



A Review on Recent Studies on the Simulation of Foam Flooding in Porous Media

S. Shahmarvand¹, F. Ameli^{2*}

1- M. Sc. of Petroleum Engineering, Iran University of Science and Technology

2- Assistant Professor of Petroleum Engineering, Iran University of Science and Technology

Email: ameli@iust.ac.ir

Abstract

Foam is a fluid that consists of water, gas, and surfactant, so that its properties are a combination of the two. Water-soluble surfactant is used to stabilize the fluid. From the late 50s and early 60s, foam as a promising technique to control gas mobility and adaptability to porous media, as well as solving problems such as finger phenomenon, early gas breakthrough, gravity override, etc. that are created by gas injection are presented. Applications of foam injection including: EOR, matrix acidizing, prevention of gas leakage, repair of aquifer layers, closing the path in the porous medium in order to control the flow and direct it. To understand the physicality of this fluid, it has been modeled in the past with two general techniques of population balance and local equilibrium. In this article, these approaches and models are explained. Also, a general comparison has been made between the presented techniques. The population balance pattern, which is based on the rules of bubble balance, is classified into two versions: 1- dynamic texture and 2- local equilibrium. The main difference between the two versions is in how to obtain the foam texture. The results show that the local-implicit texture equilibrium technique requires fewer parameters than the population balance model versions. Also, due to the algebraic solution of equations, it takes less computational time in reservoir simulators and is more useful due to its experimental nature.

Received: 03 December 2020

Accepted: 13 June 2021

Page Number: 64-83

Keywords:

Foam Injection,
Modeling of Foam Flow,
EOR,
Population Balancing and
Local Equilibrium
Techniques

Please Cite this Article Using:

Shahmarvand, S., Ameli, F., "A Review on Recent Studies on the Simulation of Foam Flooding in Porous Media", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 20, No. pp. 116, 64-83, In Persian, (2021).



مروری بر مطالعات اخیر پیرامون مدل سازی تزریق فوم در محیط متخلخل

سامیه شهماروند^۱، فروغ عاملی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

پیام نگار: ameli@iust.ac.ir

چکیده

فوم سیالی است که از فاز گاز، آب و سورفکتانت تشکیل شده است، سورفکتانت که به صورت محلول در آب است، به منظور پایداری این سیال استفاده می‌شود. از اواخر دهه ۵۰ و اوایل دهه ۶۰، فوم به عنوان یک تکنیکی امیدوار کننده به منظور کنترل تحرک گاز و سازگاری در محیط متخلخل و همچنین رفع مشکلاتی از قبیل پدیده انگشتی شدن، میان شکنی زود هنگام گاز و رانش گرانشی که با تزریق گاز ایجاد می‌شوند، ارائه شد. کاربردهای تزریق فوم عبارت است از ازدیاد برداشت، اسیدزنی ماتریس، جلوگیری از نشت گاز، اصلاح لایه‌های آلوده، بستن مسیری در محیط متخلخل به منظور کنترل جریان و جهت‌دهی به آن. برای درک فیزیکی رفتار این سیال، مدل سازی آن با دو رویکرد کلی موازنه جمعیت (PB) و تعادل محلی-بافت ضمنی (IT-LE) انجام می‌گیرد. در این مقاله به توضیح و شرح این رویکردها و مدل‌های مربوطه پرداخته شده است. همچنین میان تکنیک‌های ارائه شده مقایسه‌ای کلی شده است. الگوی موازنه جمعیت به دو نسخه بافت دینامیکی و تعادل محلی تقسیم می‌شود. تفاوت اصلی بین این دو نسخه در نحوه به دست آوردن بافت فوم است. نتایج نشان می‌دهد که تکنیک تعادل محلی-بافت ضمنی به مؤلفه‌های کمتری نسبت به نسخه‌های مدل تعادل جمعیت نیاز دارد. همچنین به دلیل حل معادلات به صورت جبری، زمان محاسبه کمتری را در شبیه‌سازیهای مخزن از آن خود می‌کند و به دلیل ماهیت تجربی دارای کاربرد بیشتری است.

کلیدواژه‌ها:

مدل سازی تزریق فوم،
ازدیاد برداشت،
موازنه جمعیت،
تعادل محلی

* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، گروه مهندسی نفت

استناد به مقاله:

شهماروند، س.، عاملی، ف.، "مروری بر مطالعات اخیر پیرامون مدل سازی تزریق فوم در محیط متخلخل"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیستم، شماره ۱۱۶، صص. ۸۳-۶۴، (۱۴۰۰).

۱. مقدمه

پس از گذشت مدت زمانی از عمر مخزن، به دلیل کاهش انرژی آن، مقداری از نفت اولیه در مخزن باقی می‌ماند. متناسب با نوع مخزن و دیگر شرایط آن، می‌توان از روش‌های مختلف ازدیاد برداشت استفاده کرد. ازدیاد برداشت شیمیایی یکی از این روش‌هاست که مطابق شکل (۱) انواع آن ذکر شده است.

بازدهی جاروب به وسیله گاز تزریقی مشکلاتی دارد که می‌توان به ناهمگنی زمین‌شناختی سازند، اختلاف چگالی بین گاز و مایعات ساکن و گرانی نسبتی گاز نسبت به مایعات ساکن اشاره کرد. فوم به طور مستقیم با کاهش میزان تحرک گاز در سازند مشکل گرانی را برطرف می‌کند؛ علاوه بر گرانی کردن مایعات تزریقی، فوم در لایه‌هایی با نفوذپذیری مطلق بالا در مقایسه با لایه‌هایی با نفوذپذیری مطلق کم، تحرک بیشتر را کاهش می‌دهد و به جریان بین این لایه‌ها نیز کمک می‌کند. افزایش گرادیان فشار جانبی و هم‌چنین حضور سورفکتانت که منجر به تشکیل فوم و سپس مهاجرت گاز به سمت بالا می‌شود، در اثر تغییرات شدید نفوذپذیری سازند، کاهش بیشتر جدایش ثقلی را به همراه دارد [۲]. تزریق گاز با بازدهی جاروبی ضعیف، می‌تواند سه دلیل عمده داشته باشد: (۱) جداسازی و غلبه گرانش به دلیل چگالی پایین تر گاز در مقایسه با نفت یا آب، (۲) انگشتی شدن به دلیل نسبت تحرک زیاد بین گاز تزریق شده و نفت یا آب (۳) کانال زنی از راه رگه‌هایی با نفوذپذیری مطلق زیاد یا لایه‌هایی ناهمگن در مخزن. فوم با کاهش تحرک گاز، نسبت تحرک مطلوب را تأمین می‌کند و با تماس بخش بیشتر مخزن، بازده جاروبی حجمی را بهبود می‌بخشد تا اثر ناهمگونی، تفکیک گاز^۱ و ناپایداری گرانی^۲ را کاهش دهد [۳]. کانال زنی سازوکار دور زدن دیگری است که ناشی از ناهمگونی و تمایل خودهمبستگی سیالات^۳ است. چنین اثراتی را می‌توان با تزریق آب به طور متناوب^۴ تا حدی کاهش داد. آب باعث کاهش نفوذپذیری نسبی گاز و در نتیجه کاهش نسبت تحرک می‌شود. با این حال، اثربخشی WAG به ضخامت مخزن وابسته است [۴]. تزریق محلول سورفکتانت به جای آب برای ساختن فوم یک راه حل امیدوارکننده برای پرداختن هم‌زمان به تمام موارد فوق است. مشکلات گفته شده

به صورت جداگانه برای ژل‌ها، WAG و فوم در شکل (۲) آورده شده است و هم‌چنین میزان جاروب به وسیله آن‌ها به خوبی نمایان است. فوم ممکن است قبل از تزریق به چاه، در داخل چاه و یا داخل سنگ مخزن ایجاد شود. ایجاد فوم قبل از رسیدن آن به سنگ، به دلیل آن که فوم از لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار است، ممکن است باعث کاهش تزریق پذیری آن شود. این مسئله به لحاظ عملیاتی مناسب نیست؛ بنا بر این روش‌های تزریق هم‌زمان فاز گازی و آبی به همراه سورفکتانت^۵ (SAG) و یا تزریق متناوب آن‌ها کاربردی‌تر است و فوم در ناحیه دورتری از چاه تولید می‌شود. تزریق فوم در بخش‌های مختلف مخزن و با اهداف متفاوتی انجام می‌شود؛ به عنوان مثال ممکن است فوم با هدف رساندن سورفکتانت به نفت داخل ماتریس و کاهش کشش بین سطحی گاز و نفت انجام شود. از سوی دیگر، فوم به منظور افزایش نیروهای گرانی در برابر نیروهای موئینه تزریق می‌شود. در مواردی به منظور بستن مسیری خاص و کنترل جهت جریان سیالات در مخزن، از فوم استفاده می‌شود و ممکن است برای کاهش نسبت گاز به نفت تولیدی، در چاه تولیدی تزریق شود. در این شرایط فوم باعث کاهش شدید تحرک پذیری گاز در نزدیکی چاه تولیدی می‌شود [۶]. ساختار و نوع فوم بر اساس هدف اصلی تزریق و خواص سنگ و سیال مخزن، طراحی می‌شود. مهم‌ترین بخش این طراحی، انتخاب سورفکتانت مناسب است؛ وجود سورفکتانت باعث تشکیل و پایداری نسبی فوم می‌شود. لازم است قبل از تزریق، تست‌های کیفیت، عمر مفید فوم، تغییر گرانی ظاهری با فشار و سرعت تزریق بررسی شوند [۷]. مطالعات قبلی نشان می‌دهد که فوم می‌تواند در محیط متخلخل با سرعت بحرانی یا گرادیان فشار خیلی زیاد ایجاد شود [۸]. فوم به وسیله سورفکتانت پایدار می‌شود؛ اما این پایداری بلندمدت نیست و نیاز به تولید دوباره به صورت پایدار در طول حرکت در محیط متخلخل دارد. ممکن است فوم به دلیل جذب بالا بر سطح حفره‌ها از نظر شیمیایی ساختار خود را از دست بدهد. مطالعات نشان داده است که استفاده از نانوذرات سبب افزایش پایداری فوم می‌شود و جذب سطحی آن به نسبت کاهش می‌یابد و دیرتر دچار فروپاشی می‌شود [۲]. موفقیت در فرایند تزریق فوم نیازمند شناخت و درک درست از این سیال و هم‌چنین طراحی بهینه آن است. در این

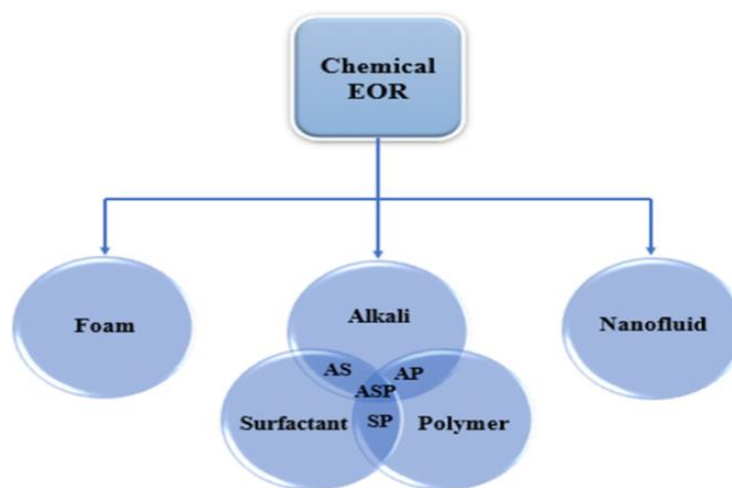
1. Gas Segregation
2. Viscous Instability
3. Fluid's Autocorrelation Tendency
4. WAG

است؛ به‌گونه‌ای که فاز مایع پیوسته باشد و حد اقل بخشی از فاز گاز به‌وسیلهٔ فیلم‌های نازک مایع به نام فیلم نازک (لاملا) به صورت ناپیوسته ساخته شود. استحکام فوم ایجادشده با گازهای نیتروژن، متان و کربن دی‌اکسید زیاد است؛ به‌استثنای کربن دی‌اکسید در فشار بالا. فوم‌های تولیدشده بارها و بارها استحکام خود را در فشار بالا و دمای بالای میدان نشان داده‌اند[۹].

مقاله ویژگی‌ها و مؤلفه‌های مربوط به این سیال ذکر شده است. هم‌چنین تکنیک‌های مورد استفاده برای مدل‌سازی تزریق فوم در محیط متخلخل ارائه و به توضیح و مقایسهٔ آن‌ها برای دستیابی به مدلی کارآمد برای استفادهٔ صحیح از این سیال پرداخته شده است.

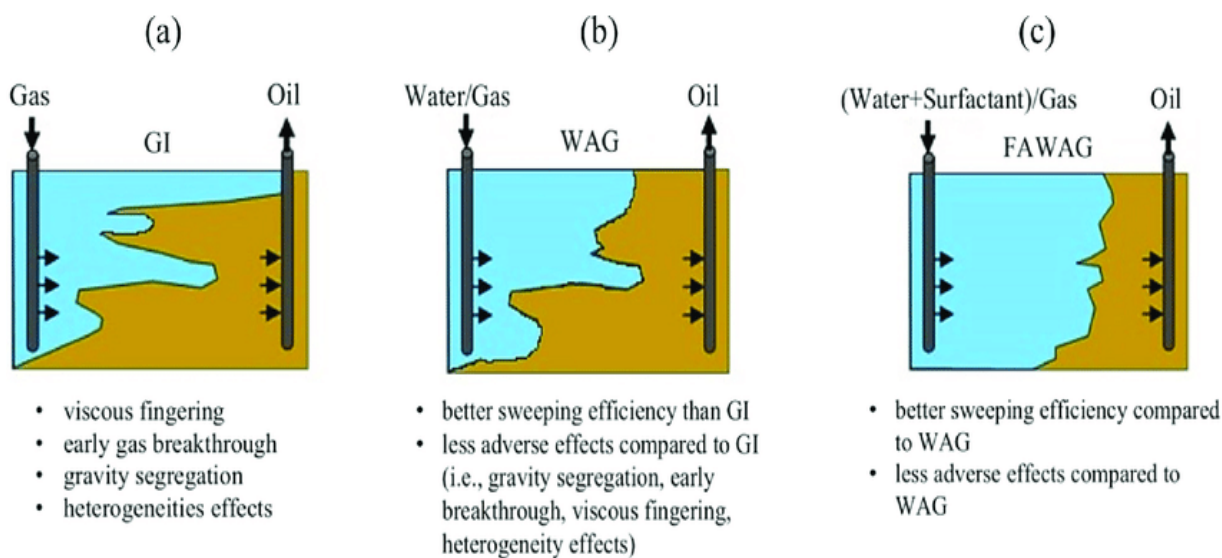
۲. فوم و ویژگی‌های آن

فوم در محیط متخلخل به‌عنوان پراکندگی گاز در مایع تعریف شده



شکل ۱. دسته‌بندی روش شیمیایی[۱].

Figure 1. Classification of chemical methods[1].



شکل ۲. بررسی سه روش ازدیاد برداشت[۵].

Figure 2. Investigation of three methods of EOR[5].

۲-۱ رفتار فوم در محیط متخلخل

فوم به‌عنوان ابزاری برای کنترل تحرک گاز و کنترل سازگاری در محیط متخلخل برای انواع کاربردها بررسی شده است که از آن جمله می‌توان به جلوگیری از نشت گاز و اصلاح آبدهی آلوده [۱۰] یا به عبارتی افزایش بازدهی به‌واسطه اصلاح زیست‌محیطی سفره‌های آبی اشاره کرد [۱۱]. به‌تازگی فوم‌ها در عملیات کنترل آبدی نیز به کار رفته‌اند. دلیل منطقی کاربرد فوم در چنین فرایندهایی به‌دلیل خصوصیات اصلی پراکندگی فوم پایدار، در محیط متخلخل است. تشکیل فوم افزایش گرانشی گاز و کاهش نفوذپذیری نسبی آن را در پی دارد [۱۲]. مؤلفه کاهش تحرک^۱ معیاری مناسب برای نشان‌دادن حضور فوم و ارزیابی تأثیر آن در محیط متخلخل است.

$$MRF = \frac{\Delta P_{foam}}{\Delta P_{no-foam}} \quad (1)$$

مؤلفه‌های ذکر شده در معادله فوق به‌وسیله محاسبه گرادیان فشار در حالت تزریق متناوب گاز و محلول سورفکتانت (ΔP_{foam}) و تزریق متناوب گاز و آب (عدم حضور سورفکتانت) ($\Delta P_{no-foam}$) حساب می‌شود [۱۳].

فوم را نمی‌توان به‌عنوان یک فاز در نظر گرفت؛ زیرا از نظر ترمودینامیکی پایدار نیست. چندین مطالعه قبلی نشان می‌دهد که وجود فوم مستقیماً منحنی نفوذپذیری نسبی آب یا گرانشی آب را تغییر نمی‌دهد. فوم می‌تواند به‌طور غیرمستقیم با اشباع گاز به دام بیفتد و کاهش اشباع آب، مؤثر باشد [۱۰]. بسیاری از مؤلفه‌ها از جمله غلظت سورفکتانت، اشباع نفت، سرعت برشی^۲، عدد موئینگی^۳ و شوری بر عملکرد و رفتار فوم تأثیر می‌گذارد [۱۴]. در شرایط مخزن، فاز گاز منافذ بزرگ را اشغال می‌کند، در حالی که بیشتر منافذ کوچک حاوی فاز مایع هستند. بنابراین، نفوذپذیری نسبی مایع مستقل از حضور فوم است [۱۵].

۲-۲ روانه‌شناسی فوم

در شبیه‌سازی مکانیکی اندازه‌های حباب‌ها با n_f معرفی می‌شوند که عبارت است از تعداد فیلم‌های نازک در واحد حجمی فاز گاز. حباب‌های کوچک‌تر دارای n_f بزرگ‌تر و تحرک پایین گاز هستند.

فیلم‌های نازک، تنش آستانه مؤثر^۴ را به گاز منتقل می‌کنند. با توجه به تنش آستانه^۵ و هم‌چنین رفتار Shear Thinning بر روی حباب‌های متحرک، گرانشی مؤثر گاز در فوم از نوع کشش برشی است [۱۱]. اگر دبی تولیدی فیلم نازک بر دبی انعقاد آن غلبه کند، فوم با بافت ریز و گرانشی زیاد گاز به‌وجود می‌آید که منجر به گرادیان فشار زیاد می‌شود؛ این ترکیب «فوم قوی» نامیده می‌شود. از طرف دیگر، یک فوم با بافت درشت دارای گرانشی ظاهری کم است و منجر به گرادیان کم فشار می‌شود، این فوم به‌اصطلاح «فوم ضعیف» نامیده می‌شود و در شرایطی به‌وجود می‌آید که دبی انعقاد فیلم نازک بر دبی تولید آن غلبه کند. تغییر ناگهانی از فوم ضعیف به فوم قوی، همراه با افزایش قابل توجه در گرادیان فشار «تولید فوم» نامیده می‌شود [۱۶].

۲-۳ کیفیت فوم

کیفیت فوم، که بیانگر حجم فاز گاز به حجم کل مخلوط گاز و مایع (محلول سورفکتانت) است، مؤلفه مهم دیگری برای توصیف خواص فوم در محیط متخلخل است. این مؤلفه‌چنین تعریف شده است:

$$Q = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (2)$$

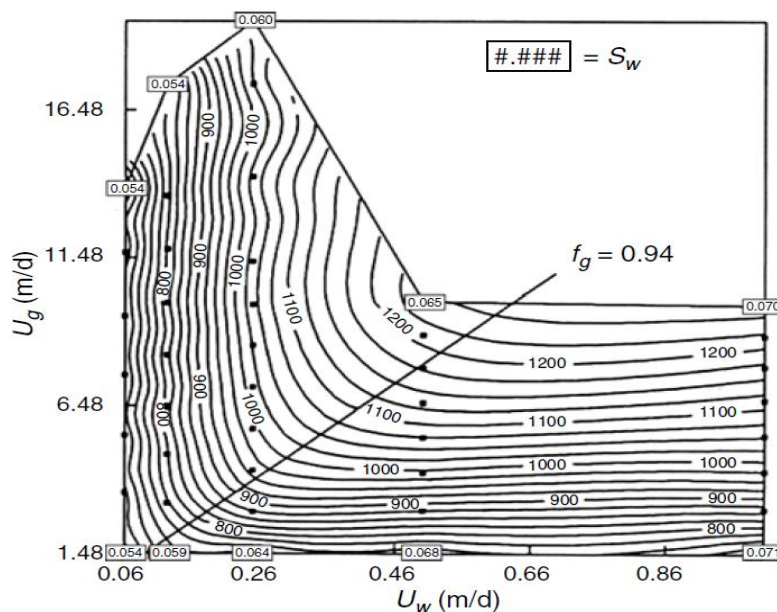
Q کیفیت فوم، V_g حجم گاز و V_l حجم مایع است [۱۷]. گرادیان فشار بر حسب psi/ft روی کانتورها نشان داده شده است. کانتورهای افت فشار برابر، از راه داده‌های حالت پایدار ترسیم و با نقاط سیاه نمایش داده شده‌اند [۹]. با تولید فوم قوی، مطابق شکل (۳) دو رژیم جریان مجزا به اصطلاح رژیم با کیفیت بالا و رژیم با کیفیت پایین ایجاد می‌شود. مقدار آستانه‌ای برای کیفیت فوم به نام fg^* برای تبدیل این دو رژیم به هم وجود دارد؛ در رژیم با کیفیت بالا، گرادیان فشار حالت پایدار در درجه اول به‌سرعت مایع بستگی دارد و نسبت به سرعت گاز ناشی از کانتورهای فشار تقریباً عمودی بسیار حساس است. این در حالی است که در رژیم با کیفیت پایین، عکس این قضیه اتفاق می‌افتد. رفتار فوم به‌طور معمول در رژیم با کیفیت بالا تقریباً نیوتنی و تا حدی shear-thickening است؛ اما در رژیم با کیفیت پایین به‌طور

1. Mobility Reduction Factor
2. Shear Rate
3. Capillary Number

4. Effective Yield Stress
5. Yield Stress

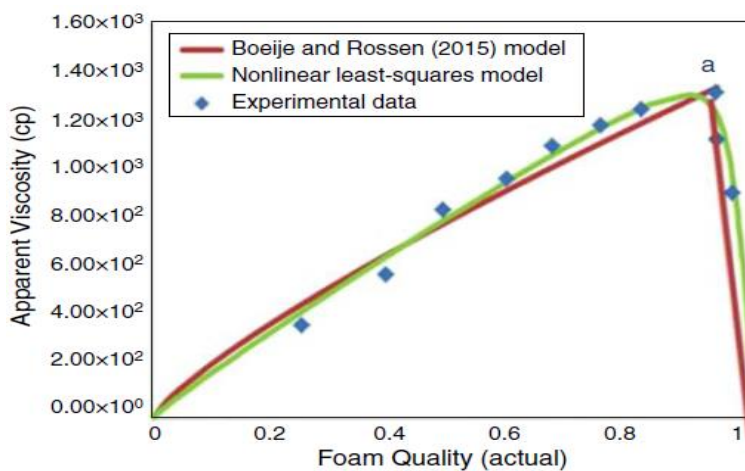
نمودار، جایی که μ_{app} با افزایش کیفیت فوم افزایش می‌یابد؛ رژیم با کیفیت بالا برابر است با جایی که μ_{app} با افزایش کیفیت فوم کاهش می‌یابد. کیفیت فومی که انتقال از رژیم با کیفیت پایین به کیفیت بالا رخ می‌دهد را به‌عنوان f_g^* تعریف شده است. انتقال بین دو رژیم جریان به‌صورت ناگهانی فرض شده است که این انتقال به‌صورت یک قله در شکل (۴) و یک گوشه نسبتاً تیز در شکل (۳) مشخص شده است [۱۸].

قابل توجهی shear-thinning است. به نظر می‌رسد که این دو رژیم با سازوکارهای مختلفی مانند محدود کردن فشار موئینگی در رژیم با کیفیت بالا و به دام انداختن حباب و متحرک‌سازی در رژیم با کیفیت پایین اداره می‌شوند [۱۶]. مطابق شکل (۴) گرانیوی ظاهری فوم بدون نفت در سرعت ظاهری ثابت 0.671 (ft/d) به‌عنوان تابعی از کیفیت فوم رسم شده است؛ رژیم با کیفیت پایین در شکل (۴) برابر است با قسمت سمت چپ



شکل ۳. افت فشار در یک بسته ماسه‌ای ۲ فوتی به‌عنوان تابعی از سرعت‌های سطحی گاز و آب [۹].

Figure 3. Pressure drop in a 2-ft sandpack as a function of gas and water superficial velocities [9].



شکل ۴. نمودار گرانیوی ظاهری بر حسب کیفیت فوم [۱۸].

Figure 4. Graph of apparent viscosity versus foam quality [18].

۲. سازوکارهای تولید فوم

شوربختانه کنترل رفتار فوم برای رسیدن به هدف مورد نظر دشوار است؛ درک کامل از سازوکارهای حاکم بر رفتار فوم هم‌چنان یک چالش است که در بسیاری از مطالعات تجربی و مدل‌سازی‌ها دنبال می‌شود. در برخی موارد سازوکارهای تولید در سطح میکروسکوپی مشاهده و بررسی جابه‌جایی و تخریب فوم انجام شده است. در ادامه به توضیح سازوکارهای تولید فوم پرداخته می‌شود [۱۹].

۳-۱ Snap-off

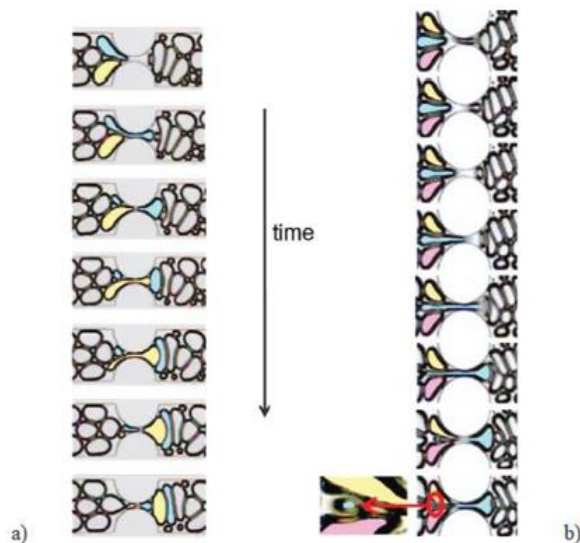
Snap-off را نخستین بار روف ارائه کرد. طی این فرایند، نفت در طول سیلاب‌زنی با آب به دام می‌افتد. این سازوکار فیلم‌های نازک فوم را هنگامی که فاز غیرترشونده گاز باشد، تولید می‌کند [۲۰]. این سازوکار یک فرایند مکانیکی است که حباب یا غشا ایجاد می‌کند. فرایند snap-off در نتیجه اختلاف فشار موئینه بین بدنه و گلوگاه خلل و فرج است. در حین عبور گاز، نیروی موئینه مایع را به داخل گلوگاه می‌کشد و یک غشا به‌وجود می‌آید؛ در نتیجه فاز گاز ناپیوسته شده، یک حباب جدید تشکیل می‌شود. این فرایند یکی از مهم‌ترین سازوکارها برای تولید فوم در محیط متخلخل است. شرط لازم برای این که در محیط متخلخل Snap-off اتفاق بیفتد این است که شعاع بدنه حفره‌ها حد اقل دو برابر شعاع گلوگاه باشد تا افت فشار موئینه لازم ایجاد شود. این سازوکار بدون توجه به حضور یا عدم حضور ماده فعال‌کننده سطحی روی می‌دهد؛ اما اگر فعال‌کننده سطحی حضور نداشته باشد، حباب‌های تشکیل شده پایدار نیستند و به هم می‌پیوندند. چنان‌که در شکل (۵) - (a) پیداست، هنگامی این سازوکار رخ می‌دهد که مقداری اختلاف انحنای بین قسمت جلوی حباب و قسمتی از حباب در انقباض، وجود داشته باشد. مایع در گلوگاه جمع می‌شود تا سرانجام از قسمت گاز که به بدنه منافذ حمله می‌کند، پل ایجاد کند و با گذشت زمان حباب جدا شود. در محیط متخلخل یک آستانه بحرانی برای گرادیان فشار به‌منظور ایجاد فوم قوی با سازوکار snap-off لازم است. کاهش تحرک گاز در مقادیر کم‌تر از این احتمال بحرانی، بسیار کم است. بالاتر از این آستانه، حالت پایدار جریان کسری فیلم نازک اندازه‌گیری می‌شود. با افزایش این احتمال در شبکه، بافت حباب افزایش می‌یابد و از این‌رو جابه‌جایی یک‌نواخت‌تر و شبیه پیستون می‌شود [۲۱].

۳-۲ Lamella Division

چنان‌که در شکل (۵) - (b) نشان داده شده است، این سازوکار هنگامی که یک فیلم نازک با یک نقطه انشعاب مواجه می‌شود، رخ می‌دهد. این امر نیاز به وجود فیلم نازک در محیط‌های متخلخل دارد [۲۱]. تعداد تقسیم‌ها در این سازوکار به نقاط انشعابی، اندازه حباب‌ها و فشار موئینه بستگی دارد؛ اگر گرادیان فشار به‌اندازه کافی بزرگ باشد که بتواند فیلم نازک را در هر دو شاخه به‌طور هم‌زمان حرکت دهد، فیلم‌های نازک تقسیم می‌شوند. هنگامی که تقسیم اتفاق می‌افتد، بافت فوم خارج‌شده یکنواخت نیست و از بافتی که وارد شاخه منافذ می‌شود، ظریف‌تر است. در نتیجه، تقسیم سازوکاری است که می‌تواند بافت فوم را در محیط متخلخل اصلاح کند. میزان تقسیم حباب‌ها به گرادیان فشار و تعداد شاخه‌های منافذ درون سامانه بستگی دارد. علاوه بر این، تولید به‌وسیله تقسیم، متناسب با چگالی حباب‌های جاری و سرعت گاز است، به‌طوری که هر چه فیلم‌های نازک با سرعت بیشتری به شاخه‌ها برای تقسیم وارد شوند، سریع‌تر می‌توان حباب‌های جدید ایجاد کرد [۲۰].

۳-۳ leave-behind

چنان‌که در شکل (۵) - (c) پیداست، معمولاً در ابتدای فرایند، تهاجم اتفاق می‌افتد، زمانی که حباب در اطراف یک دانه می‌پیچد و لزه‌های مایعی تولید می‌کند عمود بر جهت جریان نیستند. بر خلاف lamella division و snap-off که غشا را عمود بر جهت جریان تولید می‌کنند، این سازوکار غشا را در جهت جریان تولید می‌کند. پیوسته، به درون محدوده‌ای که از محلول سورفکتانتی پر شده است، نفوذ می‌کند. غشا وقتی تشکیل می‌شود که دو شاخه گاز در دهانه یک حفره هم‌گرا شوند. غشاهای ایجادشده با مسدود کردن جریان گاز باعث کاهش نفوذپذیری آن می‌شوند [۱۰]. سازوکار Snap-off بستگی به ناهمگونی مخزن و فشار موئینی دینامیکی موضعی بین مایع و حباب حفره‌ای دارد؛ گرادیان فشار ایجادشده در محیط متخلخل باید از یک مقدار مشخص، برای متحرک‌سازی فیلم نازک و در ادامه تقسیم آن بیشتر باشد. در فرایند پسماند، معمولاً لایه‌های موازی با جهت جریان در حین تخلیه مایع ایجاد می‌شوند؛ که غالباً با فوم‌های گاز پیوسته با کاهش تحرک کم تا متوسط همراه هستند [۱۰].



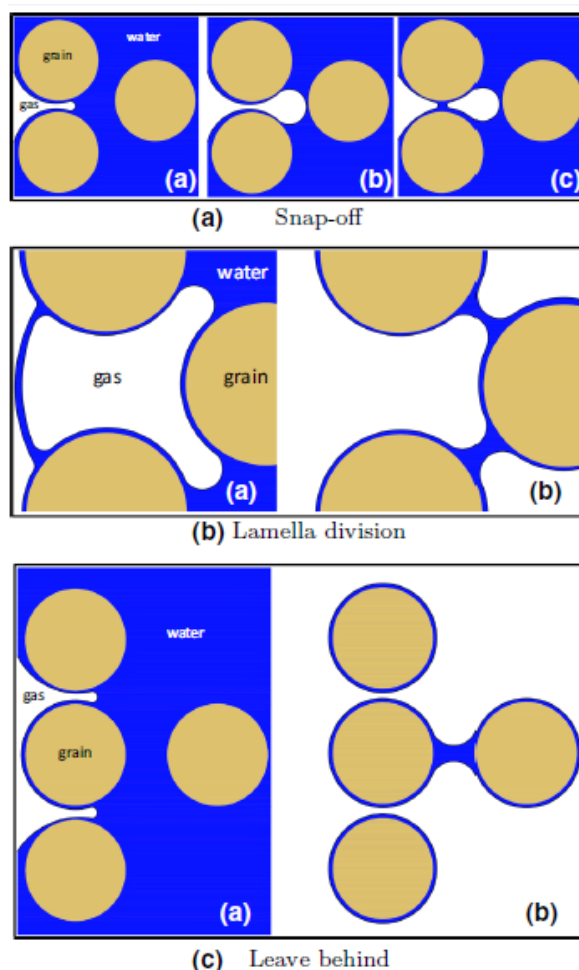
شکل ۶. (a) سازوکار neighbor-wall pinch off (b) سازوکار neighbor-neighbor pinch off [۱۷].

Figure 6. (a) Mechanism neighbor-wall pinch off, (b) Mechanism neighbor-neighbor pinch off.

۴. پایداری فوم

پایداری فوم به ساختار و پایداری فیلم‌های مایع وابسته است؛ این پایداری به وسیلهٔ اثر متقابل عوامل و نیروهای مختلف تعیین می‌شود. سازوکارها شامل: تخلیهٔ گرانشی، انعقاد در اثر مکش موئینه، فشار جدایش، قابلیت ارتجاعی سطح و نفوذ گاز است. در مقیاس توده، سازوکار تخلیهٔ گرانشی و نفوذ گاز سازوکارهای غالب انعقاد هستند. در محیط متخلخل سازوکارهای مهم برای ناپایداری کردن فوم مکش موئینه، فشار موئینه و نیروهای جاذبهٔ واندروالس فشار جدایش هستند، در حالی که قابلیت ارتجاعی و نیروهای دافعهٔ فشار جداکننده عامل پایداری هستند [۲۲]. به‌طور کلی پذیرفته شده است که مکش موئینی بر انعقاد فوم حاکم است؛ با افزایش فشار موئینی، تخریب لاملها افزایش می‌یابد. به‌طور خاص، مشاهده می‌شود که با افزایش گرانشی ظاهری گاز، یک فشار موئینی محدودکننده به دست می‌آید به نام «فشار موئینی حدی» که فوم در این فشار به‌طور ناگهانی از بین می‌رود [۱۱]. با توجه به اهمیت فشار جدایش و اثرات آن در پایداری و ناپایداری فوم، در ادامه این مؤلفه را توضیح می‌دهیم.

1. Disjoining Pressure
2. Limiting Capillary Pressure



شکل ۵. سه سازوکار اصلی تولید فوم در محیط متخلخل [۲۱].

Figure 5. Three main mechanisms of production [21].

۴-۳ Pinch-off

لیونتس و همکاران [۱۰] به‌تازگی دو سازوکار جدید تولید فوم را - مطابق شکل (۶) - که شامل تعامل بین حباب‌های موجود در گلوله‌های موئینه با عدد موئینی حدود ۱۰۲ هستند، ارائه کردند؛ که عبارت‌اند از neighbor-wall و neighbor-neighbor pinch-off. تعامل حباب‌های ایجاد شده منجر به تقسیم فیلم نازک pinch-off می‌شود. نیروهای برشی و موئینه باعث این سازوکار می‌شوند. در مقایسه با اولین سازوکارهای پیشنهادی که تولید فوم درجا در اثر تماس با سطوح سنگ انجام می‌گیرد، در این سازوکار جدید فوم می‌تواند با استفاده از حباب‌هایی که در مجاورت یکدیگر هستند نیز ایجاد شود. اندازهٔ حباب‌ها در این سازوکار از اندازهٔ بدنهٔ منافذ کوچک‌تر است [۱۷].

۴-۱ فشار جدایش

گاز، ∇P_g گرادیان فشار گاز و μ_g گرانشی گاز است. باید دانست که قانون داری به معنای پیوسته بودن فشار در هر فاز از جریان است. این فرض می‌تواند در فاز مایع معتبر تلقی شود؛ اما در فاز گاز قابل تردید است؛ زیرا به‌طور ناپیوسته جریان می‌یابد. فرض می‌شود که فشار فوم برای فوم‌های خشک با فشار گاز برابر است [۱۰]. به‌صورت کلی دو گروه اصلی از مدل‌های جریان فوم در محیط متخلخل وجود دارد: موازنه جمعیت و تعادل محلی [۱۴].

۵-۱ مدل موازنه جمعیت

مدل‌های مکانیکی مبتنی بر تئوری موازنه جمعیت، از نظر فیزیکی تولید و نابودی فیلم‌های نازک فوم را توصیف می‌کند و به‌صورت دینامیکی قابلیت تحرک فوم را از راه مدل‌سازی صریح بافت فوم یا تغییرات اندازه حباب فوم نشان می‌دهند. در این مدل تحرک گاز به‌عنوان تابعی از بافت فوم، اشباع آب و سایر عوامل بیان می‌شود. چالش اصلی برای به‌کارگیری مدل‌های موازنه جمعیت مکانیکی، دشواری در تعیین مؤلفه‌های مدل است [۱۴]. در مدل‌های دینامیکی، با افزایش نرخ تزریق، یا با افزایش کسری از مایعات تزریقی، مطابق با مشاهدات آزمایشگاهی، تولید فوم نشان بررسی شده است [۱۱]. مدل مکانیکی، تحرک گاز را بر اساس بافت فوم اصلاح و خصوصیات فیزیکی فوم را با غلظت فیلم‌های نازک ارائه می‌کند. الگوهای موازنه جمعیت به دو گروه تقسیم می‌شوند. نسخه کاملاً فیزیکی و نسخه تعادل محلی. تفاوت اصلی بین این دو مدل در نحوه به‌دست آوردن بافت فوم است. نسخه کاملاً فیزیکی بافت فوم را با حل‌های عددی به‌دست می‌آورد؛ اما در نسخه تعادل محلی معادلات به‌صورت جبری حل می‌شوند. به‌دست‌آوردن مؤلفه‌های مدل بر اساس آزمایش یکی از اصلی‌ترین چالش‌های مدل‌سازی جریان فوم است. به‌عنوان مثال، برخی از مدل‌ها دارای ویژگی‌های مختلفی از عملکرد فوم هستند؛ اما از طرف دیگر، تعداد زیاد مؤلفه‌ها مانع از کاربرد آن‌ها می‌شود. در مدل‌سازی مکانیکی، بافت فوم برای نشان دادن کاهش تحرک، مؤلفه مهمی محسوب می‌شود. در این روش، تعداد فیلم‌های نازک (بافت فوم) در واحد حجم با حل یک معادله دیفرانسیلی یا جبری حساب می‌شود و پس از تعیین بافت فوم، تحرک گاز با ارتباط دادن تعداد فیلم‌های نازک به نفوذپذیری نسبی یا گرانشی فوم اصلاح می‌شود. در میان نسخه کاملاً فیزیکی و نسخه تعادل محلی مدل موازنه جمعیت،

فشار جدایش یکی از عوامل مهم در تعیین پایداری یا ناپایداری فوم است؛ طبق نظریه DLVO انرژی متقابل بین دو ذره کلئیدی، نتیجه نیروهای جاذبه و دافعه است. برای فوم نیروهای بین مولکولی درون فیلم واقع شده است. حضور سورفکتانت‌های یونی در سطح فوم یک سطح باردار را ایجاد می‌کند که توزیع یون‌های مجاور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یون‌هایی با بار مخالف، جذب و یون‌هایی با بار مشابه دفع می‌شوند؛ در نتیجه یک لایه دوگانه الکتریکی به وجود می‌آید. نیروهای دافعه از نازک شدن غشا جلوگیری می‌کنند. فشار خالص اعمالی بر واحد سطح در فیلم مایع به فشار جدایش Π که به‌صورت زیر تعریف می‌شود، برمی‌گردد:

$$\Pi = \pi_A + \pi_R + \pi_S \quad (3)$$

که π_A فشار جاذبه است که به‌وسیله نیروهای جاذبه مولکولی یا نیروهای واندروالس به‌وجود می‌آید، π_R فشار دافعه است که ناشی از نیروهای دافعه هستند و π_S که به‌سبب نیروهای ساختاری که نتیجه هم‌پوشانی لایه‌های مرزی است به‌وجود می‌آید. فشار جدایش می‌تواند مقادیر مثبت و منفی داشته باشد. π_S و π_R (نیروهای دافعه) بر روی فشار جدایش اثر مثبت دارند؛ در حالی که نیروهای جاذبه واندروالس فشار جدایش را کاهش می‌دهند. اگر فشار جدایش مثبت باشد، دو سطح از هم جدا شده، فیلم پایدار باقی می‌ماند. مؤلفه‌های مختلفی مثل نوع سورفکتانت و غلظت آن، شوری و pH بر فشار جدایش اثر می‌گذارند [۱۹].

۵. تکنیک‌های مدل‌سازی جریان فوم

بسیاری از شبیه‌سازهای مخزن (ECLIPSE، UTCHEM، STARS) از رویکرد اختلاف محدود ترکیبی استفاده می‌کنند تا موازنه مواد را از راه معادلات بقای جرم و تکانه، براساس قانون داری بررسی کنند. قانون داری:

$$u_g = -\frac{k k_{rg} \nabla P_g}{\mu_g} \quad (4)$$

u_g سرعت داری گاز، k نفوذپذیری مطلق، k_{rg} نفوذپذیری نسبی

1. Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO)

۵-۱-۱ رویکرد تعادل محلی

حل معادلات با روش موازنه جمعیت به صورت عددی هزینه محاسبات و چالش‌های عددی زیادی را بر شبیه‌سازهای مخزن اعمال می‌کند. بنابراین، برخی از محققان روش تعادل محلی را برای به دست آوردن بافت فوم پیشنهاد دادند. این مدل به عنوان تابعی جبری از متغیرهایی بر اساس قانون دارسی و معادلات بقای جرم به دست می‌آید. نسخه تعادل محلی بر اساس این فرض است که تولید و انسجام فوم در محیط متخلخل نسبتاً سریع انجام می‌شود و تعادل دینامیکی در بافت فوم از برابری نرخ تولید محلی فوم (R_g) و تخریب آن (R_c)، حاصل می‌شود. این نسخه نسبت به رویکرد بافت دینامیکی (یا کاملاً فیزیکی) به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد و استفاده از آن با چالش‌های عددی کمتری همراه است. مدل‌های ارائه شده این رویکرد به صورت زیر است [۱۰] (جدول (۱)).

۵-۱-۲ رویکرد کاملاً فیزیکی یا بافت دینامیکی

در این روش معادله دیفرانسیل ارائه شده (معادله (۳))، برای به دست آوردن بافت فوم به صورت عددی حل می‌شود (به عنوان مثال، روش اختلاف محدود^۳). با این حال، دشواری در تخمین برخی از مؤلفه‌های با داده‌های سیلاب‌زنی و میدانی، استفاده از این روش را در عمل محدود کرده است. هم‌چنین، حل معادله موازنه جمعیت به صورت عددی هزینه محاسباتی را برای شبیه‌سازهای مخزن اضافه می‌کند و چالش‌های عددی دیگری را به همراه می‌آورد. بنابراین، برخی از محققان روش‌های تعادل محلی یا روابط جمعیت حباب^۴ را برای به دست آوردن بافت فوم به عنوان تابعی جبری از متغیرهایی که از راه قانون دارسی و معادلات بقای جرم به دست می‌آیند، پیشنهاد کردند [۱۰]. مدل‌های ارائه شده با رویکرد بافت دینامیکی، روابطی را به صورت توابع تولید (R_g) و تخریب حباب (R_c)، اصلاح گرانیوی (μ_g^f) و نفوذپذیری نسبی (K_{rg}^f) به شرح زیر ارائه داده‌اند (جدول (۲)).

۵-۲ مدل تجربی یا تعادل محلی بافت - ضمنی^۵

در مدل‌های تجربی (تعادل محلی) هدف تعیین رابطه میان بافت فوم و تحرک‌پذیری نیست؛ بلکه تحرک فاز گاز بر اساس نتایج

نسخه تعادل محلی دارای چالش‌های عددی کمتری است و به زمان محاسباتی کمتری نیاز دارد. اگرچه هر دو مدل نتایج مناسبی را برای فرایند اختلاط فوم نشان می‌دهند؛ اما انعقاد و پوسیدگی^۱ فوم در لبه بانک فوم^۲ نمی‌تواند در طول سناریوی SAG با نسخه تعادل محلی مدل شود. از آنجایی که به دست آوردن مؤلفه‌های مدل مکانیکی از آزمایش‌ها دشوار است و نیاز به زمان محاسبات طولانی دارد، مدل تجربی یکی از موارد برتر است؛ اگرچه ثابت شده است که هر دو مدل مطابقت دقیقی با نتایج آزمایشگاهی دارند [۱۵]. بیشتر مدل‌های موازنه جمعیت بر پایه ایجاد فیلم نازک با تکرار سازوکار snap-off پایه‌ریزی شده‌اند که می‌تواند حاکی از غالب بودن این سازوکار باشد. برای تولید فوم با سازوکار Snap-off نسبت ابعاد گلوله‌ها به بدنه منافذ، برای فعال شدن این سازوکار مهم است [۱۱]. رویکرد حالت پایدار محلی تا زمانی معتبر است که فوم به سرعت به حالت پایدار محلی در مقیاس زمان و طول جابه‌جایی برسد. راسن و همکاران [۲۱] نشان دادند که در برخی موارد، حتی در مقیاس مغزه، شبیه‌سازی موازنه جمعیت را می‌توان تقریباً با روش‌های جریان کسری (به عنوان مثال فرض حالت پایدار محلی) تقریباً به طور برابر انجام داد. مدل موازنه جمعیت، معادله بقای چگالی حباب‌های جاری، n_f را به یک شبیه‌ساز چند فاز اضافه می‌کند.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varphi(S_{gf}n_f + S_{gt}n_f)) + \nabla \cdot (u_g n_f) = \varphi S_g (r_g - r_c) + Q_b \quad (5)$$

$$S_{gf} = X_f S_g = (1 - X_t) S_g, \text{ and } S_{gt} = X_t S_g \quad (6)$$

که در آن عبارت $\frac{\partial}{\partial t} (\varphi(S_{gf}n_f + S_{gt}n_f))$ انباشت حباب‌های جاری و به دام افتاده و $\nabla \cdot (u_g n_f)$ شار حباب‌های جاری است. $\varphi S_g (r_g - r_c)$ معرف تولید خالص است و Q_b نرخ تولید حباب است. S_{gf} اشباع گازهای جاری، n_f چگالی حباب‌های فوم بر حجم گازهای جاری (m^{-3})، S_{gt} اشباع گازهای به دام افتاده، u_g سرعت دارسی گاز، S_g اشباع گاز، r_g دبی تولید فوم ($m^{-3}s^{-1}$)، r_c دبی تخریب فوم ($m^{-3}s^{-1}$)، X_f کسر فوم های جاری، X_t کسر فوم‌های به دام افتاده می‌باشد. در ادامه به توضیح دو رویکرد مدل تعادل جمعیت پرداخته می‌شود.

3. Finite-Difference
 4. Bubble Population Correlations
 5. Implicit-Texture Local-Equilibrium Models

1. Decay
 2. Foam Bank Edge

جدول ۱. مدل‌های ارائه‌شده رویکرد تعادل محلی.

Table 1. Proposed models of local equilibrium approach.

Model number	Modification K_{rg}^f and/or μ_g^f	Calculation of foam texture	Reference
(1-1) Hatzivramidis et al. model	$k_{rg}^f = k_{rg} \times X_f$ $\mu_g^f = \mu_g + An_{b\infty} D_p^3 \left(\frac{\sigma}{\mu_w u_g}\right)^{a_m} \mu_w$ if, $ \nabla p > \nabla p _{crit}$	$n_{b\infty} = \frac{K_g}{K_d} u_g^{a_n}$	Hatzivramidis et al. (1995)
(1-2) Bertin et al. model	$\mu_g^f = \mu_g + \frac{\alpha n_f}{v_g^{\frac{1}{3}}}$	$n_f = \left(\frac{180(1-\phi)^2}{\phi^3} k\right)^{\frac{3}{2}} S_g X_f \left(\frac{P_c - P_c(S_w)}{P_c(S_w)}\right)$	Bertin et al. (1998)
(1-3) kovscek and Bertin model	$\frac{k_{rg}^f}{\mu_g^f} = \psi_1 \frac{k_{rg}^{1-2g\eta} \nabla p ^{g\eta} v_f^{\frac{1}{3}}}{P_c n_f^{1+g\eta}}$ $\frac{k_{rg}^f}{\mu_g^f} < \frac{k_{rg}}{\mu_g}$	$n_f = \psi_2 \left[\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2 k}\right]^{\frac{3}{2}} \left(\frac{P_c^* - P_c}{P_c}\right)^2 \left(\frac{v_w}{v_f^{\frac{2}{3}}}\right)$ if $P_c < P_c^*$ $n_f = 0$ if $P_c > P_c^*$	kovscek and Bertin (2003)
(1-4) Kam et al. model	no change in k_{rg}^f or $k_{rg}^f = k_{rg}^0 \left(X_f \frac{1 - S_w - S_{gr}}{1 - S_{wc} - S_{gr}}\right)^g$ $\mu_g^f = \mu_g + \frac{C_f n_f}{u_g^{\frac{1}{3}}}$ or $\mu_g^f = \mu_g + \frac{C_f n_f}{\left[\frac{u_g}{(\phi S_g X_f)}\right]^{\frac{1}{3}}}$	$n_f = \left(\frac{C_g}{C_c}\right) (\nabla p)^m (S_w - S_w^*)^n$ or $n_f = \left(\frac{C_g}{C_c}\right) (S_w - S_w^*)^n S_w (\nabla p)^m$ or $n_f = \frac{C_g}{2C_c} \left(\frac{S_w - S_w^*}{S_w}\right)^n \left[\text{erf}\left(\frac{\nabla p - \nabla p_0}{\sqrt{2}}\right) - \text{erf}\left(\frac{-\nabla p_0}{\sqrt{2}}\right)\right]$ if $n_f < n_{fmax}$	Afsharpoor et al. (2010), Dholkawala et al. (2007), Kam(2008), kam & Rossen(2003), Roostapour and kam (2013)
(1-5) Li et al. model	$k_{rg}^f = k_{rg}^0 \left(\frac{S_g - S_{gr}^f}{1 - S_{gr}^f}\right)^g$ $\mu_g^f = \mu_g F_g C_{nf} n_f \left(\frac{u_g}{u_{ref}}\right)^{n-1}$ if $\mu_g^f > \mu_g$ $\mu_g^f = \mu_g$, if $\mu_g^f \leq \mu_g$	$n_f = C_{nf} \left(\frac{S_g}{S_{gm}}\right)^m$ if $0 \leq S_g \leq S_{gm}$; $n_f = C_{nf}$ if $S_{gm} < S_g \leq (S_g^* - \epsilon)$; $n_f = C_{nf} \left(\frac{S_g^* + \epsilon - S_g}{\epsilon^2}\right)$ if $(S_g^* - \epsilon) < S_g \leq (S_g^* + \epsilon)$; $n_f = 0$ if $S_g > (S_g^* + \epsilon)$	Li et al. (2006)
(1-6) chen et al. model	$k_{rg}^f = k_{rg}^0 \left(\frac{X_f S_g}{1 - S_{wc}}\right)^g$ $\mu_g^f = \mu_g + \frac{\alpha n_f}{ v_f ^{\frac{1}{3}}}$	n_f is obtained solving $n_f^\omega + \frac{n^{*\omega} k_{-1} v_f ^{\frac{3}{2}}}{k_1^0 v_m } n_f - n^{*\omega} = 0$	chen et al. (2010)

جدول ۲. مدل های ارائه شده رویکرد بافت دینامیکی.

Table 2. Proposed models of dynamic texture approach.

Model number	Modification K_{rg}^f and/or μ_g^f	Bubble coalescence and Generation function	Reference
(2-1) Falla et al. model	$K_{rg}^f = K_{rg} \times X_f$ $\mu_g^f = \mu_s + G\sigma n_f r / v_g$	$R_g - R_c = \frac{n_n}{\frac{a}{P_c^* - P_c} + \frac{L_p}{v_g}}, \text{ if}$ $P_c < P_c^* \text{ and } t_{form} < t_{conv}$	Falla et al. (1998)
(2-2) chang et al. model	$K_{rg}^f = \frac{K_{rg}}{1 + bS_g} \text{ for left behind}$ $K_{rg}^f = K_{rg} \times X_f \text{ for flowing foam}$ $\mu_g^f = \mu_g K_3 n_f k^{1.5} \left(\frac{U_{ref3}}{ U_g } \right)^{c3}, \text{ if}$ $\mu_g^f > \mu_g \text{ for flowing foam}$ $\mu_g^f = \mu_g, \text{ if } \mu_g^f \leq \mu_g$	$R_g - R_c = 0, \text{ otherwise.}$ $R_g = K_1 \left[1 + \left(\frac{n_f}{n_c} \right)^{e_1} \right]^{-1} \left(\frac{ u_g }{U_{ref1}} \right) \text{ if } \frac{v_g}{v_{gc}} \geq 1$ $R_g = 0, \text{ otherwise}$ $R_c = k_2 n_f \left(\frac{C_{sref}}{C_s} \right)^{e_2} \left(\frac{ u_g }{U_{ref2}} \right)^{c_2}$	chang et al. (1990)
(2-3) Friedmann et al. model	$k_{rg}^f = k_{rg} \times X_f$ $\mu_g^f = \mu_g F_g k^2 n_f \left(v_g / v_{ref} \right)^{n-1}, \text{ if}$ $\mu_g^f > \mu_g$ $\mu_g^f = \mu_g, \text{ if } \mu_g^f \leq \mu_g$	$R_g = k_1 \left[\frac{1 - \left(\frac{v_g}{v_c - 1} \right)}{1 + 10 \left(\frac{v_g}{v_c - 1} \right)} \right] \times \left[1 + \left(\frac{n_f}{n_c} \right)^5 \right]^{-1}$ $\text{if } \frac{v_g}{v_c} \geq 1;$ $R_g = 0, \text{ otherwise}$ $R_c = k_2 n_f C_s^{-1/4}$	Friedmann et al. (1991)
(2-4) Ettinger and Radke model	$k_{rg}^f = k_{rg}^0 \left(\frac{X_f S_g}{1 - S_w} \right)^g$ $\mu_g^f = \mu_g + An_f d_b^3 \left[\frac{\sigma}{\mu_w u_g} \right]^{1/3} \mu_w$	$R_g = k_1 u_g^m$ $R_c = k_{-1} u_g^n n_f$	Ettinger and Radke (1992)
(2-5) kovscek et al. model	$k_{rg}^f = k_{rg}^0 \left(\frac{X_f S_g}{1 - S_{wc}} \right)^g$ $\mu_g^f = \mu_g + \frac{\alpha n_f}{v_f^c}$	$R_g = k_1 v_w v_f^{1/3} \text{ where } k_1 \text{ is constant or}$ $k_1 = k_1^0 \left[1 - \left(\frac{n_f}{n^*} \right)^w \right]$ $R_c = k_{-1} (C_s, P_c) v_f n_f \text{ or}$ $R_c = k_{-1}^0 \left(\frac{P_c}{P_c^* - P_c} \right)^2 v_f n_f$	Chen et al. (2010), kovscek et al. (1995)
(2-6) Myers and Radke model	$k_{rg}^f = k_{rg}^0 \left(\frac{X_f S_g}{1 - S_{wc}} \right)^g$ $\mu_g^f = \mu_g + \frac{\alpha n_f}{v_f^{1/3}}$	$R_g = k_1 v_f^a v_w^b$ $R_c = k_{-1} \left(\frac{P_{c_{gw}}}{P_{c_{gw}}^* - P_{c_{gw}}} \right)^2 v_f n_f \text{ without oil;}$ $R_c = k_{-2} S_0 \left(\frac{\frac{\varepsilon P_{c_{pf}}}{P_{c_{pf}}^*}}{1 + \frac{\varepsilon P_{c_{pf}}}{P_{c_{pf}}^*}} \right) v_f n_f \text{ with oil}$	Myers and Radke (2000)
(2-7) kam et al. model	<p>no change in k_{rg}^f or</p> $k_{rg}^f = k_{rg}^0 \left(X_f \frac{1 - S_w - S_{gr}}{1 - S_{wc} - S_{gr}} \right)^g$ $\mu_g^f = \mu_g + \frac{C_f n_f}{u_g^{1/3}}$ <p>or</p> $\mu_g^f = \mu_g + \frac{C_f n_f}{\left[\frac{u_g}{\phi S_g X_f} \right]^{1/3}}$	$R_g = C_g (\nabla p)^m$ <p>or</p> $R_g = C_g S_w (\nabla p)^m$ $\text{or } R_g = \frac{C_g}{2} \left[\text{erf} \left(\frac{\sqrt{p} - \sqrt{p_0}}{\sqrt{2}} \right) - \text{erf} \left(\frac{-\sqrt{p_0}}{\sqrt{2}} \right) \right]$ $R_c = C_c n_f \left(\frac{S_w}{S_w - S_w^*} \right)^n \text{ if } S_w > S_w^*$	Afsharpoor et al. (2010), Dholkawala et al. (2007), Kam (2008), kam and Rossen (2003), Roostapour and kam (2013)
(2-8) Zitha and Du model	$\mu_g^f = 0 \text{ if } \tau \leq \tau_y;$ $\mu_g^f = \mu_g + k_1 u_g^{m-1} + k_2 \frac{\tau_y}{u_g} \text{ if } \tau > \tau_y$	$R_g = K_g (n_{\infty} - n)$ $R_c = K_d n$	Zitha and Du (2010)

آزمایش‌ها و مطالعات میدانی تغییر می‌یابد و نفوذپذیری نسبی گاز و گرانیروی مؤثر آن بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی و میدانی و فرضیات مدل اصلاح می‌شود. بسیاری از فرمول‌های ریاضی در این گروه بدون وابستگی به فیزیک جابه‌جایی فیلم نازک فوم که از اصول اولیه است، به دست آمده‌اند. تعداد مؤلفه‌ها در این مدل نسبت به نسخه‌های بافت دینامیکی مدل‌های موازنه جمعیت کمتر است و نیاز به زمان محاسبه کمتری در شبیه‌سازهای مخزن دارد؛ زیرا بافت فوم از راه حل عددی به دست نمی‌آید. از طرف دیگر مدل‌های فوم تجربی، اثر فوم را از راه یک عامل کاهش تحرک که برای کاهش نفوذپذیری نسبی فاز گاز استفاده می‌شود، بسته به غلظت سورفکتانت، اشباع نفت، عدد موئینگی و سایر عوامل بیان می‌کند. به دلیل سادگی و هم‌چنین قابلیت اطمینان، عباراتی از مدل فوم تجربی در شبیه‌سازهای مخزن تجاری مانند CMG-STARS گنجانده شده است و در صنعت نفت و گاز برای توصیف فوم بسیار کاربرد دارد. علاوه بر این، CMG-STARS یک شبیه‌ساز قوی‌تر در مدل‌سازی مخازن با ویژگی‌های زمین‌شناختی پیچیده در مقایسه با سایر شبیه‌سازهای EOR شیمیایی، مانند UTCHEM است. در مدل تجربی، همان‌طور که در شبیه‌ساز مخزن تجاری CMG-STARS نیز به کار می‌رود، جریان فوم به‌عنوان جریان گازی با تحرک پایین و گرانیروی معادل گاز تعریف می‌شود. این کار با تغییر نفوذپذیری نسبی گاز به وسیله فاکتور کاهش تحرک گاز (FM) که یک عدد بدون بعد است، انجام می‌شود. به این ترتیب، فرایندهای مکانیکی مختلفی در ارتباط با جریان فوم ایجاد می‌شود.

$$k_{rg}^f = k_{rg} * FM \quad (7)$$

$$FM = \frac{1}{1 + fmmob * F_1 * F_2 * F_3 * F_4 * F_5 * F_6 * F_7} \quad (8)$$

k_{rg}^f نفوذپذیری نسبی گاز در حضور فوم و k_{rg} نفوذپذیری گاز است. توابع F_1 تا F_7 در معادله فوق از نظر تجربی میزان غلظت سورفکتانت، اشباع نفت، سرعت جریان گاز (تأثیرات برشی و تولید فوم)، ترکیب نفت، شوری و به هم پیوستگی فوم یا خشک‌شدن که بر مقاومت فوم تأثیر می‌گذارد را حساب می‌کنند. این مؤلفه‌ها به‌طور خلاصه به شرح زیر بررسی می‌شوند.

۵-۲-۱ فاکتور تحرک فوم (fmmob)

یک مرجع یا فاکتور کاهش تحرک فوم است.

۵-۲-۲ اثر غلظت سورفکتانت (F1)

یک تابع نمایشی است که اثر غلظت سورفکتانت را نشان می‌دهد. این تابع با مؤلفه‌های fmsurf و epsurf کنترل می‌شود، درحالی‌که fmsurf غلظت سورفکتانت بحرانی است. به‌طور کلی، fmsurf به نوع سورفکتانت بستگی دارد و اصطلاح نمایشی epsurf یک مؤلفه است که برای تطبیق با داده‌های جریان فوم در غلظت‌های مختلف تنظیم می‌شود.

$$F_1 = \left(\frac{C_s}{fmsurf}\right)^{epsurf}, \quad 0 \leq C_s \leq fmsurf$$

$$F_1 = 1.0, \quad C_s > fmsurf \quad (9)$$

۵-۲-۳ اثر اشباع نفت (F2)

این تابع، کاهش استحکام فوم در حضور نفت را نشان می‌دهد. fmoil اشباع بحرانی نفت است، در جایی که $So > fmoil$ است، فوم پایدار نخواهد بود و از بین می‌رود. floil در مواقعی که کمتر از اشباع نفت باشد، موجود است و جایی که $So < floil$ باشد وجود نفت در نظر گرفته نمی‌شود.

$$F_2 = 1.0, \quad S_o \leq floil$$

$$F_2 = \left(\frac{C_s}{fmsurf}\right)^{epsurf}, \quad floil \leq S_o \leq fmoil \quad (10)$$

$$F_2 = 1.0, \quad S_o \geq fmoil$$

۵-۲-۴ اثر سرعت Shear-Thinning (F3)

این تابع نشان‌دهنده تأثیر روانه‌شناسی مقاومت فوم به‌عنوان یک سیال غیرنیوتونی است. Nc عدد موئینگی و fmcap عدد موئینگی مرجع است.

$$F_3 = \left(\frac{fmcap}{N_c}\right)^{epcap} \quad (11)$$

۵-۲-۵ اثر تولید فوم (F4)

این تابع شرط تولید یا انسجام فوم را مدل می‌کند. fmgcp عدد موئینگی بحرانی برای تولید فوم است.

$$F_6 = \left(\frac{W_s - flsalt}{fmsalt - flsalt} \right) epsalt \quad (14)$$

(F7) Foam Dry-Out ۸-۲-۵

این تابع با افزایش کیفیت فوم و افزایش استحکام فوم یا خشک شدن با پدیده فشار مؤینگی، تأثیر تغییرات در استحکام فوم را بررسی می کند. fmdry اشباع بحرانی آب و epdry مؤلفه تنظیم شیب هستند.

$$F_7 = 0.5 + \frac{\tan^{-1}[epdry(S_w - fmdry)]}{\pi} \quad (15)$$

مقادیر مختلفی از این مؤلفه ها باید با آزمایش تعیین شوند [۱۴]. در ادامه سایر مدل های ارائه شده تعادل محلی با بافت ضمنی آورده شده است [۱۰].

$$F_4 = 0, \quad N_c \leq fmgcp$$

$$F_4 = \left(\frac{N_c - fmgcp}{fmgcp} \right) epgcp, \quad fmgcp \leq N_c \leq 2fmgcp \quad (12)$$

$$F_4 = 1.0, \quad N_c \geq 2fmgcp$$

(F5) اثر ترکیب نفت ۶-۲-۵

عملکرد F5 تأثیر ترکیب نفت بر فوم را نشان می دهد. fmomf کسر بحرانی مولی نفت، X_o کسر مولی نفت و epomf توان تابع است.

$$F_5 = \left(\frac{fmomf - X_o}{fmomf} \right) epomf, \quad X_o < fmomf \quad (13)$$

$$F_5 = 0, \quad X_o \geq fmomf$$

(F6) اثر شوری ۷-۲-۵

تأثیر شوری فاز آبی بر استحکام فوم از راه تابع F6 در نظر گرفته می شود که در آن W_s کسر مولی جزء نمک (شوری) است، flsalt کم ترین حد مقدار کسر مولی نمک و fmsalt مقدار بحرانی کسر مولی نمک است.

جدول ۳. مدل های ارائه شده تعادل محلی - بافت ضمنی.

Table 3. Presents the models of local equilibrium-implicit texture.

Model number	Model discription	Reference
(3-1) Marfoe et al.model	$\mu_g^f = \mu_g [1 + RC_s(S_w - S_{wc})f(u_g)]$	Marfoe et al.(1987)
(3-2) Islam and Ali model	$\mu_g^f = \frac{\mu_g [1 + Df_c(C_s)(S_w - S_{wc})f_k(K) + f_p(\nabla p)]}{1 + ES_0^2}$	Islam and Ali (1990)
(3-3) chang et al. model	$\frac{kk_{rg}^f}{\mu_g^f} = (k_1 f_g + k_2 v_g^n) [1 + k_3 C_s(S_w - S_{wr})] [1 + k_4 (S_o - S_{or})]$	chang et al. (1990)
(3-4) Robert and Mack model	$\frac{kk_{rg}^f}{\mu_g^f} = \max \left(0, -\frac{u_w + u_g}{k \nabla p} - \frac{k_{rw}}{\mu_w} \right)$ $k_{rg}^f = k_{rg} * FM$	Robert and Mack (1997)
(3-5) Mohammadi et al. model	$FM = \left[1 + \frac{\nabla p_{foam}}{\nabla p_{no-foam}} \left(\frac{C_s}{C_s^{max}} \right)^{e_s} \right]^{-1}$	Mohammadi et al.(1995)
(3-6) Fixed Pc* model	$\nabla p = u_w \frac{\mu_w}{kk_{rw}^*}$ where $k_{rw}^* = k_{rw}(S_w) _{S_w=S_w^*}$	Marfoe et al.(1987)
(3-7) Rossen et al. model	if $S_w < (S_w^* - \varepsilon)$ or $C_s < C_s^0$, then $k_{rg}^f = k_{rg}$ if $(S_w^* - \varepsilon) \leq S_w \leq (S_w^* + \varepsilon)$ and $C_s = C_s^0$, then $k_{rg}^f = \frac{k_{rg}}{1 + \frac{(R-1)(S_w - S_w^* + \varepsilon)}{2\varepsilon}}$ if $S_w > (S_w^* + \varepsilon)$ and $C_s \geq C_s^0$, then $k_{rg}^f = \frac{k_{rg}}{R}$ R is constant or $R = R_{ref} \left(\frac{u_g}{u_{gref}} \right)^{\sigma-1}$ S_{gr} is constant or $S_{gr} = S_{gr}(\nabla p)$ $k_{rg}^f = k_{rg} * F$	Islam and Ali (1990)
(3-8) vassenden and Holt model	$F = \exp[(S_f - S_w)S_1] + \left(\frac{u_g}{u_{g0}} \right) F_0 \exp[(S_f - S_w)S_2]$ when $S_f \geq S_f$ $F = 1$ when $S_w < S_f$	chang et al. (1990)
(3-9) Stars model	$k_{rg}^f = k_{rg} * FM$ $FM = \frac{1}{1 + fmmob * F_1 * F_2 * F_3 * F_4 * F_5 * F_6 * F_7}$	chang et al. (2000), Computer Modelling Group (2011), Fjeldskaar (2008), Martinsen (1999), Namdar Zanganeh et al. (2011).

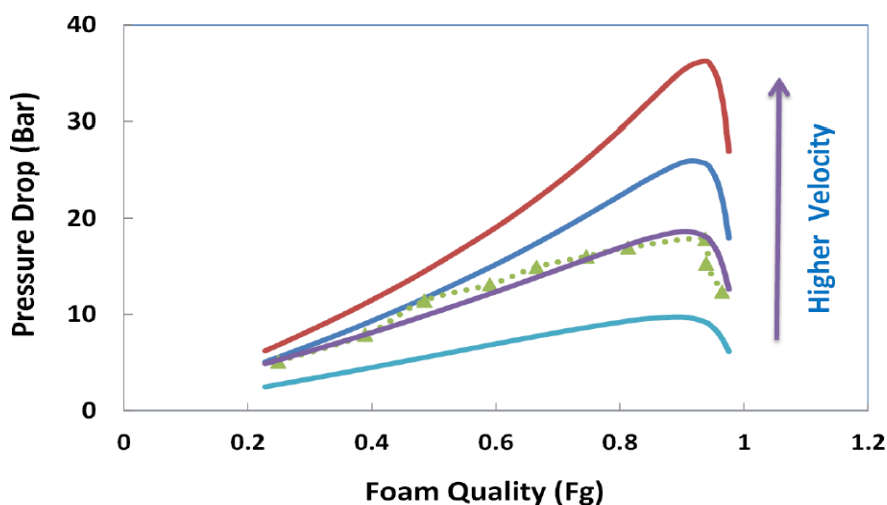
۶. مطالعات موردی در خصوص تزریق فوم

در یک مطالعه، سیلاب‌زنی فوم در آزمایشگاه با تزریق کربن‌دی‌اکسید و سورفکتانت آلفا الیفین سولفونات^۱ همراه با آب نمک حاوی ۳ درصد وزنی کلرید سدیم انجام گرفت. مؤلفه‌های مربوط به خصوصیات سنگ و سیال در جدول (۴) آورده شده است. نتایج حاصل از این آزمایش در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده است [۲۳].

جدول ۴. مؤلفه‌های مربوط به سنگ و سیال [۲۳].

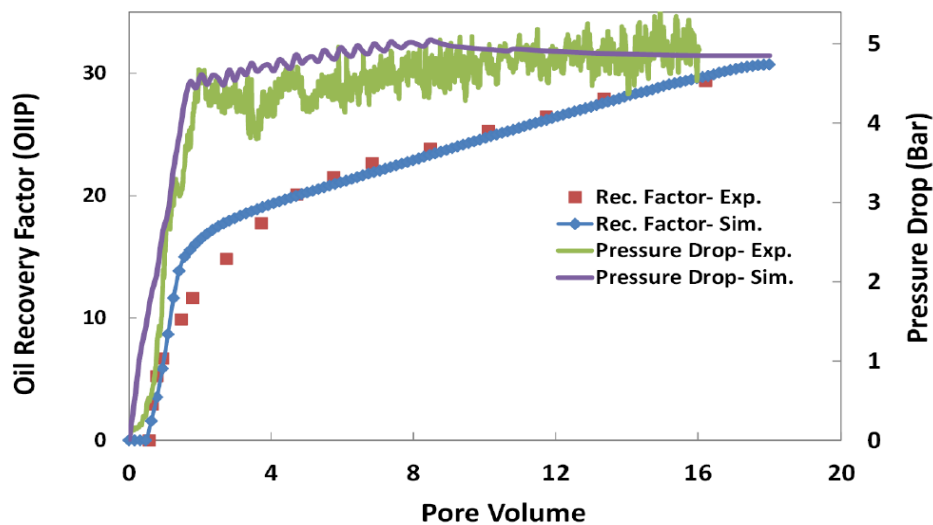
Table 4. Rock and fluid parameters[23].

Prosity	0.25
Brine permeability	2.3(Darcy)
Brine viscosity	1.0 (cp)
Gas viscosity	0.01744-0.01832 (cp)
Water relative permeability endpoint	0.25
Gas relative permeability endpoint	0.76



شکل ۷. نمودار افت فشار برحسب کیفیت فوم [۲۳].

Figure 7. Diagram of pressure drop versus foam quality[23].



شکل ۸. نمودار ضریب بازیافت نفت بر حسب میزان تزریق [۲۳].

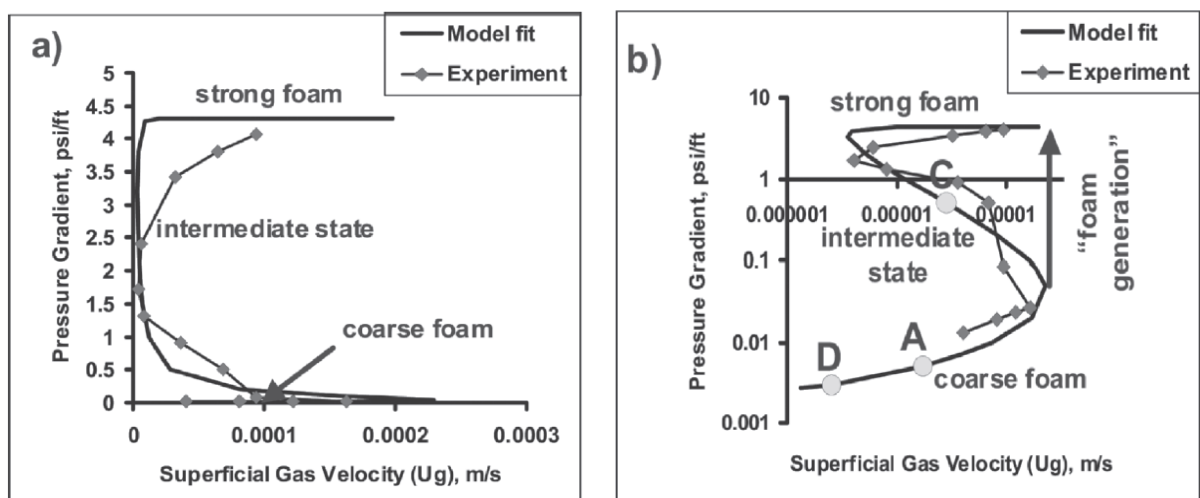
Figure 8. Diagram of oil recovery coefficient versus injection rate[23].

نشان می‌دهد. هر دو نمودار گرادیان فشار را بر حسب سرعت سطحی گاز نشان می‌دهند؛ اما نمودار (a) در مختصات کارتزین و نمودار (b) در حالت لگاریتمی است. داده‌های گرفته شده «تولید فوم» را در نقطه‌ای که فوم درشت تبدیل به فوم قوی می‌شود، با جهش در گرادیان فشار (تغییر جهت نمودار لگاریتمی بعد از حالت coarse foam) نشان داده‌اند، هم‌چنین سه حالت پایدار احتمالی را نشان می‌دهد: (۱) حالت فوم درشت: جایی که سایز حباب‌ها (در صورت وجود) بزرگ، بافت فوم (nf) کوچک، تحرک گاز نسبتاً زیاد و گرادیان فشار کوچک است. (۲) حالت فوم قوی: دارای حباب‌های کوچک، بافت فوم (nf) بزرگ، تحرک کم گاز و گرادیان فشار زیاد است. (۳) یک حالت متوسط بین دو حالت قبلی: گاگلیتز دریافت که کنترل کردن این حالت متوسط دشوار است و به‌نظر ناپایدار می‌رسد. مطابق این شکل در ابتدا با شروع تزریق به‌صورت دبی ثابت، کاهش سرعت سطحی گاز با افزایش گرادیان فشار مشاهده شده است. در این حالت فوم ضعیف یا coarse foam خواهد بود. بعد از عبور از این مرحله سیال به یک حالت میانی می‌رسد که سرعت سطحی گاز با وجود افزایش گرادیان فشار بسیار کم می‌شود (ساختار فوم در حال شکل‌گیری است)؛ اما بعد از رسیدن به گرادیان فشار خاصی افزایش سرعت سطحی گاز مشاهده می‌شود. این حالت زمانی است که فوم قوی شکل گرفته است [۱۱].

با داده‌های گرفته‌شده از آزمایش با شرایط فوق، تطابق تاریخی افت فشار بر حسب کیفیت فوم انجام شده است. تطبیق داده‌های آزمایشگاهی به‌خوبی دو رژیم جریان با کیفیت بالا و پایین را نشان داده است؛ که در رژیم با کیفیت پایین با افزایش گرادیان فشار (یا افزایش چگالی فوم) کیفیت آن هم افزایش می‌یابد. نقطه عطفی در نمودار مشخص است که fg^* است؛ بعد از عبور از این نقطه به‌دلیل غالب شدن مکش موئینه، پارگی فیلم‌های نازک و در نتیجه کاهش گرادیان فشار اتفاق می‌افتد.

مدل‌سازی جریان فوم برحسب داده‌های آزمایشگاهی منطبق با شرایط جدول (۴) در نرم‌افزار STARS انجام شده است. مقایسه محاسبات عددی و افت فشارهای اندازه‌گیری شده و ضریب بازیافت در طول سیلاب‌زنی با فوم در شکل (۸) نشان داده شده است. مؤلفه‌های سنگ و سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی فوق در نرم‌افزار STARS انجام شده است. در ابتدا پس از گذشت مدت زمانی از تزریق، ضریب بازیافت هم‌زمان با افزایش افت فشار با شیب نسبتاً زیادی افزایش می‌یابد تا به یک حد ثابتی برسد و بعد از آن با افزایش حجم تزریق ضریب بازیافت و افت فشار ثابت شده است. در ادامه شبیه‌سازی دینامیکی با تزریق متناوب پایدار گاز و مایع با استفاده از یک مدل تعادل جمعیت اصلاح‌شده از کام و راسن [۱۱] تشریح شده است.

شکل (۹) تطبیق داده‌های مدل‌سازی را با داده‌های آزمایشگاهی



شکل ۹. تطبیق دادن داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های مدل‌سازی [۱۱].

Figure 9. Matching experimental data with modeling data [11].

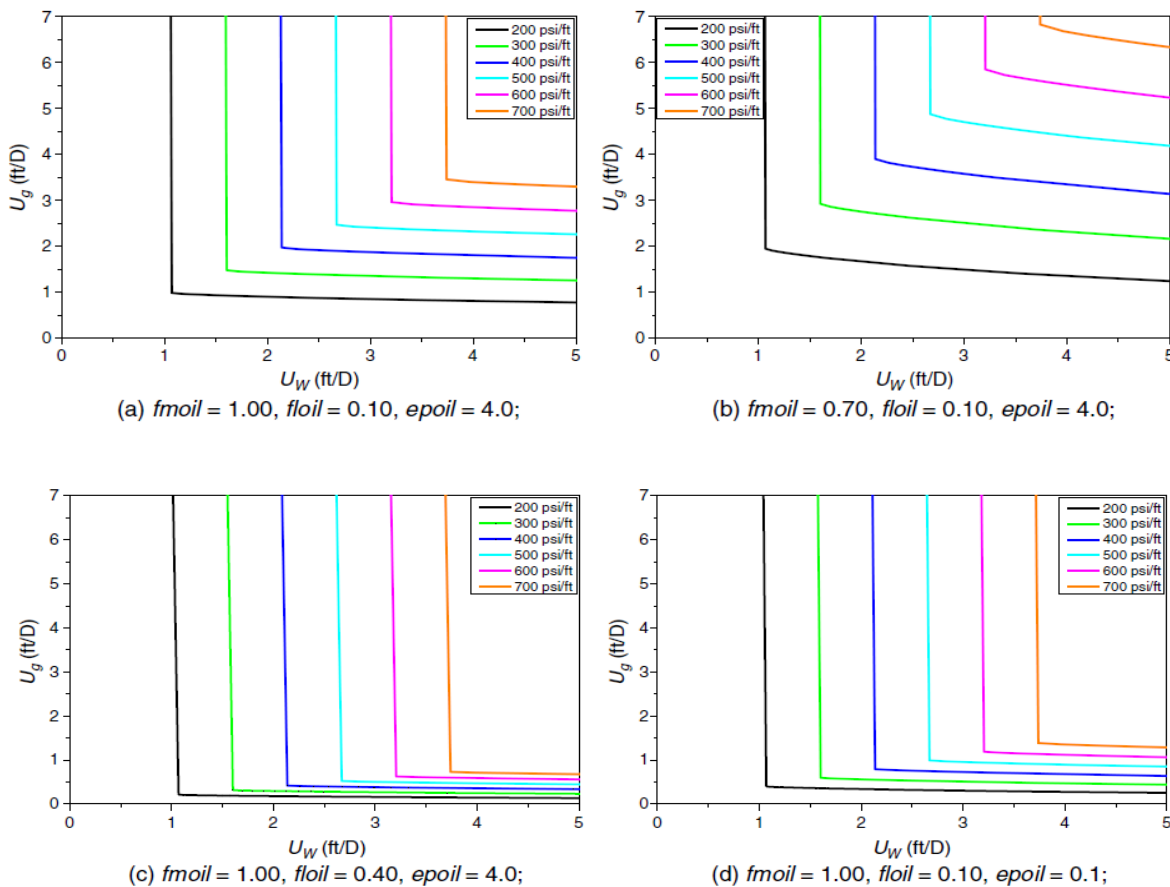
به‌عنوان تابعی از سرعت‌های سطحی گاز و آب رسم شده‌اند. در این مدل‌سازی (تبادل محلی (LE)) دو رژیم جریان در حضور نفت به‌خوبی مشخص شده است. کانتورهای عمودی رژیم با کیفیت بالا و کانتورهای افقی رژیم با کیفیت بالا را مشخص می‌کنند. خطوط افقی نزدیک به هم با تغییر مؤلفه‌های مربوط به نفت به سمت بالا و پایین کشیده شده‌اند؛ اما خطوط در رژیم با کیفیت بالا با تغییر مؤلفه‌های مدل بدون تغییر باقی می‌مانده‌اند.

۶-۱ تجزیه حساسیت مربوط به داده اشباع نفت در مدل‌سازی جریان فوم با نرم‌افزار STARS مدلی مطابق با شرایط جدول (۵) در شبیه‌ساز STARS انجام شده است. شکل (۱۰) چگونگی عملکرد فوم را در اشباع ثابت نفت در مدل فوم مرطوب^۱ وقتی مؤلفه‌های مربوط به نفت، fmoil، floil و epoil متفاوت باشد را نشان می‌دهد. نمودارهای فوق بر اساس افت فشار

جدول ۵. خصوصیات سنگ و سیال و مؤلفه‌های مدل فوم.

Table 5. Characteristics of rock and fluid and parameters of foam model.

fmmob	fmdry/sfdry	epdry/sfbet	K(darcy)	ϕ	$\mu_w(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\mu_o(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\mu_g(\text{Pa}\cdot\text{s})$
54000	0.316	6000	1.3	0.3	$7.00 \cdot 10^{-4}$	$5.00 \cdot 10^{-3}$	$2.07 \cdot 10^{-5}$



شکل ۱۰. تجزیه حساسیت مربوط به داده‌های اشباع نفت در نرم‌افزار STARS [۱۸].

Figure 10. Sensitivity analysis of oil saturation data in STARS software [18].

جدول ۶. مؤلفه‌های بهینه‌شده مورد استفاده در مدل.

Table 6. Optimized parameters used in the model.

fmmob	epcap	epdry	fmdry
336990	3.160	1018	0.118

۷. چالش‌های انتخاب مدل و توسعه آن

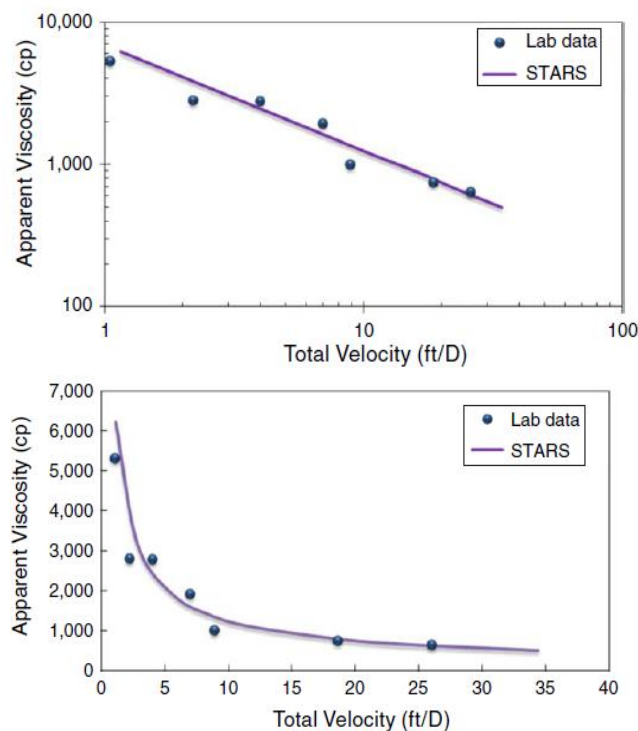
مدل‌های گوناگونی برای مدل‌سازی جریان فوم ارائه شده است؛ در روش موازنه جمعیت بافت فوم به صراحت کاهش تحرک گاز را بر اساس تولید و تخریب فیلم‌های نازک مبتنی بر معادلات بقا ارائه می‌کند؛ اما در روش تعادل محلی-بافت ضمنی به‌طور ضمنی اثرات بافت فوم از راه یک عامل کاهش تحرک گاز حساب می‌شود و به‌طور ضمنی فشار مویرگی محدودکننده با یک تابع انتقال شیب‌دار^۱ نشان داده می‌شود که نشان‌دهنده اثرات انعقاد^۲ بر ضریب کاهش تحرک است. این عامل کاهش تحرک باید از تعداد زیادی آزمایش به‌صورت موردی کالیبره شود تا اثر فیزیکی هر مؤلفه در نظر گرفته شده بر رفتار فوم مطابقت داشته باشد [۲۴].

۶-۲ تزریق فوم در یک بسته ستون عمودی ماسه‌ای با

نفوذپذیری بالا

شبیه‌سازی آزمایشگاهی حالت پایدار و ناپایدار سیلاب‌های فوم در یک بسته ستون عمودی ماسه‌ای با نفوذپذیری بالا در حالت‌های با و بدون نفت در غلظت‌های مختلف سورفکتانت و با سرعت‌های مختلف تزریق در دمای بالا (۹۴°C) انجام شده است. بسته ماسه سنگی دارای قطر داخلی ۰/۹ اینچ، طول ۱۵ اینچ، تراوایی ۴۴ داری و تخلخل ۰/۳۶ است. داده‌های حاصل از تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی با نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار STARS در شکل (۱۱) مقایسه شده است.

مطابق شکل (۱۱) گرانروی ظاهری فوم برحسب سرعت جریان کل در کیفیت فوم برابر با ۰/۷۵ رسم شده است. طبق روند نمودار، با افزایش سرعت جریان سیال گرانروی ظاهری کاهش یافته است که این حالت در مطالعات آزمایشگاهی و مدل‌سازی مشخص نتایج نشان می‌دهد که مدل شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار STARS تطبیق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی از خود نشان داده است. مؤلفه‌های بهینه‌شده با مدل‌سازی در نرم‌افزار در جدول (۶) آورده شده است.



شکل ۱۱. مقایسه داده‌های آزمایشگاهی با داده‌های شبیه‌سازی [۱۴].

Figure 11. Comparison of laboratory data with simulation data [14].

1. Steep Transition Function

2. Coalescence Effects

تعیین پایداری کف در تمام حالت‌های LE مهم است. فریدمن و همکاران جهش به فوم قوی را با یک مدل تعادل جمعیت تطبیق دادند که در آن ایجاد فیلم‌های نازک به فشاری بیشتر از حداقل گرادیان فشار نیاز دارد. اخیراً، تنها مدل‌هایی که حالت‌های چندگانه LE را برای فوم نشان می‌دهند از مدل تعادل جمعیت کام و راسن در جایی که تولید لاملاها به گرادیان فشار بستگی دارد متفاوت هستند. مدل کام، تنها مدل کف مکانیکی است که می‌تواند انواع داده‌های آزمایشی حالت پایدار از جمله حالت‌های پایدار چندگانه^۱ را در خود جای دهد. این مدل برای حل ناپایداری ذاتی حالت کف قوی از مدل مکانیکی قبلی اصلاح شده است [۲۵].

با توجه به مطالعات، استفاده از هر دو روش تطابق خوبی را با داده‌های آزمایشگاهی از خود نشان داده است. مقایسه‌های انجام گرفته، نشان می‌دهد که مدل تعادل محلی - بافت ضمنی به دلیل ماهیت تجربی آن کاربرد بیشتری دارد. تاکنون هیچ یک از مدل‌های ذکر شده در بخش تکنیک‌های مدل‌سازی جریان فوم نتوانسته است تمامی آزمایش‌های فوم را در شرایط مختلف تحلیل نمایند. مطالعات نشان داده‌اند که آزمایش‌های فوم پایدار نیتروژن و کربن دی‌اکسید می‌توانند با مدل‌های مختلف بافت ضمنی و تعادل جمعیت به خوبی منطبق شوند. یکی از اصلی‌ترین موضوعات برای انتخاب مدل، توجیه معادلات ریاضی و اندازه‌گیری مؤلفه‌های مورد استفاده در مدل‌ها به وسیله آزمایش است. به‌عنوان مثال، مدل فوم STARS بسیاری از ویژگی‌های رفتار فوم را در بر می‌گیرد. با این حال محدودیت‌هایی را با مقدار زیادی از مؤلفه‌ها ایجاد می‌کند. سؤال دیگر این است که آیا باید از نسخه بافت دینامیکی استفاده کرد یا نسخه تعادل محلی موازنه جمعیت. چنان که قبلاً نیز اشاره شد، نسخه تعادل محلی از نظر محاسباتی ارزان‌تر است و در مقایسه با نسخه بافت دینامیکی، ممکن است دارای مشکلات عددی کمتر و مؤلفه‌های مورد نیاز کمتری باشد. مقایسه بین آن‌ها نشان می‌دهد که به‌طور کلی برای شبیه‌سازی یک فرایند تزریق متناوب گذرا به جز عدم تطابق جزئی در منطقه ورودی^۲ تطبیق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی گزارش شده است.

۸. فهرست نمادها

n_{∞} = حداکثر چگالی حباب در مدل (۸-۲)

1. Multiple Steady States
2. Entrance Region

S_0^{lim} = حداکثر اشباع نفت که فوم دارد. در مدل (۲-۲)
 t_{conv} = زمان به‌وجود آمدن فیلم‌های نازک جاری در گلوگاه منافذ در مدل (۱-۲)

t_{exit} = زمان برای خروج فیلم نازک تازه شکل گرفته در مدل (۱-۲)
 t_{form} = زمان برای شکل‌گرفتن یک فیلم نازک به‌وسیله سازوکار Snapoff در مدل (۱-۲)

t_{so} = زمان برای تجمع مایعات کافی در گلوگاه یک مکان فعال در مدل (۱-۲)

v_f = سرعت بینابینی^۳ فوم جاری در مدل (۵-۲) و مدل (۶-۲)
 μ_s = گرانیوی گاز حاصل از جریان فوم از راه منافذ صاف و یکنواخت در مدل (۱-۲)

η = نماد نفوذ در مدل (۳-۳)

C = غلظت جرمی

C_s^{lim} = حد اقل غلظت سورفکتانت برای در مدل (۲-۲)

f_{udry} = بالاترین حد اشباع آب در تابع F_w^k در مدل (۱-۲)

L_p = طول مشخصه انقباض حفره در مدل (۱-۲).

n^* = محدودکننده بافت فوم در مدل (۵-۲).

$n_{b\infty}$ = چگالی تعادلی عدد حباب در مدل (۱-۳).

n_c = چگالی بحرانی حباب که بالاتر از آن دبی تولید در مدل (۲-۲)

به صفر می‌رسد، چگالی حباب را در مدل محدود می‌کند (۳-۲).

nL = تعداد فیلم نازک در واحد طول در مدل (۱-۲)

n_n = تعداد جاهای فعال snap-off در واحد حجم در مدل (۱-۲)

مراجع

- [1] Gbadamosi, A. O., Junin, R., Manan, M. A., Agi, A., Yusuf, A. S., "An overview of chemical enhanced oil recovery: recent advances and prospects", *International Nano Letters*, pp. 171-202, (2019).
- [2] Farajzadeh, R., Bertin, H., Rossen, W. R., "Editorial to the Special Issue: Foam in Porous Media for Petroleum and Environmental Engineering—Experience Sharing", *Transport in Porous Media*, 131(1), pp. 1-3, (2020).
- [3] Hosseini-Nasab, S., Douarche, F., Simjoo, M., "Integrated Method for Numerical Simulation of Foam Flooding in Porous Media in the Absence and Presence of Oil", in *SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia*. Society of Petroleum Engineers, (2018).

- [4] Zeng, Y., Kamarul Bahrim, R. Z., Groot, J. A. W. M., Vincent-Bonnieu, S., Groenenboom, J., Shafian, S. R. M., Abdul Manap, A. A., Tewari, R. D., Mohamadian, E., Azdarpour Hossein Hamidi, A., Biswal, S. L., Probing Methane Foam Transport in Heterogeneous Porous Media: An Experimental and Numerical Case Study of Permeability-Dependent Rheology and Fluid Diversion at Field Scale. *SPE Journal*, pp. 1697-1710, (2020).
- [5] Afzali, S., Rezaei, N., Zendehboudi, S., "A comprehensive review on enhanced oil recovery by water alternating gas (WAG) injection", *Fuel*, 227, pp. 218-246, (2018).
- [6] Mirkhoshhal, S. M., Karimi, A. M., "Experimental Investigation of stable foam formation and foam stability by the modified nanoparticles in", 9th International Conference on Oil, Gas, Refining and Petrochemicals with the approach of developing the relationship between the university government and industry, In Persian, (2019).
- [7] Simjoo, M., Zitha, P. L., New insight into immiscible foam for enhancing oil recovery, in *Flow and transport in subsurface environment*. Springer, pp. 91-115, (2018).
- [8] Shah, S. Y., Wolf, K. -H., Pilus, R. M., Rossen, W. R., "Foam generation by capillary snap-off in flow across a sharp permeability transition", *SPE Journal*, 24(01), pp. 116-128, (2019).
- [9] Skauge, A., Solbukken, J., Ormehaug, P. A., Gunner Aarra, M., "Foam generation, propagation and stability in porous medium", *Transport in Porous Media*, 131(1), pp. 5-21, (2020).
- [10] Ma, K., et al., "Modeling techniques for foam flow in porous media. *SPE Journal*", 20(03), pp. 453-470, (2015).
- [11] Kam, S. I., Kam, S. I., Nguyen, Q. P., Li, Q., Rossen, W. R., "Dynamic simulations with an improved model for foam generation", *SPE Journal*, 12(01), pp. 35-48, (2007).
- [12] Nguyen, Q. P., Nguyen, Q. P., Alexandrov, A. V., Zitha, P. L., Currie, P. K., "Experimental and modeling studies on foam in porous media: a review", in *SPE International Symposium on Formation Damage Control*. 2000. Society of Petroleum Engineers.
- [13] Shafiee, Y., "Experimental Investigation and modeling of performance of nanoparticles stabilized foams in porous media in" department of Oil and Gas, Sharif, Tehran, In Persian, (2018).
- [14] Abbaszadeh, M., et al., "Methodology for the development of laboratory-based comprehensive foam model for use in the reservoir simulation of enhanced oil recovery", *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 21(02), pp. 344-363, (2018).
- [15] Saeibehrouzi, A., Khosravi, M., Rostami, B., "Steps and Challenges in Empirical Foam Modeling for Enhanced Oil Recovery", *Natural Resources Research*, pp. 1-22, (2020).
- [16] Lee, W., Lee, S., Izadi, M., Kam, S. I., "Dimensionality-dependent foam rheological properties: how to go from linear to radial geometry for foam modeling and simulation", *SPE Journal*, 21(05), pp. 1,669-1,687, (2016).
- [17] Solbakken, J., "Experimental studies of N₂-and CO₂-foam properties in relation to enhanced oil recovery applications", Thesis of Ph. D., (2015).
- [18] Tang, J., Ansari, M. N., Rossen, W. R., "Quantitative modeling of the effect of oil on foam for enhanced oil recovery", *SPE Journal*, 24(03), pp. 1,057-1,075, (2019)..
- [19] Shafi Abadi, E., "Laboratory study of tertiary oil recovery by injecting foam from a porous medium with wet heterogeneity", in department of Chemical, Oil and Gas Engineering, Shiraz, In Persian, (2018).
- [20] Falls, A. H., Hirasaki, G. J., Patzek, T. W., Gauglitz, D. A., Miller, D. D., Ratulowski, T., "Development of a mechanistic foam simulator: the population balance and generation by snap-off", *SPE reservoir engineering*, 3(03), pp. 884-892, (1988).
- [21] Almajid, M.M. Kovscek, A. R., "Pore Network Investigation of Trapped Gas and Foam Generation Mechanisms", *Transport in Porous Media*, 131(1), pp. 289-313, (2020).
- [22] Ma, K., Mateen, Kh., Ren, G., Luo, H., Bourdarot, G., Morel, D., "Mechanistic Modeling of Foam Flow Through Porous Media in the Presence of Oil: Review of Foam-Oil Interactions and an Improved Bubble Population-Balance Model", in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers (2018).
- [23] Hosseini-Nasab, S., Hosseini-Nasaba, S. M., Douaracheb, F., M.Simjoo, M., Nabzarb, L., Bourbiaux, B., Zitha, P. L. J., Roggerob, F., "Numerical simulation of foam flooding in porous media in the absence and presence of oleic phase", *Fuel*, 225, pp. 655-662, (2018).
- [24] Gassara, O., Gassara, O., Douarache, F., Braconnier, B., Bourbiaux, B., "Calibrating and scaling semi-empirical foam flow models for the assessment of foam-based EOR processes (in heterogeneous reservoirs)", *Transport in Porous Media*, 131(1), pp. 193-221, (2020).
- [25] Ashoori, E., Marchesin, D., Rossen, W., "Stability of local-equilibrium foam states in EOR processes. in *SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*", 2011. Society of Petroleum Engineers.