزریق آب و رسیدن به شرایط اشباع نفت باقی‌مانده، این بار تزریق فوم در میکرومدل انجام گرفت. در مراحل ابتدایی تست، تزریق هم‌زمان محلول سورفکتنت و گاز به دلیل رخداد تخریب فیلم فوم (لاملا) توسط نفت منجر به تولید فوم قوی (فوم با حباب‌های ریز) نشد به‌گونه‌ای که در تصاویر میکرومدل (شکل ۵) مربوط به زمان‌های ۰/۰۶PV و ۰/۱۲PV، حرکت فوم ابتداً مشابه حرکت تزریق گاز در محیط است. در نتیجه به‌واسطه این رخداد شرایطی در محیط ایجاد می‌شود که به محلول سورفکتنت و گاز اجازه می‌دهد تا به‌عنوان فازهای جداگانه در محیط متخلخل جریان پیدا کنند. با این حال با گذر زمان، تولید فوم قوی در محیط متخلخل پس از جابه‌جایی بخشی از نفت باقیمانده از ناحیه ورودی محیط متخلخل آغاز می‌شود. با ادامه تزریق هم‌زمان محلول سورفکتنت و گاز و پیشرفت جبهه فوم در محیط، گاز و سورفکتنت تزریقی دیگر به‌صورت فازهای مجزا نبوده، بلکه به دلیل افزایش پایداری فوم به‌صورت حباب‌های متوالی (جریان ناپیوسته گاز) جریان خواهند داشت که این مورد در تصویر متناظر با زمان ۰/۳۷PV قابل مشاهده است. در نهایت در زمان انتهایی تست مذکور، ۱/۸۷PV، تزریق فوم عملکرد قابل‌قبولی در رخداد انحراف سیال از خود نشان داد و

توانست به خوبی وارد نواحی با تراوایی کمتر شود به گونه‌ای که کل محیط متخلخل لایه‌ای را در بر گرفت که این امر نیز منجر به جابه‌جایی نفت باقیمانده از ناحیه با تراوایی کمتر شد.

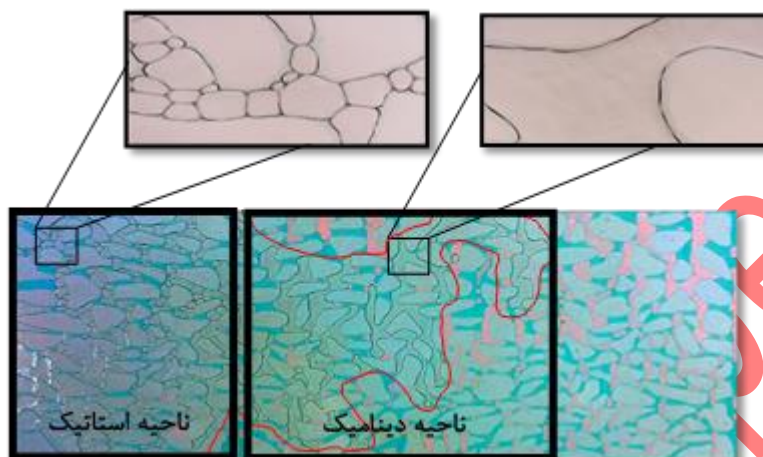


شکل ۵- تصاویر میکرومدل در طول تزریق فوم در زمانهای مختلف به ترتیب از شکل ۱ تا ۵: زمان ۰، ۰/۰۶، ۰/۱۲، ۰/۳۷، ۰/۸۷ PV

طبق مشاهدات میکرو مقیاس در شکل ۶، در حین تزریق فوم دو ناحیه قابل مشاهده است. در جبهه جلویی پیش‌رونده فوم، ناحیه‌ای تحت عنوان "ناحیه دینامیک" وجود دارد که در آن سیال تزریقی در مقایسه با نواحی دیگر تحرک پذیری بالاتری دارد. در این ناحیه، پایداری کوتاه فیلم فوم به دلیل تماس نزدیک با فاز نفت (در شرایط اشباع نفت باقیمانده اولیه) باعث ایجاد فوم ضعیف‌تر (فوم با حباب‌های درشت و پیوسته) در این ناحیه شده است. این تاثیر که منجر به کاهش قدرت فوم تشکیل شده در محیط می شود در مطالعات مختلفی بدان اشاره شده است؛ با این حال نوع عامل فوم ساز بکار گرفته شده و نحوه اندرکنش آن با فاز نفتی بر میزان قدرت فوم تشکیل شده و متعاقباً مشخصات "ناحیه دینامیک" تاثیر گذار خواهد بود؛ به طوری که ممکن است در اثر تماس فوم با فاز نفتی، فوم این ناحیه به طور کامل از بین رفته و رفتار شبیه جریان گاز داشته باشد یا حتی ممکن است که امکان حضور فوم (تا حدی) پایدار در مجاورت فاز نفتی حاصل شود. لذا به نظر می‌رسد یکی از راهکارهای کلیدی برای ارتقای عملکرد فوم در حضور فاز نفتی و به تبع آن افزایش توان جریانی آن در "ناحیه دینامیک"، انتخاب عامل فوم‌ساز مناسب باشد. این انتخاب بر روی عملکرد فوم و میزان انحراف سیال نیز تاثیرگذار خواهد بود. در مطالعه حاضر، عامل فوم‌ساز مورد استفاده، علی‌رغم وجود نفت باقیمانده (ناشی از تزریق آب)، امکان تشکیل فوم در محیط را فراهم می‌کرد. با این حال، قدرت فوم حاصله در مقایسه با شرایط بدون نفت، ضعیف‌تر

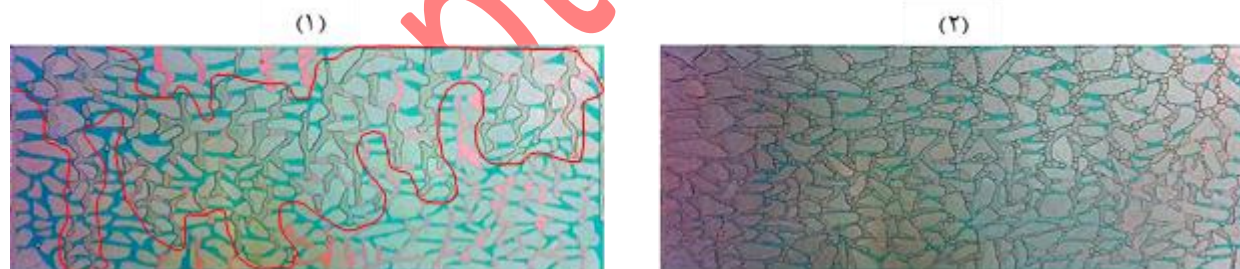


بوده است. در در خصوص نواحی پایین دست جبهه پیش‌رونده، یک ناحیه پایدار به نام "ناحیه استاتیک" قابل مشاهده است که در آن تحرک فاز گازی به دلیل حضور فوم قوی (فوم با حباب‌های ریز) به طور محسوسی کاهش داشته است. طی این رخداد، فوم نواحی با تراوایی بالاتر را اشغال نموده و باعث ایجاد انحراف سیال از ناحیه پر تراوا به ناحیه کم‌تراوا می‌شود.



شکل ۶ - تصاویر میکرومقیاس در خصوص نحوه تشکیل فوم قوی و ضعیف در محیط متخلخل

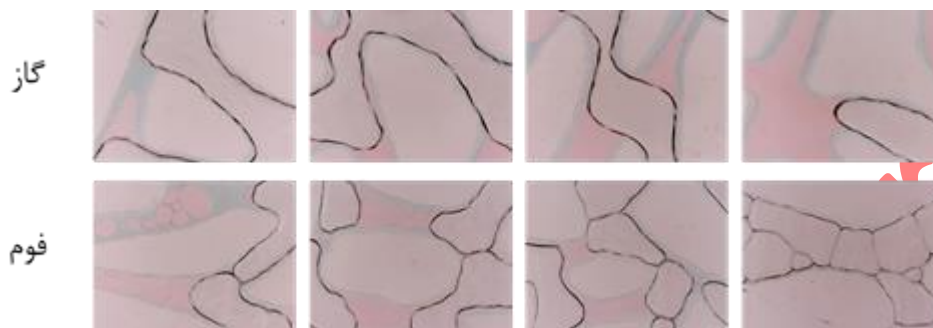
توزیع اشباع نهایی نفت باقیمانده در انتهای دو سناریو تزریق گاز و فوم در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق نتایج حاصله، فوم توانسته است هر دو لایه محیط متخلخل را به طور کامل در بر بگیرد که متعاقباً این رخداد جابجایی بیشتر نفت را به دنبال داشته است، اما جبهه گاز به صورت پراکنده و غیر پیوسته و غالباً در لایه پرتراوای محیط متخلخل قرار گرفته است که از این رو انتظار می‌رود که نفت باقیمانده بیشتری در انتهای تزریق گاز خصوصاً در بخش کم تراوای محیط متخلخل برجای مانده باشد.



شکل ۷ - توزیع اشباع نهایی نفت باقیمانده در انتهای سناریوی تزریق گاز (تصویر ۱) و سناریوی تزریق فوم (شکل تصویر ۲)

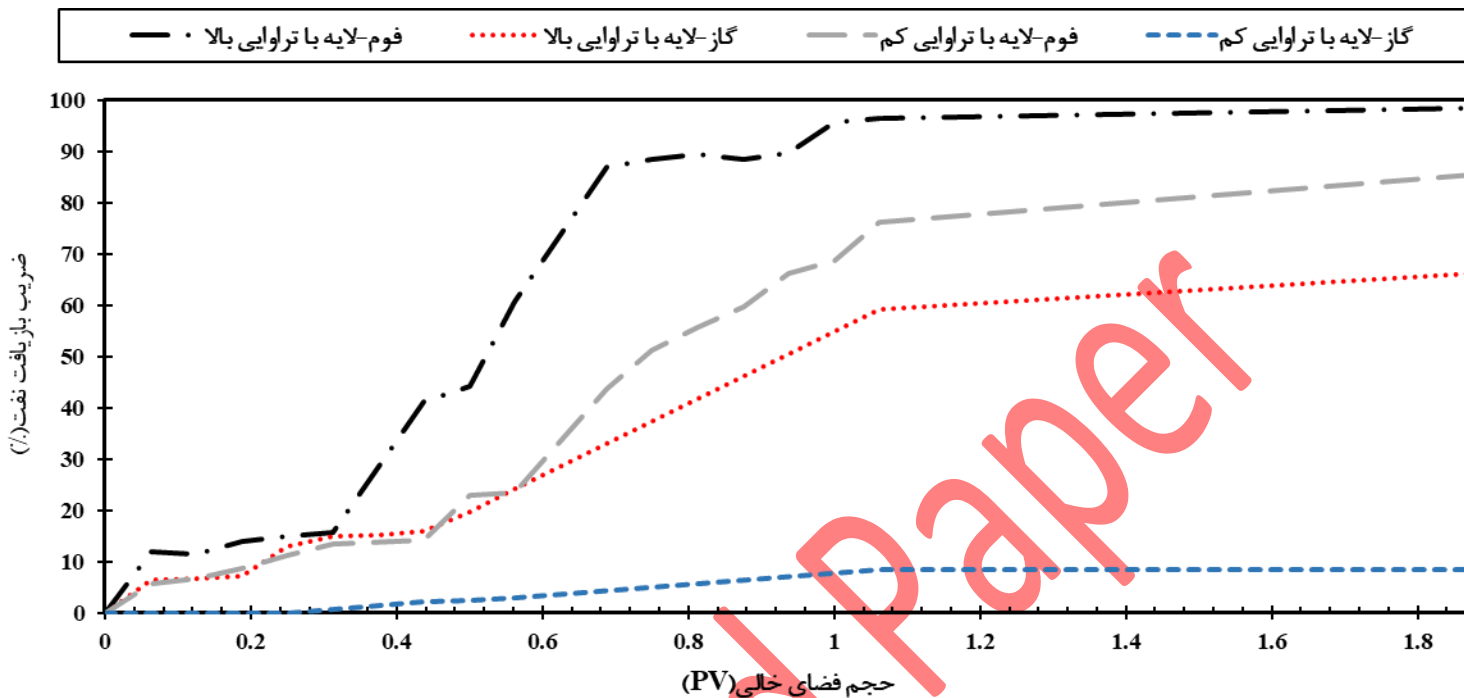
شکل ۸ نیز یکسری تصاویر میکرومقیاس در خصوص نحوه فرارگیری حبابهای گاز در فضای حفرات میکرومدل را در طول تزریق فوم و گاز نشان می‌دهد. مطابق تصاویر حاصله، بواسطه فومی شدن فاز گازی، یکسری فیلمهای مایع مابین حبابهای گاز تشکیل شده است که این امر باعث ناپیوسته شدن فاز گازی، ایجاد حبابهایی با اندازه کوچکتر و متعاقباً افزایش تعداد حبابهای گاز در محیط شده است. این رخداد سبب افزایش ویسکوزیته فاز گازی و نتیجتاً کاهش تحرک پذیری آن می‌شود؛ در حالیکه در تزریق گاز حضور حبابهای گاز با اندازه بزرگ که بعضاً چندین حفره را اشغال کرده اند، کاملاً مشهود است. لازم به ذکر است که کاهش تحرک پذیری فاز گازی در حضور فوم سبب بهبود بازده جارویی در میکرومدل لایه ای شده است (شکل ۷) شده است. از نقطه نظر انحراف سیال نیز فرارگیری حجم بیشتری از فوم در لایه با تراوایی بالا سبب شده است که مقاومت محلی در برابر جریان سیال تزریقی در این لایه

افزایش یابد؛ بنابراین سیال تزریق شده به ناحیه با تراوایی کمتر منحرف شده و متعاقباً باعث بهبود جابجایی نفت باقیمانده این فرایند در این لایه می‌شود. مشاهده بصری حاصل شده در قالب شکل های ۷ و ۸ با نتایج گزارش شده در مطالعات قبلی نیز هم‌راستا است [۲۰، ۲۷].



شکل ۸- تصاویر میکرومقیاس در خصوص نحوه توزیع و اندازه حبابهای گاز در طول تزریق گاز و تزریق فوم در حفرات محیط متخلخل

شکل ۹ عملکرد فوم در تولید نفت باقیمانده به تفکیک هر یک از لایه های سیستم میکرومدل را نشان می دهد. همچنین جهت مقایسه بهتر، نتایج حاصله از تزریق گاز نیز در این شکل نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود در لایه با تراوایی بالا، بازیافت نفت باقی مانده بواسطه تزریق گاز بعد از  $1/87$  PV به مقدار  $66/14$  درصد رسیده است. اما بواسطه تزریق فوم، بازیافت نفت در این لایه به صورت چشمگیری افزایش یافته است؛ به طوری که در گذر زمان تزریق، افزایش نرخ بازیافت نفت نسبت به حالت تزریق گاز بالاتر بوده و نهایتاً پس از  $1/87$  PV، بازیافت به مقدار حدود  $98$  درصد از نفت باقی مانده اولیه در محیط متخلخل رسیده است. با این حال عملکرد مهم فوم در لایه با تراوایی پایین بیشتر حائز توجه است به طوری که در این لایه، تزریق گاز عملاً تأثیر بسیار پایینی بر بازیافت نفت داشته است و در پایان زمان آزمایش فقط  $9$  درصد از نفت موجود در این لایه تولید شده است. اما در طول تزریق فوم به واسطه پتانسیل مطلوب فوم در انحراف سیال از لایه با تراوایی بالا به لایه با تراوایی پایین، تولید نفت از این ناحیه افزایش قابل توجهی داشته است، به گونه ای که بازیافت نفت پس از  $1/87$  PV به مقدار  $85$  درصد از نفت باقی مانده اولیه افزایش پیدا کرده است که این مقدار حتی از عملکرد گاز در لایه با تراوایی بالا نیز بیشتر بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که تزریق فوم نسبت به تزریق گاز، در هر دو لایه عملکرد بهتری از خود نشان داده است؛ هم از لحاظ نرخ بازیافت نفت و نیز مقدار نهایی بازیافت نفت باقیمانده. همچنین، فوم توانایی تولید نفت از لایه کم تراوا را دارد که این امر نشان دهنده توانایی مطلوب فوم در انحراف سیال تزریقی است. در مقابل، گاز توانایی تولید نفت از نواحی کم تراوا را ندارد و نفت به صورت قابل ملاحظه ای در این ناحیه باقی مانده است. این موضوع نشان دهنده عملکرد ناکارآمد تزریق گاز در مخازن لایه های ناهمگن با اختلاف تراوایی است.



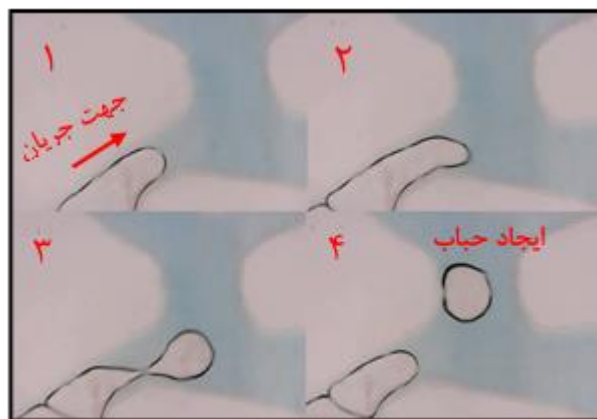
شکل ۹- نمودار ضریب بازیافت نفت برحسب زمان در طول تزریق گاز و تزریق فوم به تفکیک لایه با تراوایی بالا و تراوایی پایین در میکرومدل لایه ای

### ۴-۳- مشاهدات تجربی

#### ۳-۴-۱- مکانیسم های تولید فوم در میکرومدل لایه ای

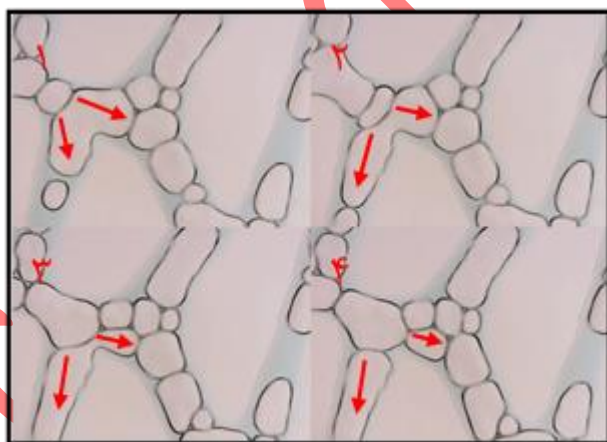
اندازه و توزیع منافذ حفرات و گلوگاه های محیط متخلخل تأثیر قابل توجهی بر تولید فوم در محیط متخلخل دارد. برای بررسی و مشخص کردن مکانیسم های تولید فوم در محیط متخلخل، مطالعات مختلفی انجام گرفته است [۲۸، ۲۹]. یکی از این مکانیسم های مهم که از آنالیز تصاویر فوم در مقیاس میکرو قابل مشاهده بود، پدیده اسنپ آف<sup>۴</sup> است که نحوه رخداد آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این رخداد یکی از مکانیسم های غالب برای تولید حباب های فوم در محیط متخلخل و نیز محتمل ترین مکانیسم تولید فوم در طول تزریق هم زمان فازهای مایع و گاز است. ایجاد این پدیده در محیط متخلخل یک فرایند مکانیکی است که می تواند به طور مکرر در طول یک جریان چند فاز در محیط متخلخل رخ دهد [۳۰]. مکانیسم اسنپ اف از یک اختلاف فشار حداقلی بین بدنه حفرات و گلوگاه متناظر با آن برای ایجاد حباب های جدید استفاده می کند. در واقع، وقتی فاز مایع به اندازه کافی در گلوگاه حفره تجمع پیدا نماید، فاز گاز در این محل ناپیوسته شده و حباب جدید شکل می گیرد. این فرایند یکی از مکانیسم های اصلی تولید فوم در محیط متخلخل است و برای رخ دادن آن لازم است که شعاع بدنه حفرات محیط متخلخل حداقل دو برابر شعاع گلوگاه ها باشد [۲۸، ۲۹].

<sup>4</sup> Snap-off



شکل ۱۰- نحوه رخداد مکانیسم اسنپ اف در محیط متخلخل جهت ایجاد فوم

یکی دیگر از رخدادهایی که در تصاویر میکرو مقیاس فوم مشاهده شد، تولید حبابهای فومی شده ناشی از تقسیم لاملا<sup>۵</sup> (فیلم مایع موجود در ساختار فوم) است. هنگامی که لاملا متحرک در مسیر جریان با یک انشعاب روبرو می‌شود، ممکن است به دو بخش تقسیم شده و در هر شاخه از مسیر، یک فوم متحرک جداگانه شکل گیرد. شکل ۱۱ نحوه رخداد این مکانیسم و متعاقباً ایجاد تعداد حبابهای بیشتر فوم در محیط را نشان می‌دهد. برای وقوع این مکانیسم، لازم است که یکسری حبابهای فوم از پیش در محیط تشکیل شده باشند. همچنین، تعداد و اندازه تقسیم حبابها به عواملی مانند نقاط انشعابی، اندازه حبابها و مشخصات محیط متخلخل وابسته است [۲۸، ۲۹].



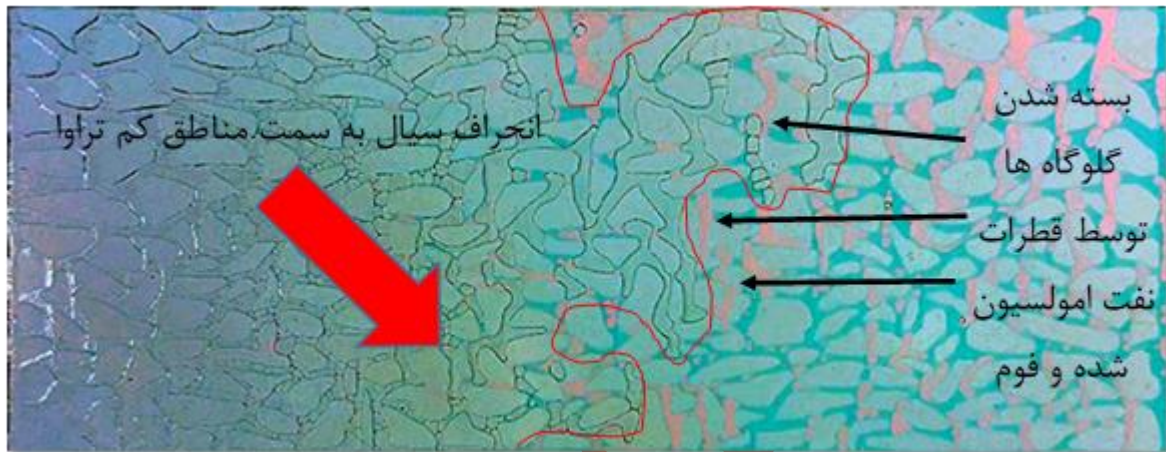
شکل ۱۱- نحوه رخداد مکانیسم تقسیم لاملا در محیط متخلخل جهت ایجاد فوم

### ۳-۴-۲- مکانیسم های تولید نفت بواسطه حضور فوم در میکرومدل لایه ای

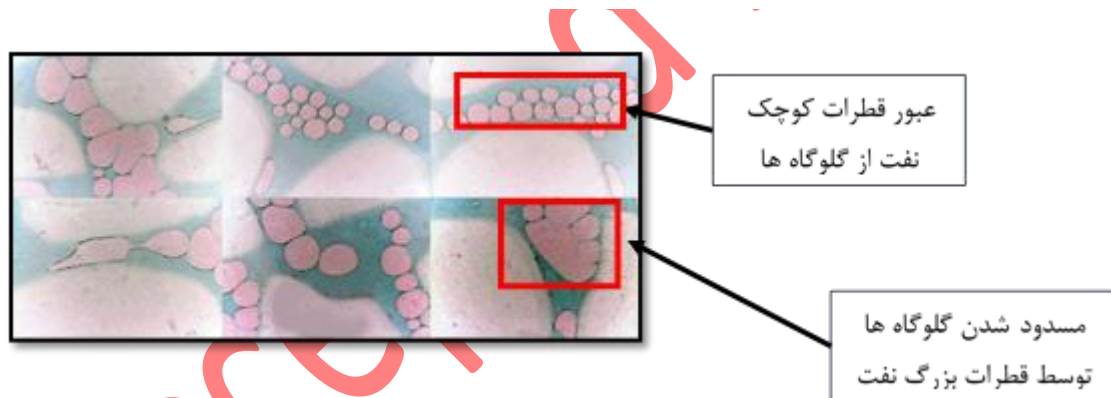
در این مطالعه، مکانیسم اصلی تولید نفت در تزریق فوم در سیستم میکرومدل ناهمگن لایه‌ای استفاده شده عمدتاً ناشی از کنترل تحرک‌پذیری سیال تزریقی در لایه با تراوایی بالا و ارتقای رخداد جریان متقاطع ویسکوز در لایه با تراوایی کمتر بود، شکل ۱۲. همچنین، ایجاد امولسیون در مقیاس حفرات محیط متخلخل ناشی از کاهش کشش سطحی نفت/آب توسط عامل فوم ساز نیز به بهبود جابه‌جایی نفت کمک کرد. مطابق شکل ۱۳، کاهش کشش سطحی باعث می‌شود که نفت به‌دام‌افتاده (با اندازه سایز بزرگ) در حفرات، تمایل داشته باشد که با تبدیل شدن به‌اندازه قطرات کوچک‌تر بتواند به‌راحتی از گلوگاه منافذ عبور کرده و در نهایت بازبایی

<sup>5</sup> Lamella division

شود. علاوه بر این، قطرات بزرگ نفت تولید شده می‌توانند مسیر حرکت سیال تزریقی را مسدود کرده و به انحراف سیال به سمت مناطق کم‌تراوا نیز کمک کنند. براین اساس، جریان متقاطع ایجاد شده توسط فوم (ناشی از رخداد کنترل تحرک پذیری) و همچنین ایجاد امولسیون درجا (ناشی از رفتار کشش سطحی عامل فوم ساز) باعث یک هم‌افزایی در جابه‌جایی نفت باقیمانده در گستره میکرومدل ناهمگن لایه‌ای شده و متعاقباً مقدار بازیابی نفت را در محیط بهبود می‌بخشد.



شکل ۱۲- توصیف مکانیسم تولید نفت در میکرومدل لایه‌ای ناشی از رخداد انحراف سیال از لایه پرتراوا به سمت لایه کم تراوا در حضور فوم



شکل ۱۳- توصیف مکانیسم تولید نفت در میکرومدل لایه‌ای ناشی از ایجاد امولسیون درجا بواسطه حضور عامل فوم ساز

نتایج این مطالعه نشان داد که با انتخاب مناسب دبی و کیفیت فوم تزریقی و نیز نوع و غلظت عامل فوم ساز مناسب می‌توان شرایطی مطلوب جهت ایجاد انحراف سیال در یک سیستم دو لایه‌ای ناهمگن با وجود رخداد شرایط جریان متقاطع در حضور فاز نفت را فراهم نمود که در نتیجه آن بتوان جابه‌جایی نفت باقیمانده در لایه کم تراوا را به طور چشمگیری افزایش داد. با این حال مطالعات تکمیلی در خصوص بهینه‌سازی فرایند انحراف سیال توسط فوم و تعیین نقش مکانیسم‌های غالب از طریق بررسی دامنه کیفیت فوم تزریقی، دامنه سرعت تزریق، دامنه میزان اشباع نفت باقیمانده و نیز تاثیر سایر پارامترهای تاثیر گذار میکرومدل متصور خواهد بود که می‌تواند در مطالعات آینده بدان پرداخته شود.

## ۴- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه بررسی پتانسیل عملکرد فوم در یک محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای جهت بررسی انحراف سیال به سمت مناطق هدفی است که مقدار نفت باقی‌مانده بیشتری را در خود دارد. بدین منظور از یک میکرومدل شیشه‌ای استفاده شد که در آن الگوی جریان سیال در قالب یک سیستم لایه‌ای ناهمگن با تراوایی‌های متفاوت در نظر گرفته شد. این محیط شامل دو بخش با تراوایی مختلف بود که با یکدیگر در ارتباط سیالی قرار دارند. این الگو امکان بررسی تأثیر کنترل تحرک‌پذیری سیال تزریقی بر روی نحوه ایجاد جریان متقاطع بر پیشروی سیال در حضور فوم را فراهم نمود. عامل فوم ساز بکار رفته در آزمایش‌ها سورفکتنت سدیم دودسیل سولفات و در شرایط شوری ۳۵۰۰۰ ppm کلرید سدیم بود. مهم‌ترین نتایج حاصله از این مطالعه عبارت‌اند از:

- با تزریق هم‌زمان محلول سورفکتنت و گاز به‌منظور تشکیل فوم، دو ناحیه متمایز در فرایند تزریق فوم مشاهده شد. ناحیه دینامیک در جلوی جبهه فوم واقع شده که تحرک سیالات در این ناحیه زیاد بوده و اشباع فوم کمتر است. این امر ناشی از بی‌ثباتی فوم به دلیل تماس مستقیم با فاز نفت است. در نقطه‌ای که عقب‌تر از ناحیه دینامیک قرار دارد، ناحیه استاتیک وجود دارد که در آن تحرک سیالات کمتر بوده و اشباع فوم بیشتر است.
- در تزریق گاز، بازیافت نفت باقی‌مانده از لایه پرتراوا ۶۶٪ بوده است، اما تزریق فوم باعث افزایش ویسکوزیته گاز تزریقی و حرکت پیستونی می‌شود که منجر به افزایش چشمگیر بازیافت نفت باقی‌مانده به ۹۸٪ بوده است.
- در لایه با تراوایی کم، تزریق گاز تنها ۹٪ از نفت باقی‌مانده را تولید کرده است، در حالی که تزریق فوم با انحراف سیال به لایه با تراوایی پایین، بازیافت نفت باقی‌مانده را به ۸۵٪ افزایش داده است. این موضوع نشان‌دهنده کارآمدی استفاده از فوم در بهبود عملکرد تزریق گاز در یک محیط متخلخل ناهمگن لایه‌ای می‌باشد.
- مطابق نتایج حاصله از آنالیز تصاویر در مقیاس حفرات، مکانیسم‌هایی از قبیل اسنپ اف، تقسیم لاملا و و نیز به دام افتادن فاز گازی از جمله رخداد‌های مهم در بررسی رفتار جریانی فوم در شرایط مطالعه انجام شده بودند. رخداد این مکانیسم‌ها در مقیاس حفرات سبب شدند که پدیده‌هایی مانند جریان متقاطع ویسکوز، انحراف سیال تزریقی از نواحی پرتراوا به کم‌تراوا و همچنین افزایش جابه‌جایی نفت باقیمانده در لایه کم‌تراوا در حضور فوم رخ دهد.

## ۵- تشکر و قدردانی

از شرکت مهندسی و توسعه نفت بابت حمایت از این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

## ۶- منابع

۱. Bedrikovetsky P. Mathematical theory of oil and gas recovery: with applications to ex-USSR oil and gas fields: Springer Science & Business Media; 1993.
۲. Lake LW. Enhanced oil recovery. 1989.
۳. Irvani M, Khalilnezhad Z, Khalilnezhad A. A review on application of nanoparticles for EOR purposes: history and current challenges. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2023;13(4):959-94.
۴. Irvani M, Simjoo M. Modeling of Polymer Associated Low Salinity Waterflooding by Fractional Flow Theory. Journal of Modeling in Engineering. 2019;17(56):213-22.
۵. Simjoo M, Rezaei M, Nadri F, Mousapour M, Irvani M, Chahardowli M, editors. Introducing a new, low-cost biosurfactant for EOR applications: a mechanistic study. IOR 2019–20th European Symposium on Improved Oil Recovery; 2019: European Association of Geoscientists & Engineers.

- .7 Boersma D, Hagoort J. Displacement characteristics of nitrogen vs. methane flooding in volatile-oil reservoirs. *SPE Reservoir Engineering*. 1994;9(04):261-5.
- .8 Bruining J, Marchesin D. Maximal oil recovery by simultaneous condensation of alkane and steam. *Physical Review E*. 2007;75(3):036312.
- .9 Orr FM. *Theory of gas injection processes*: Tie-Line Publications Copenhagen; 2007.
- .10 van Batenburg DW, De Zwart AH, Doush M, editors. *Water alternating high pressure air injection*. *SPE Improved Oil Recovery Conference?*; 2010: SPE.
- .11 Rossen W, Van Duijn C. Gravity segregation in steady-state horizontal flow in homogeneous reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2004;43(1-2):99-111.
- .12 Wellington S, Vinegar H. *Surfactant-induced mobility control for carbon dioxide studied with computerized tomography*. ACS Publications; 1988.
- .13 Chang Y-B, Lim M, Pope G, Sepehrnoori K. CO<sub>2</sub> flow patterns under multiphase flow: heterogeneous field-scale conditions. *SPE Reservoir Engineering*. 1994;9(03):208-16.
- .14 Joekar-Niasar V, Hassanizadeh SM. Effect of fluids properties on non-equilibrium capillarity effects: Dynamic pore-network modeling. *International Journal of Multiphase Flow*. 2011;37(2):198-214.
- .15 Koval E. A method for predicting the performance of unstable miscible displacement in heterogeneous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*. 1963;3(02):145-54.
- .16 Waggoner J, Castillo J, Lake LW. Simulation of EOR processes in stochastically generated permeable media. *SPE formation evaluation*. 1992;7(02):173-80.
- .17 Zapata VJ, Lake LW, editors. *A theoretical analysis of viscous crossflow*. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*; 1981: OnePetro.
- .18 Talebian SH, Masoudi R, Tan IM, Zitha PLJ. Foam assisted CO<sub>2</sub>-EOR: A review of concept, challenges, and future prospects. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2014;120:202-15.
- .19 Thompson K, Gdansk R. Laboratory study provides guidelines for diverting acid with foam. *SPE Production & Facilities*. 1993;8(04):285-90.
- .20 Huh D, Handy L. Comparison of steady-and unsteady-state flow of gas and foaming solution in porous media. *SPE reservoir engineering*. 1989;4(01):77-84.
- .21 Ma K, Lontas R, Conn CA, Hirasaki GJ, Biswal SL. Visualization of improved sweep with foam in heterogeneous porous media using microfluidics. *Soft Matter*. 2012;8(41):10669-75.
- .22 Conn CA, Ma K, Hirasaki GJ, Biswal SL. Visualizing oil displacement with foam in a microfluidic device with permeability contrast. *Lab on a Chip*. 2014;14(20):3968-77.
- .23 Jian G, Fernandez CA, Puerto M, Sarathi R, Bonneville A, Biswal SL. Advances and challenges in CO<sub>2</sub> foam technologies for enhanced oil recovery in carbonate reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;202:108447.
- .24 Talebian SH, Tan IM, Sagir M, Muhammad M. Static and dynamic foam/oil interactions: Potential of CO<sub>2</sub>-philic surfactants as mobility control agents. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2015;135:1-18.
- .25 AlQuaimi B, Rossen W, editors. *Characterizing foam flow in fractures for enhanced oil recovery*. *IOR 2017-19th European Symposium on Improved Oil Recovery*; 2017: European Association of Geoscientists & Engineers.
- .26 Mahmoodi M, Mahdavi S, James LA, Johansen T. A quick method to fabricate large glass micromodel networks. *Microsystem Technologies*. 2018;24:2419-27.
- .27 Wang Z, Guo W, Pena A, Whitehead D, Luk'Yanchuk B, Li L, et al. Laser micro/nano fabrication in glass with tunable-focus particle lens array. *Optics Express*. 2008;16(24):19706-11.
- .28 Rossen WR. *Foams in enhanced oil recovery*. *Foams: theory, measurements and applications*. 1996;57:413-64.
- .29 Almajid MM, Kovscek AR. Pore-level mechanics of foam generation and coalescence in the presence of oil. *Advances in colloid and interface science*. 2016;233:65-82.
- .30 Lontas R, Ma K, Hirasaki GJ, Biswal SL. Neighbor-induced bubble pinch-off: novel mechanisms of in situ foam generation in microfluidic channels. *Soft Matter*. 2013;9(46):10971-84.

.۳• Osterloh W, Jante Jr M, editors. Effects of gas and liquid velocity on steady-state foam flow at high temperature. SPE Improved Oil Recovery Conference?; 1992: SPE.

Accepted Paper