



## جریان فوم در محیط متخلخل؛

## بررسی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی و اثر آنها بر بازیافت نفت

بانک مرادی، مهدی بحرینی، شرکت نفت مناطق مرکزی ایران

حامد نجاتیان دارایی، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده

به علت نسبت تحرک بالای بین گاز و اغلب نفت‌های خام در شرایط مخزن، سیلاب‌زنی با گاز دارای راندمان جارویی پایینی است. نیاز به کنترل تحرک گاز در طی سیلاب‌زنی با گاز منجر به مطالعه تزریق فوم شد که شامل تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی، تزریق متناوب گاز و ماده فعال سطحی و یا تزریق فوم پیش آماده است. با توجه به شرایط مخزن، نوع تزریق متفاوت خواهد بود. با این حال، تزریق هم‌زمان ماده فعال سطحی و گاز، بیشتر مورد علاقه محققان قرار گرفته است. در این مقاله، به بررسی جریان هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی در محیط متخلخل پرداخته شده و نتایج آزمایشگاهی و میدانی به دست آمده از سیلاب‌زنی با فوم ذکر گردیده است. بررسی موجود، منبع مفیدی برای مهندسان و محققان علاقه‌مند به جریان فوم در محیط متخلخل است و زمینه‌ای را برای تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی پروژه‌های سیلاب‌زنی با فوم فراهم می‌آورد.

واژگان کلیدی: ازدیاد برداشت نفت، سیلاب‌زنی با فوم، گاز، ماده فعال سطحی

### مقدمه

ایده‌ی استفاده از فوم برای کنترل تحرک گاز به وسیله‌ی باند و هالبروک در سال ۱۹۵۸ ارائه شد و توسط فرآید ادامه یافت [۱، ۲]. فوم، ترکیبی از گاز، آب و ماده‌ی فعال سطحی است. ماده‌ی فعال سطحی به عنوان کف‌کننده عمل می‌کند. فوم به صورت مجموعه‌ای از لایه‌های مایع و مرزهای مشخص است. این لایه‌ها به گونه‌ای قرار می‌گیرند که کمترین تنش بر آن‌ها وارد شود. فوم، نمونه خاصی از جریان دو فاز گاز-مایع است. با تزریق گاز و محلول فعال سطحی در محیط متخلخل، فوم تشکیل شده و فاز گاز در فوم توسط لایه‌های مایع به دام می‌افتد و اگر فوم پایداری به دست آید، فازهای گاز و مایع با هم با سرعت یکسانی حرکت خواهند کرد [۳، ۴]. در این مقاله، ضمن مطالعه و بررسی جریان فوم در محیط متخلخل، نتایج آزمایشگاهی و میدانی سیلاب‌زنی با فوم در ازدیاد برداشت نفت که توسط دیگر محققان مورد بررسی قرار گرفته، ذکر شده است.

### ۱- تشکیل فوم در طی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی

فوم ایجاد شده توسط تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی، به وسیله توزیع اندازه خلل و فرج و گلوگاه خلل و فرج مشخص می‌گردد. یک حباب مجزا، یک یا چندین خلل و فرج محیط متخلخل را اشغال می‌کند، به این معنی که فوم به صورت یک فاز پیوسته‌ی همگن درون محیط متخلخل، عمل نمی‌کند. به عبارت دیگر، فوم در محیط متخلخل یک فاز ناپیوسته است که در آن، حباب‌های گاز از هر حباب دیگر توسط فیلم‌های نازک

مایع مجزا هستند [۵]. جریان فوم در محیط متخلخل باعث به دام افتادن گاز یا جریان گاز به صورت فازهای پیوسته یا ناپیوسته می‌شود. به دام افتادن گاز هنگامی روی می‌دهد که فوم به طور کامل مسیرهای عبور جریان گاز را مسدود کند. جریان پیوسته گاز در نتیجه وجود کانال‌های جریانی است که به وسیله فیلم‌های مایع مسدود نشده‌اند. به عبارت دیگر، در جریان ناپیوسته‌ی گاز، تمام کانال‌ها توسط فیلم‌های مایع مسدود شده‌اند و فوم، به صورت زنجیرهای به هم پیوسته‌ی حباب‌ها جریان می‌یابد (شکل-۱).

### ۱-۱- رژیم‌های جریان فوم در طی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی

اوستر لوه و ژانت (۱۹۹۲) نشان دادند که دو رژیم جریان می‌تواند در محیط متخلخل مشخص گردد؛ رژیم با کیفیت بالا (خشک) که در گرادیان فشار پایا به دبی جریان گاز وابسته نیست و رژیم با کیفیت پایین (تر) که در آن، گرادیان فشار به دبی جریان مایع بستگی ندارد. عموماً در رژیم با کیفیت بالا نسبت حجم گاز به مایع بیشتر از ۵۰ درصد است، در حالی که در رژیم با کیفیت پایین، این نسبت کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد [۷]. ناحیه گذر<sup>۱</sup> بین دو رژیم به وسیله کسر بحرانی جریان گاز ( $fg^*$ ) مشخص می‌گردد. الوارض و همکارانش (۱۹۹۹) نتایج اوستر لوه و ژانت (۱۹۹۲) را تایید کردند و با استفاده از داده‌های جریان فوم، با محیط‌های متخلخل و فرمولاسیون‌های مختلف ماده فعال سطحی، در دبی‌های جریان متفاوت، نشان دادند که این رفتار جریان فوم یک رفتار عمومی است [۸]. شکل ۲- رژیم‌های جریان فوم در محیط متخلخل را نشان می‌دهد.

\*نویسندهٔ عهده‌دار مکاتبات (hamed.nejatiyan@gmail.com)

### ۲-۱- رابطه بین کسر جزئی جریان گاز و تحرک گاز

اثر فشار موئینه برای هر نوع جریان چندفازی در محیط متخلخل مهم است، مخصوصاً وقتی دبی‌های جریان، پایین و ناهمگنی در مغزه، بالاست. در دبی‌های پایین، با پایداری فصل مشترک مایع و گاز، کشش سطحی افزایش یافته و فشار موئینه افزایش می‌یابد. افزایش ناهمگنی مخزن نیز، باعث کاهش شعاع خلل و فرج و افزایش فشار موئینه می‌شود. در تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی، کسر جزئی جریان گاز ( $f_g$ ) که کیفیت فوم نیز نامیده می‌شود، اشباع آب یا گاز در مخزن را تغییر می‌دهد. فشار موئینه بحرانی، فوم را در محیط متخلخل به دو قسمت ناحیه فوم پایدار و ناحیه فوم ناپایدار تقسیم می‌کند. تقسیم‌بندی این نواحی بر اساس جریان جزئی بحرانی گاز ( $f_{g^*}$ ) است و فشار موئینه بحرانی<sup>۵</sup> تعیین کننده  $f_{g^*}$  می‌باشد [۹]. همان‌طور که در شکل ۳- نشان داده شده است، رابطه بین تحرک گاز و  $f_g$  به وسیله دو خط راست که یکدیگر را در کیفیت بحرانی فوم ( $f_{g^*}$ ) قطع می‌کنند، مشخص می‌گردد (ناحیه گذرای رژیم جریان فوم). در مقادیر  $f_g$  زیر  $f_{g^*}$ ، تحرک گاز با افزایش  $f_g$  به آرامی کاهش می‌یابد یا ثابت می‌ماند که دلیل آن، افزایش به دام افتادن و جریان ناپیوسته گاز، می‌باشد. در حالی که در  $f_g$  بالاتر (بالای  $f_{g^*}$ )، تحرک گاز با افزایش  $f_g$  افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده حالت ناپایدار بافت فوم در نتیجه‌ی جریان پیوسته گاز است [۹، ۱۰].

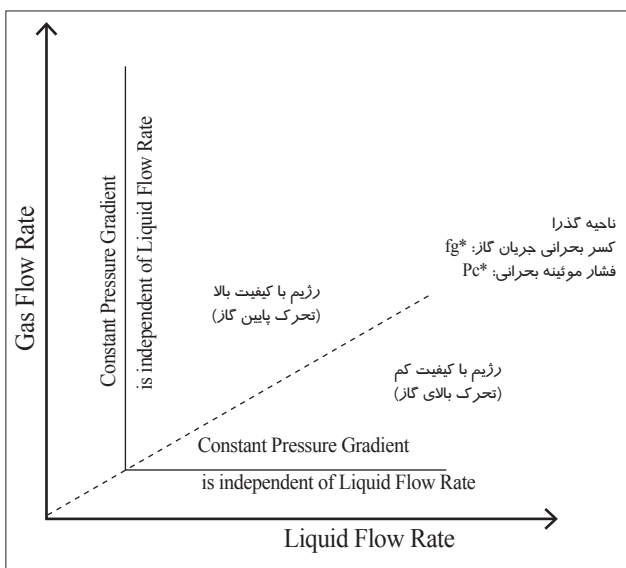
اما طبق بررسی‌های بین و همکارانش (۲۰۰۹) رابطه‌ی بین تحرک گاز و  $f_g$  می‌تواند به وسیله سه خط راست متقاطع در  $f_{g^*}$  و کسر جریان شبه تک‌فازی ( $f_{g^0}$ )، مشخص گردد. هنگامی که  $f_g < f_{g^0}$ ، با افزایش  $f_g$  تحرک گاز افزایش می‌یابد. علت این است که در این حالت، کسر جریان گاز بسیار پایین می‌باشد (کمتر از ۰/۰۸) و رژیم جریان به صورت شبه تک‌فازی مایع بوده و گاز باعث تشکیل فوم نمی‌گردد. هنگامی که  $f_{g^0} < f_g < f_{g^*}$ ، با افزایش

$f_g$ ، تحرک گاز کاهش می‌یابد. در این حالت، فشار حباب‌های گاز کمتر از فشار موئینه فیلم‌های مایع است و با افزایش کسر جریان گاز، شدت تشکیل فوم افزایش یافته و تحرک گاز کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر کسر جریان گاز، در نهایت، فشار حباب‌های گاز از فشار موئینه فیلم‌های مایع بیشتر شده و باعث جریان مجزای گاز و مایع می‌شود. در این حالت  $f_g > f_{g^*}$  و با افزایش  $f_g$  تحرک گاز به علت جریان مجزای آن افزایش می‌یابد. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۴- نشان داده شده است، رژیم جریان فوم می‌تواند به سه ناحیه تقسیم گردد: ناحیه شبه تک‌فازی ( $f_g < f_{g^0}$ )، ناحیه جریان جزئی پایین گاز ( $f_{g^0} < f_g < f_{g^*}$ ) و ناحیه جریان جزئی بالای گاز ( $f_g > f_{g^*}$ ) [۱۱].

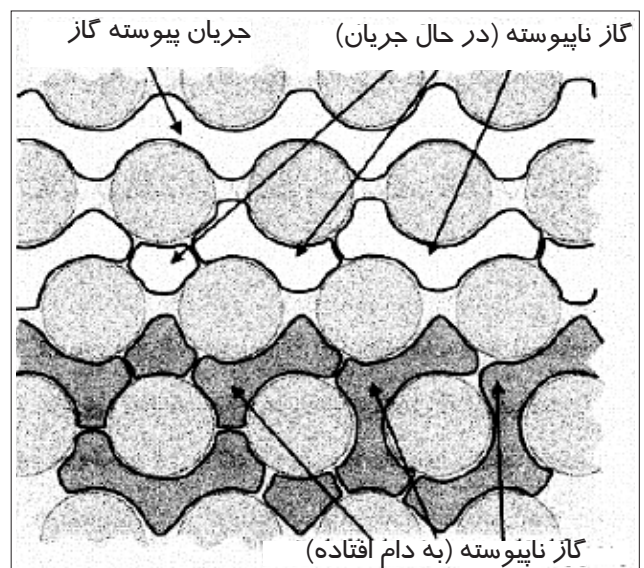
نوع ماده فعال سطحی و فرمولاسیون (غلظت) آن، فاکتورهای مهم در تعیین مقدار  $f_{g^*}$  هستند. الوارض و همکارانش (۱۹۹۹) به مطالعه اثر تراوایی و دبی جریان بر  $f_{g^*}$  پرداختند و شرح دادند که افزایش دبی جریان یا تراوایی باعث افزایش  $f_{g^*}$  می‌گردد. این موضوع با نتایج به دست آمده توسط بین و همکارانش (۲۰۰۹) یکسان است [۸]. در واقع، با افزایش دبی جریان یا تراوایی، کشش بین سطحی کاهش می‌یابد. با کاهش کشش سطحی، فوم پایدارتری شکل می‌گیرد و  $f_{g^*}$  افزایش می‌یابد.

### ۳-۱- تحرک گاز

تحرک گاز با تشکیل فوم در محیط متخلخل کاهش می‌یابد. فوم، پخش حباب‌های گاز در فاز تر (محلول فعال سطحی) است، که این حباب‌ها توسط فیلم‌های نازک مایع از یکدیگر جدا شده‌اند. این فیلم‌های مایع می‌توانند غیرمتحرک یا در حرکت باشند. فیلم‌های مایع ثابت، گاز را به دام می‌اندازند و آن را غیر متحرک می‌سازند، در حالی که فیلم‌های مایع متحرک، توسط نیروی کشش سطحی و نیروهای پسا عمل کننده بر آن‌ها، باعث مقاومت

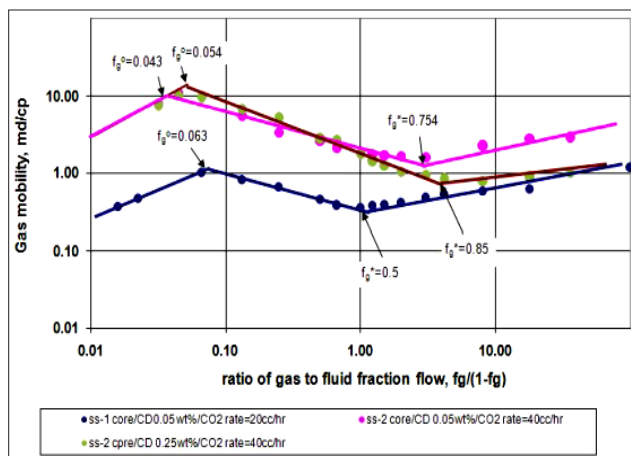


شکل ۲ | پارامترها و رژیم‌های جریان در محیط متخلخل [۷]



شکل ۳ | جریان گاز در محیط متخلخل در حضور فوم [۵]

نتایج این بررسی نشان داد که در یک دبی ثابت جریان گاز، تحرک گاز تقریباً با افزایش کیفیت تارسیدن به کیفیت بحرانی فوم، کاهش می‌یابد و با افزایش کیفیت فوم بالای کیفیت بحرانی فوم، تحرک فوم افزایش می‌یابد. با وجود کاهش تحرک گاز در طی تزریق هم‌زمان گاز و ماده فعال سطحی، در مخازن نفت سنگین به علت بالا بودن ویسکوزیته نفت، راندمان جارویی ضعیف خواهد بود. بنابراین، لازم است ویسکوزیته نفت در مخازن نفت سنگین کاهش یابد. شوبائو تیان و همکارانش (۲۰۰۸)، به بررسی اثر تزریق هم‌زمان بخار،  $CO_2$  و ماده فعال سطحی بر بازیافت از مخازن نفت سنگین پرداختند [۱۵]. در این بررسی چهار سناریوی مختلف بازیافت بررسی گردید که شامل تزریق بخار به تنهایی، تزریق هم‌زمان بخار با  $CO_2$ ، تزریق هم‌زمان بخار همراه با ماده فعال سطحی و تزریق هم‌زمان بخار همراه با  $CO_2$  و ماده فعال سطحی بود. بر اساس این نتایج، بازیافت نفت در اثر تزریق هم‌زمان بخار،  $CO_2$  و ماده فعال سطحی بیشتر از بازیافت نفت در اثر تزریق بخار، تزریق بخار با  $CO_2$  و تزریق بخار با ماده فعال سطحی است. اگر چه طبق این نتایج، تزریق هم‌زمان بخار،  $CO_2$  و ماده فعال سطحی موجب بازیافت مطلوب نفت گردید، اما تزریق هم‌زمان ماده فعال سطحی همراه بخار، مستلزم استفاده از مواد فعال سطحی با مقاومت دمایی بالاست که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. از طرفی، دمای بالای بخار منجر به هیدرولیز شدن ماده فعال سطحی و کاهش خاصیت مطلوب ماده فعال سطحی می‌گردد. بین، گریگ و اسوک (۲۰۰۹) به بررسی بازیافت نفت در سیلاب‌زنی با دی‌اکسید کربن - فوم در مخازن ماسه‌سنگی پرداختند [۱۱]. این مطالعه در مغزهای ماسه‌سنگی بریاً انجام گرفت. نتایج این بررسی نشان داد که در شرایط یکسان، میزان نفت بازیافتی نهایی در سیلاب‌زنی با دی‌اکسید کربن - فوم حدود ۱۷ درصد بیشتر از میزان نفت بازیافتی نهایی در طی تزریق هم‌زمان دی‌اکسید کربن - آب‌نمک می‌باشد. علت این افزایش بازیافت می‌تواند تشکیل فوم در محیط متخلخل در طی تزریق هم‌زمان دی‌اکسید کربن و ماده فعال سطحی باشد.



شکل ۱۴ | رژیم‌های جریان فوم [۱۱]

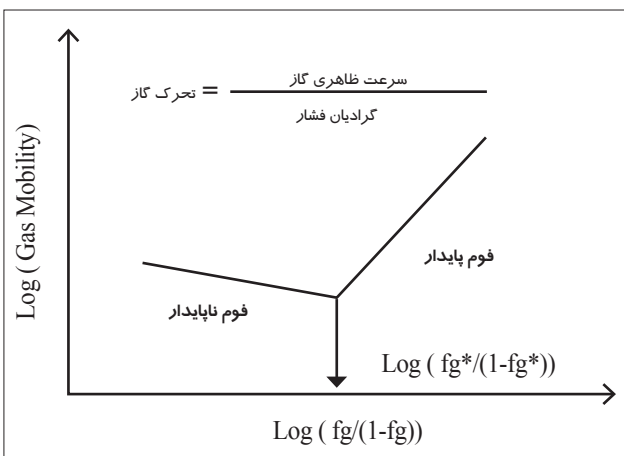
در برابر جریان گاز می‌شوند. در هر دو حالت، تحرک گاز با دو مکانیسم متفاوت کاهش می‌یابد؛ در حالت اول، تراوایی نسبی گاز با افزایش اشباع گاز به دام افتاده توسط فیلم‌های مایع ثابت (غیر متحرک)، کاهش می‌یابد. در حالت دوم، ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز توسط فیلم‌های مایع متحرک افزایش می‌یابد. بنابراین، فوم با افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز و با کاهش تراوایی نسبی گاز، باعث کاهش تحرک گاز می‌گردد [۱۲].

#### ۱-۴- تحرک مایع

در حالت تئوری انتظار می‌رود با تشکیل فوم در محیط متخلخل و افزایش اشباع گاز به دام افتاده در لایه‌های مایع، اشباع مایع کاهش یابد که نتیجه‌ی آن، کاهش غیر مستقیم تراوایی نسبی مایع است. با کاهش تراوایی نسبی مایع، تحرک مایع کاهش می‌یابد. با این حال، نتایج آزمایشگاهی روند مخالفی را نشان می‌دهند. برای مثال، داده‌های آزمایشگاهی برنارد و همکارانش (۱۹۶۵) نشان داد که افزایش اشباع گاز و عامل کف‌کننده (افزایش میزان فوم موجود) بر تراوایی نسبی مایع اثر گذار نیستند. (شکل ۵- [۱۳]).

#### ۲- نتایج آزمایشگاهی حاصل از سیلاب‌زنی با فوم

اگر درک کاملی از رفتار فوم در مخزن مورد نظر وجود داشته باشد، فوم می‌تواند به‌طور مؤثری باعث ازدیاد برداشت نفت شود. چانگ و گریگ (۱۹۹۸) به بررسی اثر کیفیت فوم و دبی جریان بر رفتار دی‌اکسید کربن فوم در دما و فشار مخزن پرداختند [۱۴]. در این مطالعه، سه دبی جریان و پنج کیفیت فوم متفاوت، مورد بررسی چگونگی اثر دبی جریان و کیفیت فوم بر تحرک فوم قرار گرفت. نتایج نشان داد که تحرک فوم با افزایش دبی جریان و افزایش کیفیت فوم افزایش می‌یابد. لی‌یو، گریگ و اسوک (۲۰۰۶) تحرک فوم و جذب آن در مخازن کربناته را مورد بررسی قرار دادند [۹]. در این بررسی، از مغزهای کربناته، گاز نیتروژن و مواد فعال سطحی تجاری در شرایط مخزن، استفاده شد.



شکل ۱۳ | رابطه بین کیفیت فوم و تحرک گاز [۹]

برای دست یابی به بازیافت مطلوب نفت در مخازن نفت سنگین، حجم بالایی از گاز و ماده فعال سطحی مورد نیاز است. به نظر می رسد نوع گاز استفاده شده در سیلاب زنی با فوم در مخازن نفت سنگین مهم باشد. گاز CO<sub>2</sub> می تواند در نفت حل شود و ویسکوزیته نفت را کاهش دهد. در حالی که دیگر گازها مانند N<sub>2</sub> دارای این خاصیت نیستند. طبق بررسی های عمادی و همکارانش (۲۰۱۱) سیلاب زنی با دی اکسید کربن- فوم می تواند به طور موثری بازیافت نفت خام سنگین را بهبود و مقدار CO<sub>2</sub> تزریق شده را کاهش دهد. بر اساس این بررسی، تزریق یک توده محلول ماده فعال سطحی قبل از سیلاب زنی با فوم تأثیر کافی بر بهبود بازیافت نفت سنگین ندارد. با این حال، به فرآیند شکل گیری فوم پایدار و سپس، فرآیند جابجایی نفت سرعت می بخشد [۱۶].

### ۳- نتایج به دست آمده از کاربردهای میدانی

نتایج مهمی از کاربردهای میدانی فوم به دست آمده است. تورنا و سینگال (۱۹۹۷) از بررسی ۴۲ کاربرد فوم دریافتند که جدی ترین مشکل در فرآیندهای سیلاب زنی با فوم، کاهش بیش از اندازه تزریق پذیری است [۱۷]. کوهن و همکارانش (۱۹۹۰) به منظور استفاده از تزریق نیتروژن- فوم برای کاهش کانال های گاز<sup>۲</sup>، بررسی هایی انجام دادند. این بررسی ها به دو دلیل ناموفق بود: (۱) به علت تخمین نادرست تزریق پذیری، فشار تزریق، نزدیک به فشار شکست سازند به کار گرفته شد که سبب ایجاد کانال های جدید گاز گردید؛ (۲) تخمین نادرست حجم فوم مورد نیاز برای تزریق [۱۸]. این بررسی، اهمیت بالای انتخاب روش مناسب برای تزریق فوم به منظور غلبه بر مشکل تزریق پذیری کم را نشان داد. ممکن است تزریق متناوب محلول فعال سطحی و گاز (SAG) نسبت به تزریق هم زمان محلول فعال سطحی و گاز بهتر باشد. وانگ و همکارانش (۱۹۹۷) کاربرد فوم در دو چاه تولیدی نفت که در اثر مخروط شدگی گاز بهره وری آن ها کاهش یافته بود را مورد بررسی قرار دادند. نتایج، حاکی از عملکرد موفق فوم در چاه اول و عملکرد ناموفق آن در چاه دوم بود. علت این بود که در چاه با عملکرد موفق، فوم پیش آماده تزریق گردید، در حالی که در چاه دوم، بعد از تزریق محلول فعال سطحی به تنهایی، فوم پیش آماده تزریق شد. با تزریق تنهای محلول فعال سطحی در محیط متخلخل اشباع از گاز،

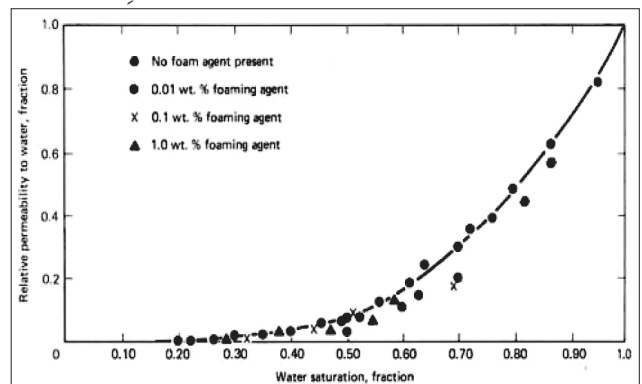
فوم تولید نمی گردد، زیرا فوم می تواند توسط فرآیند تخلیه، نه به وسیله فرآیند آشام<sup>۱</sup> تولید گردد. ناموفق بودن تزریق فوم پیش آماده پس از تزریق محلول فعال سطحی در چاه دوم، نشان دهنده تخمین نادرست اندازه فوم مورد نیاز برای بهبود عملکرد مؤثر چاه است [۱۹]. بلاکر و همکارانش (۱۹۹۹)، آرا و اسکوگ (۲۰۰۰)، اسکوگ و همکارانش (۲۰۰۲) و بلاکر و همکارانش (۲۰۰۲) جزئیات وسیعترین کاربرد فوم در صنعت نفت یعنی پروژه فوم کمک کننده به تزریق متناوب آب و گاز<sup>۹</sup> (FAWAG) در میدان اسنور<sup>۱۰</sup> نروژ را بررسی کردند. دو پروژه ی کاربرد فوم در این میدان انجام گرفت؛ پروژه اول، به منظور کاهش نسبت گاز به نفت (GOR) در یک چاه تولیدی و پروژه دوم، به منظور کنترل تحرک گاز در عمق مخزن توسط FAWAG طراحی گردید. هر دو پروژه در بهبود بازیافت نفت موفق بودند [۲۰-۲۳]. نتایج به دست آمده از این پروژه نشان دهنده رفتار موفق فوم در شرایط مخزن برای کاربردهای میدانی است.

با توجه به وسعت بالای مخازن نفت در کشورمان پیش بینی می شود که در آینده تنها روش مؤثر از دیاد برداشت نفت، تزریق گاز باشد. با این حال، به علت نسبت تحرک بالای بین گاز و اکثر نفت های خام در شرایط مخزن، سیلاب زنی با گاز دارای راندمان جارویی پایینی است. بنابراین، لازم است پروژه های سیلاب زنی با فوم در سطح میدانی در کشور مورد بررسی قرار گیرد.

### نتیجه گیری

در این مقاله جریان فوم در محیط متخلخل در طی تزریق هم زمان گاز و ماده فعال سطحی، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آزمایشگاهی و میدانی سیلاب زنی با فوم که توسط دیگر محققان به دست آمده، ذکر گردید. مهم ترین نتایج این مطالعه به شرح زیر است:

- با افزایش کیفیت فوم (کسر جریان گاز) به بالای کیفیت بحرانی، تحرک گاز به شدت افزایش می یابد. بنابراین، در کاربردهای آزمایشگاهی و میدانی فوم لازم است که کیفیت فوم در مقداری کمتر از مقدار بحرانی انتخاب گردد. این خاصیت، مستقل از نوع گاز استفاده شده است.
- نوع ماده فعال سطحی و غلظت آن، فاکتورهای مهم در تعیین مقدار کیفیت بحرانی فوم هستند. افزایش دبی جریان یا تراوایی، باعث افزایش کیفیت بحرانی فوم می گردد.
- سیلاب زنی با فوم می تواند به طور موثری باعث بهبود بازیافت نفت از مخازن نفت سنگین شود.
- در مخازن نفت سنگین، به کارگیری روش های حرارتی از دیاد برداشت نفت به صورت ترکیبی با سیلاب زنی با فوم می تواند با کاهش ویسکوزیته نفت باعث افزایش راندمان جارویی شود.
- در مخازن نفت سنگین، تزریق هم زمان CO<sub>2</sub> و ماده فعال سطحی نسبت به دیگر گازها مؤثرتر است.
- اگر درک کاملی از رفتار فوم در مخزن مورد نظر وجود داشته باشد، فوم می تواند به طور مؤثری باعث از دیاد برداشت نفت شود. ■



۵ | اثر فوم بر تراوایی نسبی مایع [۱۳]



## پانویس‌ها

1. Dry
2. Steady State
3. Wet
4. Transition
5. Limiting Capillary Pressure
6. Berea
7. Gas Channeling
8. Imbibition
9. Foam Assisted Water Alternating Gas
10. Snorre

## منابع

- [1] Bond, D.C and Holbrook, O.C., "Gas Drive Oil Recovery Process", U. S. Patent No. 2,866,507, 1958.
- [2] Fried, A.N., "The Foam Drive Process for Increasing the Recovery of Oil", Report RI-5866, U.S. Bureau of Mines, Washington, 1961.
- [3] Schramm, L. L. and Wassmuth F., "Foam: Basic Principles , In: Schramm, L. L. (ed), Foams: Fundamentals and Application in the Petroleum Industry," Washington, DC, USA: American Chemical Society, 1994.
- [4] Vikingstad A., K., and Aarra M. G., "Comparing the Static and Dynamic Foam Properties of a Fluorinated and an Alpha Olefin Sulfonate Surfactant," Journal of Petroleum Science and Engineering, 2009. Vol. 65, Issues(1-2): p. 105-111.
- [5] W. Yan.: "Foam for Mobility Control on Alkaline/Surfactant/ Enhanced Oil Recovery Process," PhD Dissertation, Rice University, Houston, Texas, 2006.
- [6] D. Tanzil.: "Foam Generation and Propagation in Heterogeneous Porous Media," PhD Dissertation, Rice University, Houston, Texas, USA, 2001.
- [7] Osterloh, W.T., and Jante, M.J. (1992), 'Effects of Gas and Liquid Velocity on Steady-State Foam Flow at High Temperature', Paper Presented at the SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, April 22-24, 1992. Tulsa, OK, USA, SPE 24179.
- [8] Alvarez, J.M., Rivas, H.J. and Rossen, W.R.(1999), 'Unified Model for Steady-State Foam Behavior at High and Low Foam Qualities', Paper Presented at the Annual Technical Conference and Exhibition of Society of Petroleum Engineers, 3-6 October 1999. Houston, Texas, USA. SPE 56825.
- [9] Liu Y., Grigg R. B., and Svec R. K., "Foam Mobility and Adsorption in Carbonate Core," SPE Paper 99756, SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, Oklahoma, 22-26 April 2006.
- [10] Khatib Z. L., Hirasaki G. J. and Falls A. H., "Effects of Capillary Pressure on Coalescence and Phase Mobilities in Foams Flowing through Porous Media," SPERE, August 1988: p. 919-926.
- [11] Yin G., Grigg R. B., and Yi Svec., "Oil Recovery and Surfactant Adsorption during CO<sub>2</sub>-Foam Flooding," SPE Paper 19787 ,Off-shore Technology Conference, Houston, Texas, 4-7 May 2009.
- [12] F. Friedmann, W. H. Chen and P. A. Gauglitz.: "Experimental and Simulation Study of High-Temperature Foam Displacement in Porous Media," Society of Petroleum Engineers and Research Engineers, SPE Reservoir Engineering, , 1991: p. 37-45
- [13] G. G. Bernard and W. L. Jacobs.: "Effect of Foam on Trapped Gas Saturation and on Permeability of Porous Media to Water," SPE Journal 1204, 1965 Vol. 5, No. 4: p. 295 - 300.
- [14] Chang S. H. and Grigg R. B., "Effects of Foam Quality and flow Rate on CO<sub>2</sub>-Foam Behavior at Reservoir Conditions," SPE Paper 39679, SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 19-22 April 1998.
- [15] S. Tian and S. He.: "Investigating the Effect of Steam, CO<sub>2</sub>, and Surfactant on the Recovery of Heavy Oil Reservoirs," SPE Paper 117394, International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, Alberta, 20-23 October 2008.
- [16] A. Emadi, M. Sohrabi and M. Jamiolahmady.: "Mechanistic Study of Improved Heavy Oil Recovery by CO<sub>2</sub>-Foam Injection," Paper SPE 143013, Kuala Lumpur, 2011.
- [17] Turta, A.T. and Singhal, A.K. (1997), 'Field Foam Applications in Enhanced Oil Recovery Projects: Screening and Design Aspects', Paper Presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China of Society of Petroleum Engineers, November 2-6, 1998. Beijing, China, SPE 48895.
- [18] Kuehne, D.L., Ehman, D.I., Emanuel, A. S. and Magnanl, Ch.F. (1990), 'Design and Evaluation of a Nitrogen-Foam Field Trial', Journal of Petroleum Technology, Vol. 42, No. 4, pp. 504-512.
- [19] Wong, F.Y., Fong, D.K., McIntyre, F.J. and Kuehne, D.L. (1997), 'Design and Field Trial Application of Foam in Production Wells to Improve Conformance', Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 36, No. 2, pp. 21-32.
- [20] Blaker, T., Celius, H.K., Lie, T., Martinsen, H.A., Rasmussen, L. and Vassenden, F. (1999), 'Foam for Gas Mobility Control in the Snorre Field: The FAWAG Project', Paper Presented at the Annual Technical Conference and Exhibition of Society of Petroleum Engineers, October 3-6, 1999. Houston, Texas, USA. SPE 56478.
- [21] Aarra, M.G. and Skuge, A. (2000), 'STATUS OF FOAM APPLICATIONS IN NORTH SEA RESERVOIRS', Paper Presented at the 21st Annual International Energy Agency Workshop and Symposium, September 19-22, 2000. Edinburgh, Scotland, UK.
- [22] Skauge, A., Aarra, M.G., Surguchev, L.M., Martinsen, H.A. and Rasmussen, L. (2002), 'Foam- Assisted WAG: Experience from the Snorre Field', Paper Presented at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, April 13-17, 2002. Tulsa, Oklahoma, USA, SPE 75157.
- [23] Blaker, T., Aarra, M.G., Skauge, A., Rasmussen, L., Celius, H.K., Martinsen, H.A. and Vassenden, F. (2002), 'Foam for Gas Mobility Control in the Snorre Field: The FAWAG Project', Journal of Reservoir Evaluation & Engineering of Society of Petroleum Engineers, Vol. 5. No. 4, pp. 317-323.