



Petroleum Research

Petroleum Research, 2023(December-January), Vol. 32, No. 126, 33-34

DOI: 10.22078/pr.2020.4018.2829

Laboratory Investigation of Foam Stability Enhancement using Nanoparticles, Surfactant and Xanthan Biopolymer to Enhance Oil Recovery

Rohallah Hashemi* and Hamidreza Salehi

Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

rhashemi@iut.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4622.3180

Received: August/09/2022

Accepted: September/10/2022

Introduction

According to the successful efforts that have been widely made to enhance the oil recovery, gas flooding with carbon dioxide has been studied for more than six decades as an important technique for EOR [1,2]. The chemically stable nature of carbon dioxide and its economical availability are two main reasons to use this gas as a source for gas flooding [3]. In addition, by mixing it with oil, carbon dioxide enhances the sweep efficiency inside the oil reservoirs. It should be noted that low viscosity of injected gas causes gravitational separation and fingering problems inside the porous medium. Foam injection was recommended as a remedy to overcome gas injection problems by many studies to enhance the gas properties to obtain more efficient sweep efficiency in oil reservoirs [4,5]. In addition, there exist many techniques to enhance the foam stability as well as foam dynamic properties [6]. In recent years, researchers have used various methods to evaluate foam stability by measuring foam half-life at different concentrations and velocities [7,8].

Materials and Methods

The experimental section of this study was started with foaming ability evaluation using the selected surfactant. In second step, the foam stability of various solutions was estimated by measuring the foam half-life, resulting the optimum concentration for foam generation. It should be noted that selected concentrations with highest value for foaming stability

was used for the micromodel tests to observe the recovery values.

To investigate the effect of foam injection improved with Xanthan gum polymer and silica nanoparticle, we used a designed glass micromodel. The amount of oil remaining in the micromodel in the case where we used foam improved with polymer and nanoparticles decreased to about 4.4%, resulting the shorter drainage time in the porous medium. It should be noted that presence of polymer enhanced the oil production from micromodel significantly compared to the case of injection without polymer.

Results and Discussion

Based on the conducted experiments in three main categories, the highest value of foaming ability was recorded as 14 cubic centimeters in presence of Xanthan, nanoparticle and surfactant. It should be noted that polymer should be presented in the solution medium in very small concentrations.

For the foam stability experiments, the highest value was recorded as 58 min in presence of all three foam enhancing parameters. For the micromodel experiments, solutions with highest stability conditions were selected to be injected into micromodel.

Micromodel experiments showed a meager recovery from porous medium by gas injection while carbon dioxide foam enhanced the recovery from the same medium. Adding nanoparticle in foam structures increased the recovery about 24 percent. The highest

value of recovery was recorded about 93% in presence of Xanthan, nanoparticle and surfactant.

Conclusions

Following are the obtained results:

- a) Adding silica nanoparticle increases the foaming ability, but adding polymer can reversely affect the foaming ability due to the viscosity enhancement.
- b) Foam stability increases significantly in the presence of silica nanoparticles and biopolymer. Enhancement in stability reaches about 60% for the case where all three parameters were presented, which it can have a favorable effect on micromodel oil recovery. It should be noted that the effect of the presence of Xanthan gum on the stability of foam is much greater than silica nanoparticles.
- c) Simultaneous injection of silica nanoparticle and Xanthan gum showed better sweeping efficiency than the foam with silica nanoparticles. This is due to the apparent viscosity enhancement in the solution, resulting lesser fingering problem in the micromodel.

References

1. Farhadi H, Riahi S (2016) Nanoparticle-surfactant stabilized CO₂ foam for potential mobility control, Journal of Petroleum Research, 26, 95: 4-15.
2. Babamahmoudi S, Jabaran M H, Riahi S (2017) Experimental investigation of foam stability, improvement by nanoparticle and surfactant in the presence of crude oil, Journal of Petroleum Research, 27, 96-1: 152-163.
3. Denkov N D (2004) Mechanisms of foam destruction by oil-based antifoams, Langmuir, 20, 22: 9463.
4. Murray B S, Ettelaie R (2004) Foam stability: proteins and nanoparticles, Current Opinion in Colloid and Interface Science, 9, 5: 314-320.
5. Zhao J, Torabi F, Yang J (2021) The synergistic role of silica nanoparticle and anionic surfactant on the static and dynamic CO₂ foam stability for enhanced heavy oil recovery: An experimental study, Fuel, 287: 119443.
6. Khajepour M (2018) Nanoparticles as foam stabilizer for steam-foam process, SPE Journal, 23, 06: 2232-2242.
7. Chipfunhu D (2019) Performance characterisation of new frothers for sulphide mineral flotation, Minerals Engineering, 131: 272-279.
8. Lv Q (2015) Study of nanoparticle-surfactant-stabilized foam as a fracturing fluid, Industrial and Engineering Chemistry Research 54, 38: 9468-9477.

بررسی آزمایشگاهی افزایش پایداری فوم با استفاده از نانوذره، سورفکتانت و بیوپلیمر زانتان جهت افزایش برداشت نفت

روح‌الله هاشمی* و حمیدرضا صالحی
دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۹

چکیده

نیاز روزافزون جهانی سبب شده است که در بهره‌برداری از منابع تجدیدناپذیر به‌خصوص منابع نفتی، تلاش بر بهترین استفاده و بهره‌برداری باشد. تزریق گاز در میدین نفتی یکی از روش‌های متداول در صنعت بهره‌برداری از مخازن هیدروکربوری است. از گازهای متداول تزریق گاز در مخازن، گاز دی اکسید کربن به‌دلیل نتایج خوب تزریق است. در تزریق گاز به مخازن مشکلاتی وجود دارد که از بارزترین آنها می‌توان به حرکت نامطلوب گاز در محیط متخلخل اشاره کرد. از دلایل حرکت نامطلوب گاز، چگالی و ویسکوزیته پایین گاز است. این عوامل سبب جدایش گرانشی و نیز پدیده انگشتی شدن می‌گردد. جایگزین کردن فوم به‌جای گاز یکی از راه‌کارهای کاهش مشکلات تزریق گاز است. سیلاب‌زنی نفت به‌وسیله فوم می‌تواند راندمان جاروبی بهتری نسبت به گاز داشته باشد. فوم ویسکوزیته ظاهری بالاتری نسبت به گاز دارد و در تزریق سبب کاهش پدیده انگشتی شدن خواهد شد. در این پژوهش، با استفاده از آب دیونیزه و در شرایط دمایی و فشاری اتمسفریک، در مرحله نخست توانایی فوم‌زایی محلول‌های طراحی شده مورد بررسی قرار گرفت. در غلظت بحرانی wt.٪ ۰/۲۴ از سورفکتانت، تأثیر انواع پارامترها بر میزان فوم‌زایی مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، پایداری این محلول‌ها براساس زمان نیمه عمر فوم مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و پارامترهای بهینه محلول نهایی جهت تزریق به میکرومدل تعیین گردیدند. در انتها، محلول به‌دست آمده از پارامترهای بهینه جهت تزریق به میکرومدل انتخاب شده و میزان نفت تولیدی برای محلول‌های مختلف توسط آزمایش محاسبه گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که حضور نانوذره سیلیکا نیمه عمر فوم را حدود ۲۵٪ افزایش داده و اگر پلیمر زانتان گام نیز به‌همراه نانوذره استفاده شود، این افزایش نیمه عمر به ۶۰٪ خواهد رسید. برای بررسی اثر تزریق فوم بهبود یافته با پلیمر زانتان گام و نانوذره سیلیکا از یک میکرومدل شیشه‌ای طراحی شده استفاده گردید. میزان نفت باقی‌مانده در میکرومدل در حالتی که از فوم بهبود یافته با پلیمر و نانوذره استفاده شد به حدود ۴/۴٪ کاهش پیدا کرد که علاوه بر تخلیه محیط متخلخل در زمان کوتاه‌تر، افزایش برداشت قابل توجهی نیز در مقایسه با حالت تزریق فوم بدون پلیمر مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: ازدیاد برداشت، فوم‌زایی، دی اکسید کربن، پایداری فوم، زانتان، میکرومدل.

*مسئول مکاتبات

hashemi@iut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/PR.2022.4622.3180)

مقدمه

با توجه به پژوهش‌های اولیه و تلاش‌های موفق‌ی که به‌طور گسترده برای افزایش بهبود بازیابی نفت انجام شده است، سیلاب‌زنی با گاز دی اکسید کربن برای بیش از شش دهه مورد مطالعه قرار گرفته است [۱ و ۲]. طبیعت پایدار شیمیایی و در دسترس بودن از نظر اقتصادی که از طریق منابع طبیعی به‌دست می‌آید باعث می‌شود تا از دی اکسید کربن به‌عنوان منبعی برای سیلاب‌زنی گاز کمک گرفته شود [۳]. مزیت استفاده از گاز این است که اگر با نفت مخلوط شود، می‌تواند راندمان بازیابی نفت از مخزن را بیشتر کند، اما هر روش مشکلاتی نیز دارد که از جمله مهم‌ترین مشکلات این روش می‌توان به تحرک‌پذیری نامطلوب به‌دلیل ویسکوزیته پایین گاز اشاره کرد که منجر به جدایش گرانشی و پدیده انگشتی شدن گاز می‌شود. برای مقابله با این مشکل، تزریق گاز دی اکسید کربن به‌صورت فوم در بسیاری از پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۴ و ۵]. جریان فوم باعث بهبود کارایی جاروبی با افزایش ویسکوزیته ظاهری گاز می‌شود. با افزایش ویسکوزیته گاز، پدیده انگشتی شدن و تأثیر گرانش کاهش می‌یابد. فوم می‌تواند بهبود راندمان جاروبی را با ایجاد مقاومت در برابر جریان در مناطق با نفوذپذیری بالا در یک ساختار ناهمگن افزایش دهد. فوم در ناحیه‌های با تراوایی بالا تولید شده و به دام می‌افتد که منجر به حرکت به نواحی با نفوذپذیری پایین می‌شود و به این ترتیب سبب بهبود کارایی فرآیند می‌شود. علاوه‌بر استفاده از گاز به‌صورت فوم در حضور سورفکتانت، حضور پارامترهای مختلف به کاهش محدودیت‌های فوم‌ها کمک خواهد کرد که علاوه‌بر افزایش پایداری فوم، باعث بهبود عمر دینامیکی فوم‌ها نیز خواهد شد [۶]. پایداری فوم در محیط‌های متخلخل برای کاربردهای صنعتی مانند افزایش بازیافت نفت در مخازن هیدروکربوری بسیار حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر، محققان

از روش‌های مختلفی مانند فوم‌زایی و پایداری فوم با اندازه‌گیری میزان نیمه‌عمر در سرعت‌ها و غلظت‌های مختلف گاز سطحی استفاده کرده‌اند [۷ و ۸]. علاوه‌بر خصوصیات فیزیکی گاز، حضور نانوذرات با اصلاح سطحی نیز به‌عنوان عاملی پایدارکننده با حضور در ناحیه رابط گاز-مایع توسط محققان مورد بررسی قرار گرفته است. نانوذرات با خصوصیات بهبود یافته با ایجاد یک سد انرژی برای گاز باعث افزایش پایداری فوم خواهند شد [۹]. منجری و همکاران دریافتند که نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با استفاده از ۳-آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان (APTES) در مقایسه با سیلیکای اصلاح نشده، تأثیر بیشتری بر پایداری فوم دارند. علاوه‌بر این، نانوذرات اصلاح شده در محیط میکرومدل افزایش برداشت بیشتری از خود نشان دادند [۱۰]. از بررسی گسترده موجود در مورد فوم تثبیت شده با نانوذرات می‌توان نتیجه گرفت که حضور نانوذرات سیلیکا با آب‌گریزی متوسط و غلظت‌های مناسب در سطح مشترک پایدار بین سیالات غیرقابل اختلاط باعث افزایش قابل توجهی از نظر پایداری برای فوم خواهد شد [۱۱]. طبق بررسی‌های ژنگ و همکاران در مخازن نفتی با دما و شوری بالا، پایداری حرارتی ضعیف و تا حدودی تحمل شوری محلول پلی آکریل آمیدهای هیدرولیز شده (HPAM) مانع کارایی آن در افزایش بازیافت نفت شده است. بنابراین، با اصلاح سطح نانو سیلیکا توسط اصلاح‌کننده‌های سیلانی هگزا متیل دی سیلان (HMDS) و هگزادسیل تری‌متوکسی سیلان (HDTs) به‌طور جداگانه که به محلول پلی آکریل آمیدهای هیدرولیز شده اضافه شده، توانسته‌اند بازیابی نفت را تا ۱۰/۵۴٪ افزایش دهند [۱۲]. اگرچه در حضور نانوذرات کف دارای تثبیت بیشتری است، اما مخلوط نانوذرات و سورفکتانت به‌همراه پلیمر از نظر تولید فوم بسیار کارآمدتر است زیرا حضور این سه پایدارکننده در کنار هم باعث ایجاد یک هم‌افزایی برای دستیابی به کف

پایدارتر شده و کف حاصل دارای خصوصیات نیمه عمر بهتری خواهد بود. تانگ و همکاران با استفاده از یک کوپلیمر جدید اصلاح شده در حضور نانو سیلیکا توانستند بازیابی نفت را ۱۸/۷۴٪ در مقایسه با ۸/۱۲٪ بازیافت نفت را در هنگام استفاده از پلی آکریل آمید هیدرولیز شده افزایش دهند [۱۳]. بررسی‌های جیا بر پایداری فوم دی اکسیدکربن در حضور پلیمر و نانوذرات نشان داد که افزودن پلیمر باعث بالارفتن پایداری فوم گردیده و می‌تواند کفی پایدارتر جهت اهداف ازدیاد برداشت تولید نماید [۱۴]. حضور هم‌زمان نانوذره به‌همراه پلیمر می‌تواند خصوصیات فیزیکی محلول تشکیل شده را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد [۱۵]. به‌طور کلی، مطالعات کمی در حوزه بررسی میزان پایداری فوم در حضور هم‌زمان نانوذره، سورفکتانت و بیو پلیمر وجود دارد. حضور پلیمر در ساختار سیال تزریقی به چند طریق می‌تواند در پایداری فوم موثر باشد. به‌عنوان دلیل اول، حضور پلیمر در ساختار فوم تزریقی به محیط متخلخل باعث افزایش ویسکوزیته ظاهری سیال می‌شود که خود این امر باعث افزایش زمان تخلیه مایع درون ساختار فوم شده و نتیجه نهایی پایداری بیشتر فوم در شبکه متخلخل است [۱۶ و ۱۷]. زیرا زمان تخلیه مایع رابطه عکس با ویسکوزیته فاز مایع دارد. به‌عنوان دلیل دوم این نکته را می‌توان ذکر کرد که حضور پلیمر در ساختار فوم بر رفتار جذبی سیال در روی محیط متخلخل تأثیرگذار خواهد بود [۱۸]. در صورت حضور پلیمر و جذب آن بر روی سطح محیط متخلخل یک اتصال قوی الکترواستاتیکی بین فوم و سطح جامد تشکیل شده و نتیجه آن تشکیل یک لاملای قدرتمند است که مقاومت بیشتری از خود در مقابل نیروهای مخرب خارجی جهت فروپاشی لاملای نشان می‌دهد [۱۹]. یکی از پلیمرهای بسیار خوب برای این هدف صمغ زانتان است که به همین علت در این پروژه استفاده شده است.

دلیل سوم برای استفاده از پلیمر این است که

حضور پلیمر در ساختار فوم بر خصوصیات رفتاری سیال تزریقی بسیار تأثیر می‌گذارد که علت آن تشکیل یک شبکه‌ی پلیمری در ساختار لاملای است [۲۰]. همان‌طور که در مقالات اشاره شده است در صورت حضور پلیمر در ساختار فوم، حباب‌های بزرگ‌تری تشکیل خواهند شد. تشکیل حباب‌های بزرگ‌تر زمان ادغام حباب‌های تشکیل شده را کاهش داده و به نسبت پایداری حباب‌های تشکیل شده را افزایش می‌دهد. دلیل چهارم افزایش ضخامت لایه لاملای در اثر حضور پلیمر است که نفوذ گاز را از درون لاملای سخت‌تر خواهد کرد [۲۱]. مکانیسم نهایی برای افزایش پایداری فوم در حضور پلیمر این است که حضور پلیمر در ساختار سیال تزریقی مقاومت فوم را در برابر عوامل مخرب فوم بیشتر خواهد کرد. عواملی مانند شوری، ساختار نفت و جذب سورفکتانت بر محیط متخلخل در حضور پلیمر دارای اثر کمتری است [۲۲]. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد فوم دی اکسید کربن با ترکیبی از سورفکتانت، نانوذرات و بیو پلیمر زانتان است. علاوه بر انجام آزمایش‌های استاتیک، محلول‌ها به یک میکرومدل جهت انجام آزمایشات دینامیک تزریق شدند و میزان بازیابی نفت در یک محیط متخلخل بررسی شد.

مواد و روش آزمایشگاهی

مواد آزمایشگاهی

سورفکتانت مورد استفاده در این پژوهش، سدیم دودسیل سولفات^۱ شرکت تتراکم^۲ که با نام اختصاری SDS شناخته می‌شود. نانوذره مورد استفاده، نانوذره سیلیکا آمورف جهت افزایش پایداری فوم است. مشخصات این نانوذره در جدول ۱ بیوپلیمر مورد استفاده در پژوهش صمغ زانتان^۳ است

1. Sodium Dodecyl Sulfate

2. Tetrachem

3. Xanthan Gum

جدول ۱ مشخصات نانوذره سیلیکا

شرکت سازنده	خلوص	اندازه ذرات (nm)	نانوذره
US Research Nanomaterials	> ۹۸ %	۳۰-۲۰	SiO ₂

دستگاه کنترل کننده دبی گاز، دبی گاز را کنترل و به محلول تزریق کرده‌ایم. بعد از وارد شدن گاز به محلول، گاز به صورت حباب‌های ریز در محلول پخش شده است. بعد از رسیدن حباب به سطح محلول، به علت جذب سورفکتانت در اطراف این حباب‌ها، فوم تشکیل خواهد شد. به منظور بررسی و مقایسه فوم‌ها با یکدیگر، شاخص نیمه‌عمر فوم به عنوان مقیاس در نظر گرفته شده است.

در انتهای آزمایشات با استفاده از یک میکرومدل، فوم بهینه شده در شرایط مختلف جهت بررسی تأثیر آن بر میزان ازدیاد برداشت نفت از محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. روش کار بدین صورت است که در ابتدا میکرومدل را نفت دوست کرده و سپس با نفت پالایشگاه اصفهان اشباع می‌شود. برای تولید فوم تزریقی، با تزریق گاز از طریق اسپارژر به درون محلول مولد فوم، فوم را تشکیل داده و سپس از طریق مسیر خروجی دیگری که در محفظه تولید فوم تعبیه شده است، فوم به میکرومدل تزریق می‌شود. لازم به ذکر است که شرایط آزمایشگاهی برای تمام تست‌ها در دما و فشار اتمسفریک بوده و دبی تزریق فوم برای همه حالت‌ها ۲۰ mL/min در نظر گرفته شده است. با استفاده از یک دوربین از روند تزریق و ازدیاد برداشت عکس‌برداری نموده و با استفاده از برنامه ImageJ، هر کدام از عکس‌ها را آنالیز کرده و در نهایت میزان نفت استخراج شده را در هر کدام از تزریق‌ها به دست آورده و سپس با یکدیگر مقایسه کرده‌ایم.

نتایج

آزمون فوم‌زایی

در شکل ۲ نتایج حاصل از آزمون فوم‌زایی در غلظت‌های مختلف مشاهده می‌شود.

فرمول مولکولی این پلیمر C₃₅H₄₉O₂₉ است. این پلیمر دارای وزن مولکولی ۹۳۳/۷۴۸ گرم بر مول و چگالی ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. در آزمون‌های تزریق در میکرومدل و همچنین در آزمون‌های پایداری، از نفت ورودی پالایشگاه اصفهان استفاده شده است. جدول ۲، مشخصات نفت مورد استفاده برای آزمایشات میکرومدل را نشان می‌دهد. در تمامی آزمایش‌ها، آب دوبار تقطیر استفاده شده است.

دستگاه‌های آزمایشگاهی

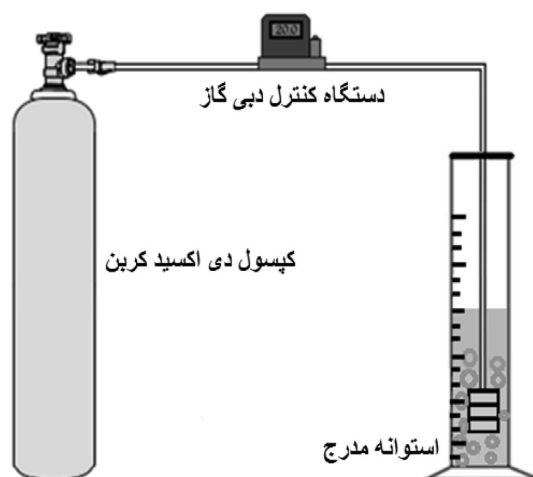
تجهیزات مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از ترازوی دیجیتالی، همزن مغناطیسی، استوانه مدرج درپوش دار، اسپارژر پارچه‌ای، دستگاه کنترل کننده دبی گاز، دستگاه اولتراسونیک، سانتریفیوژ، دوربین، منبع نور، میکروسکوپ دیجیتالی، میکرومدل شیشه‌ای، کوره و پمپ.

روش آزمایش

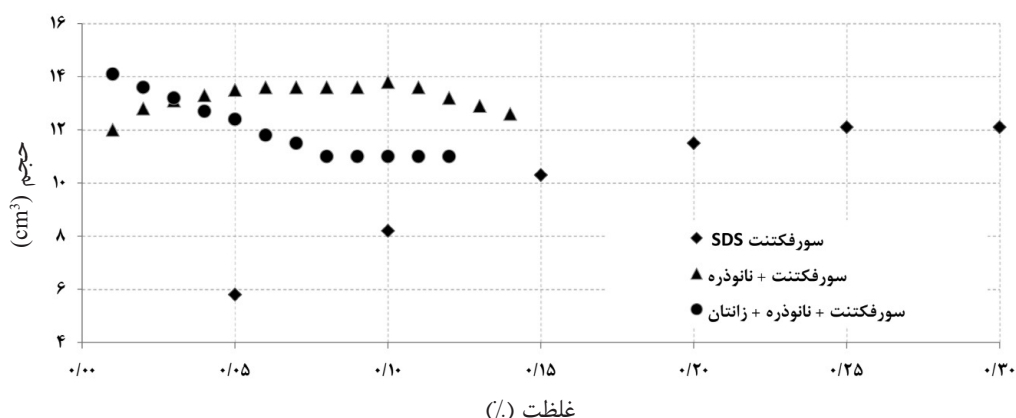
در ابتدای آزمایشات، قابلیت فوم‌زایی محلول دارای سورفکتانت انجام گرفت. روش کار بدین صورت است که ابتدا ۴ mL از محلول را در یک لوله آزمایش دارای درپوش ریخته و با تکان دادن لوله به مدت چند ثانیه ارتفاع کف تشکیل شده درون لوله را ثبت و این عدد را به عنوان قابلیت فوم‌زایی محلول گزارش می‌کنیم. در مرحله بعد، برای هر یک از محلول‌های مولد فوم (با مواد متفاوت و یا غلظت‌های متفاوت) آزمون پایداری صورت گرفت. طبق شکل ۱ آزمون پایداری به این صورت است که ۵۰ mL از محلول مولد فوم را درون استوانه مدرج ۲۵۰ mL ریخته، سپس اسپارژر را در داخل محلول در انتهای استوانه مدرج قرار داده سپس با

جدول ۲ مشخصات نفت مورد استفاده در تست‌ها جهت اشباع‌سازی

آسفالتین (%wt)	عدد اسیدی (mgKOH/gOil)	ویسکوزیته (cP)	چگالی (g/cm^3)
۰/۴	۰/۱	۷/۳۴۲	۰/۸۴۱



شکل ۱ شماتیک کلی دستگاه آزمون پایداری.



شکل ۲ توانایی فوم‌زایی محلول در اثر تغییر عوامل مختلف.

تأثیری در تعداد مونومرها ندارد و بنابراین این غلظت به‌عنوان غلظت بهینه مورد استفاده در موارد بعدی به‌کار گرفته شده است. علاوه‌بر این در غلظت بالاتر از غلظت بحرانی با تشکیل لایه دوگانه، سورفکتانت‌ها عملاً تمایلی به قرارگیری در سطح میان دو فاز نداشته و تأثیر چندانی بر پایداری فوم ندارند. در مورد نانوذره مورد استفاده این نکته قابل توجه است که محلول نانوذره به‌تنهایی قادر به تولید فوم نیست.

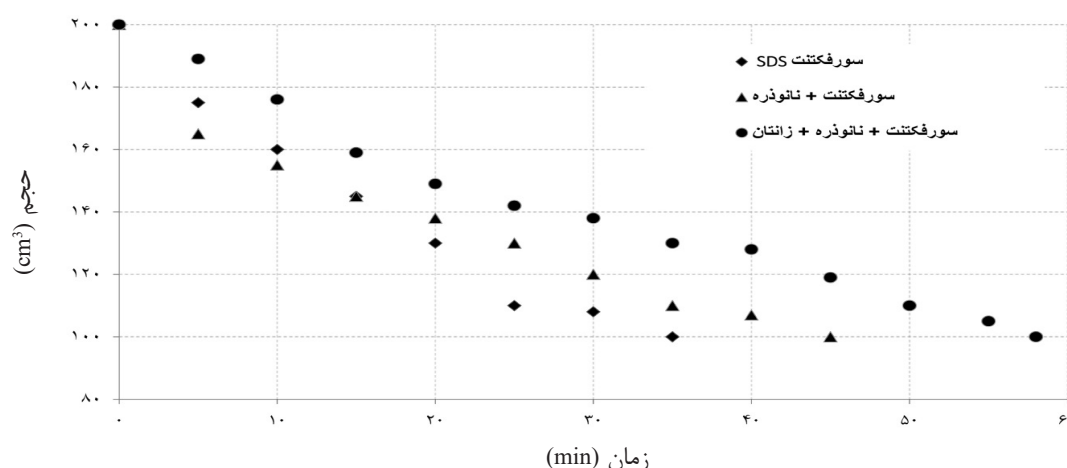
در این نمودار، نتایج حاصل از تغییر غلظت سورفکتانت، سورفکتانت به‌همراه نانوذره و همچنین تأثیر هم‌زمان حضور سه عامل پایدارکننده مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به نمودار شکل برای تأثیر غلظت سورفکتانت، می‌توان دریافت که با افزایش غلظت سورفکتانت تا حدود ۰/۲۵٪، میزان حجم تولیدی فوم افزایش می‌یابد و بالاتر رفتن غلظت از این مقدار، تأثیری در افزایش فوم ندارد. با افزایش غلظت بالاتر از این غلظت بحرانی (۰/۲۵٪)، فقط غلظت مایسل‌ها افزایش می‌یابد و

استفاده قرار گیرد. با این حال در نمودار دیده می‌شود که افزایش غلظت وزنی باعث کاهش فوم‌زایی در حضور صمغ زانتان شده که دلیل آن می‌تواند برهم‌کنش پیچیده مولکولی در لایه میانی و افزایش ویسکوزیته بالا در لاملا باشد که مانع از فوم‌زایی خواهد شد [۱۳]. این نمودار نشان می‌دهد که اضافه کردن مقدار بسیار کمی از پلیمر زانتان می‌تواند اثر مثبت بر فوم‌زایی داشته باشد. مواد پلیمری به‌علت داشتن جرم مولکولی بالا، در غلظت‌های بالاتر، اثر معکوس بر توانایی فوم‌زایی محلول‌های ساخته شده از خود نشان دادند.

آزمون پایداری فوم

بعد از تست های فوم‌زایی، برای مقایسه پایداری فوم‌های ساخته شده از محلول‌ها با ترکیب‌های متفاوت، از نیمه عمر فوم استفاده می‌کنیم. نیمه عمر به‌مدت زمانی گفته می‌شود که حجم فوم به نصف مقدار اولیه خود می‌رسد. برای مقایسه پایداری فوم‌ها، محلول‌های مولد فوم را با غلظت‌های متفاوت در شرایط آزمایشگاهی یکسان (دما و فشار اتمسفریک) ساخته و سپس در دبی ۲۰ mL/min از گاز دی اکسید کربن فوم محلول تشکیل داده می‌شود. ارتفاع اولیه فوم ثبت شده و بعد از گذر زمان مشخص نیمه‌عمر هر کدام از محلول‌ها به‌عنوان شاخص پایداری یادداشت می‌شود. با مقایسه نیمه‌عمر فوم‌ها، به غلظت‌های بهینه از عوامل پایدارکننده فوم خواهیم رسید. **شکل ۳** نمودار پایداری محلول‌های مختلف را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که بعد از پیدا کردن غلظت بحرانی مایسل با استفاده از فوم‌زایی (۰/۲۵٪)، مقدار ۵۰ mL از محلول سورفکتانت را برداشته و در استوانه مدرج ریخته و توسط اسپارژر پارچه‌ای، گاز دی اکسید کربن را با دبی مشخص (۲۰ mL/min) وارد محلول می‌شود. آن‌قدر به فوم‌زایی توسط گاز ادامه داده می‌شود تا ارتفاع فوم به ۲۰۰ mL در استوانه مدرج رسیده و بعد جریان گاز قطع می‌شود.

برای غلظت‌های متفاوت از نانوذره سیلیکا، در غلظت بحرانی که برای سورفکتانت به‌دست آمده، آزمون قابلیت فوم‌زایی انجام شد. نمودار مثلی در **شکل ۲** نتایج حاصل از فوم‌زایی محلول با تغییر غلظت نانوذره سیلیکا را نشان می‌دهد. بر طبق نتایج به‌دست آمده، در غلظت‌های بالاتر از ۰/۱۱٪ از نانوذره در محلول، میزان فوم تولید شده کاهش می‌یابد. از دلایل بالا رفتن پایداری فوم با افزایش نانوذره، بالا رفتن ویسکوزیته مایع و در نهایت بالا رفتن ویسکوزیته لاملا است. علاوه‌بر این، افزایش تجمع نانوذره در لایه‌های میانی باعث ایجاد یک مانع محکم‌تر شده که عملاً خروج گاز را سخت‌تر خواهد کرد. در ویسکوزیته بالاتر، ورود گاز به درون لاملا سخت‌تر شده و به همین دلیل حباب‌ها پایدارتر خواهند بود. اضافه کردن ذرات نانو تا غلظت ۰/۱۱٪ در حضور سورفکتانت باعث می‌شود که میزان خروج سیال از درون لاملا کاهش پیدا کرده و بنابراین یک فوم قوی‌تری تشکیل شود. ولی با بالاتر رفتن غلظت نانوذره از مقدار ۰/۱۱٪، حضور نانوذره در ساختار فوم اثر مثبتی نداشته و قابلیت فوم‌زایی را کاهش می‌دهد. دلیل این امر افزایش غلظت نانوذرات در لایه میانی بوده و تجمع این ذرات باعث بهم پیوستگی نانوذرات شده و فصل مشترک مایع-گاز از این ذرات اشباع می‌شود. در نتیجه این اشباع، فشار مویینگی بیشینه بهم پیوستن حباب‌ها کاهش پیدا کرده و حباب‌ها زودتر دچار ترکیدگی می‌شوند. بنابراین اثر معکوسی بر فوم‌زایی دارند. نمودار دایره‌ای در **شکل ۲**، اثر هم‌زمان سورفکتانت، نانوذره و صمغ زانتان را بر فوم‌زایی نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود بالاترین مقدار فوم‌زایی در غلظت ۰/۰۱٪ از پلیمر بوده و افزایش غلظت پلیمر اثر معکوس بر فوم‌زایی دارد. صمغ زانتان از بیوپلیمرهای ساکاریدی است که به‌دلیل ساختار قوی مولکولی و گرانیروی بالاتر توانسته به‌عنوان عاملی جهت افزایش فوم‌زایی مورد



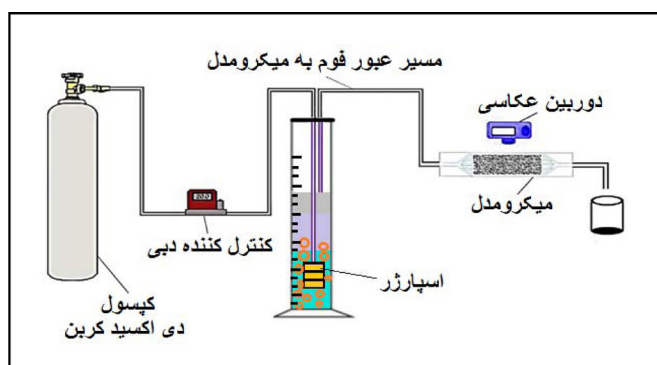
شکل ۳ پایداری محلول‌های طراحی شده در حضور عوامل مختلف

۱۲۸° بود. جهت مقایسه میزان برداشت نفت در سناریوهای مختلف، تست‌های متفاوتی انجام گرفت. نمودار حاصل از نتیجه این تست‌ها به‌طور کامل در **شکل ۵** نشان داده شده است. در اولین مرحله از تزریق در میکرومدل، یک آزمون برای مقایسه و تحلیل تزریق فوم در میکرومدل باید داشته باشیم. برای این کار گاز دی اکسید کربن را در میکرومدل اشباع شده از نفت تزریق می‌کنیم. دبی تزریق گاز ۵ mL/min در نظر گرفته شده است. نمودار لوزی **شکل ۵** میزان اشباع باقی‌مانده نفت را در میکرومدل برای تزریق گاز ساده نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار پیداست میزان اشباع نفت باقی‌مانده حتی بعد از گذشت ۲۵۰۰ s دارای مقدار قابل توجهی است. در نمودار تزریق گاز دی اکسید کربن به‌تنهایی، گاز به‌دلیل ویسکوزیته پایین و تمایل به حرکت در منافذ با نفوذ پذیری بالا به سرعت در منافذ بزرگ‌تر حرکت کرده و از راحت‌ترین مسیر، طول میکرومدل را طی خواهد کرد و سریع به منافذ خروجی خواهد رسید. پدیده انگشتی شدن در تزریق گاز سبب می‌شود که گاز در تمام میکرومدل به‌صورت یکنواخت و جبهه پایدار حرکت نکند و نتواند که تمامی نفت در تمام منافذ میکرومدل را تخلیه کند. در **شکل ۶** خروج کانال گونه گاز در میکرومدل به‌طور واضح مشخص است.

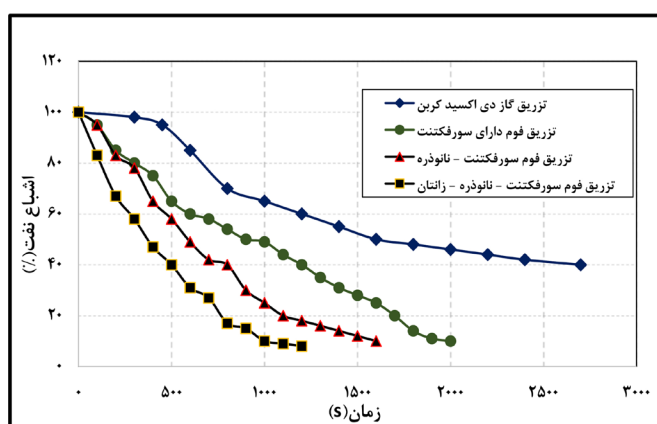
زمان رسیدن ارتفاع فوم به ۱۰۰ mL را به‌عنوان نیمه‌عمر فوم در نظر گرفته و مقیاسی از پایداری حساب خواهد شد. همان‌طور که در **شکل ۳** مشاهده می‌شود اگر عدد ۱۰۰ mL را به‌عنوان حجم نیمه‌عمر در نظر بگیریم، در غلظت بحرانی از سورفکتانت، میزان نیمه‌عمر ۳۵ min اندازه‌گیری گردید. برای محلول بهینه نانوذره (۰/۰۶٪) و سورفکتانت بالاترین عدد ثبت شده ۴۵ min و میزان پایداری در حضور محلول سورفکتانت، نانوذره و صمغ زانتان ۵۸ min ثبت گردید.

آزمون میکرومدل

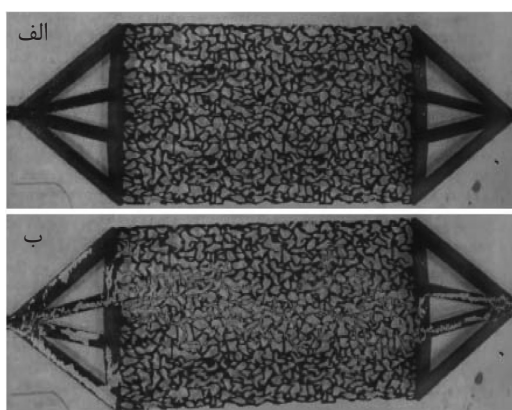
شکل ۴ شماتیک کلی اجزای مورد استفاده برای آزمایش میکرومدل را نشان می‌دهد. به‌منظور انجام آزمون میکرومدل بعد از ساخت میکرومدل شیشه‌ای، ابتدا محیط متخلخل نفت‌دوست می‌گردد. روش کار بدین صورت است که بعد از اشباع میکرومدل با استفاده از هیدروکسید سدیم به‌مدت یک ساعت، محتویات میکرومدل تخلیه شده و کل سیستم با آب مقطر شستشو داده می‌شود. بعد از این مرحله، محیط متخلخل با ۲٪ تری کلرومتیل سیلان و ۹۸٪ تولوئن اشباع شده و سپس با تزریق متانول و جابه‌جایی سیال مرحله قبل، میکرومدل را جهت خشک شدن درون کوره قرار می‌دهند. جهت اطمینان از نفت‌دوست بودن شیشه، آنالیز کشش سطحی انجام شد و زاویه اندازه‌گیری شده



شکل ۴ شماتیک کلی سامانه آزمایشگاهی میکرومدل جهت تزریق فوم و مشاهده ازدیاد برداشت



شکل ۵ میزان کاهش اشباع نفت در میکرومدل برای سناریوهای مختلف



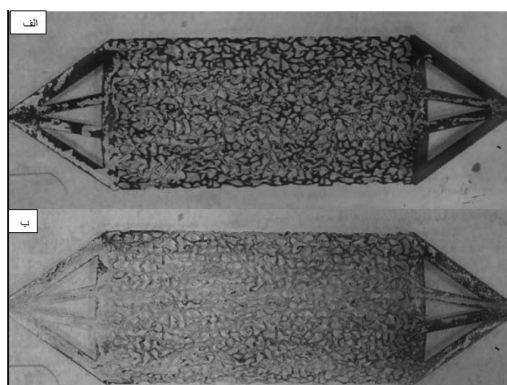
شکل ۶ پدیده انگشتی در سناریوی تزریق گاز به تنهایی: (الف) میکرومدل قبل از تزریق گاز و (ب) میکرومدل بعد از تزریق گاز

بسیار کمتر از حالتی است که از فوم استفاده می‌کنیم. اگر یک زمان یکسان برای همه آزمایشات تزریق در نظر بگیریم (۱۰۰۰ s برای این پژوهش) و تمامی کاهش اشباع نفت موجود در میکرومدل را باهم مقایسه کنیم خواهیم دید که

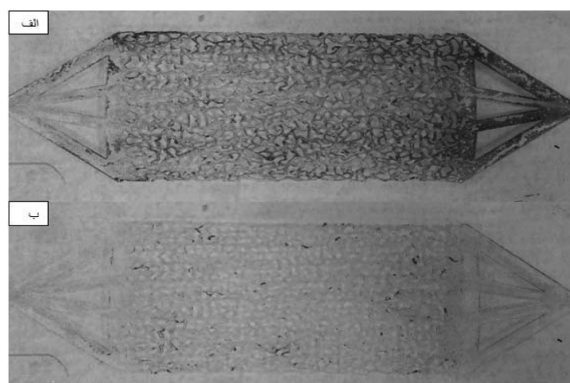
گاز به‌علت تحرک بالا به نسبت نفت موجود در محیط متخلخل سریع به سمت دهانه خروجی میکرومدل رفته و به همین علت بازده جاری آن کاهش پیدا می‌کند. به همین دلیل میزان تخلیه نفت در این حالت حتی با گذشت زمان طولانی

اشباع نفت در مقایسه با آزمایش قبل، کاهش پیدا کرده است. براساس شکل نمودار آزمایش، میزان نفت باقی مانده در محیط متخلخل بعد از زمان مینا فقط ۲۵٪ است که افزایش ۲۴٪ به نسبت حالت قبل دارد. حضور نانوذره در ساختار فوم باعث می شود که ویسکوزیته محلول سازنده فوم عوض شده و در نتیجه فوم دارای ویسکوزیته ظاهری بیشتری شود. حضور نانوذرات در ساختار سیال تزریقی باعث پایداری بیشتر لاملا از طریق بالارفتن ویسکوزیته مایع و در نهایت بالا رفتن ویسکوزیته لاملا می شود. علاوه بر این، حضور نانوذره در لایه های میانی باعث ایجاد یک مانع محکم تر شده که عملاً خروج گاز را سخت تر خواهد کرد و به همین دلیل حباب ها پایداری بیشتری ایجاد خواهد شد. مرحله نهایی در آزمون میکرومدل تزریق هم زمان سورفکتنت، نانوذره و بیوپلیمر زانتان است. نتایج حاصل از این کار در نمودار مربعی شکل ۵ نمایش داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود میزان بازده جارویی حدود ۹۰٪ در زمان مینای ۱۰۰۰ s است که ۱۵٪ میزان بازده جارویی را در زمان یکسان به نسبت حالت قبل افزایش داده است. اگر زمان تزریق سیال دارای پلیمر را افزایش دهیم (در حدود ۲۰۰ s بیشتر) میزان برداشت نفت تا حدود ۹۳٪ افزایش پیدا خواهد کرد. شکل ۸ میکرومدل تخلیه شده را در مقایسه با حالت اول که تزریق گاز صورت گرفته بود نشان می دهد.

برای تزریق گاز دی اکسید کربن به تنهایی، میزان تخلیه میکرومدل در حدود ۳۵٪ نفت در جای اولیه است. در مرحله بعدی برای بهبود خواص سیال تزریقی، از فوم ایجاد شده در شرایط بهینه غلظت سورفکتنت استفاده شد که نمودار مثلثی شکل میزان اشباع باقی مانده درون محیط متخلخل را برای فوم نشان می دهد. در نموداری که از فوم به تنهایی و با استفاده از سورفکتنت حاصل شده، میزان نفت جابه جا شده در زمان مینا، حدوداً ۵۱٪ افزایش داشته است. دلیل این مطلب افزایش ویسکوزیته سیال تزریقی است که پدیده انگشتی شدن را تا حدی کاهش می دهد. شکل ۷ نشان می دهد که در مقایسه با حالت قبلی به علت حضور فوم حاوی سورفکتنت کانالیزه شدن سیال تزریقی کاهش پیدا کرده است. دلیل این امر را می توان به افزایش قابل توجه ویسکوزیته ظاهری فوم در مقایسه با گاز به تنهایی اشاره نمود. حضور سورفکتانت باعث می شود که نفت به شکل امولسیون در مایع لاملا تشکیل و همراه با فوم از محیط متخلخل میکرومدل خارج شود. ذکر این نکته ضروری است که در هر مرحله می توان با افزایش خواص فوم تزریقی، میزان برداشت نفت از میکرومدل را ارتقا داد. در مرحله سوم از آزمایشات میکرومدل، نانوذره سیلیکا به محلول سورفکتانت در غلظت بهینه اضافه می شود. همان طور که از نمودار شکل ۵ برای این آزمایش مشاهده می شود، میزان



شکل ۷ کاهش پدیده انگشتی شدن در حضور فوم حاوی سورفکتنت و بهبود بازده جارویی: الف) تزریق گاز به تنهایی و ب) تزریق گاز با فوم دارای سورفکتنت



شکل ۸ کاهش پدیده انگشتی شدن در حضور فوم حاوی سورفکتانت، نانوذره و پلیمر و بهبود بازده جارویی: الف) تزریق گاز به‌تنهایی و ب) تزریق گاز با فوم دارای سه عامل بهبوددهنده فوم

و با استفاده از آب دوبار تقطیر مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آزمایشات استاتیک، سیالات بهینه شده جهت آزمایشات ازدیاد برداشت به‌صورت دینامیک مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه به‌صورت زیر می‌باشند:

الف) اضافه کردن نانوذره سیلیکا قابلیت فوم‌زایی را افزایش می‌دهد، اما اضافه کردن پلیمر می‌تواند به‌علت افزایش ویسکوزیته قابلیت فوم‌زایی را به‌طور معکوس تحت تأثیر قرار دهد.

ب) پایداری فوم در حضور نانوذره سیلیکا و بیوپلیمر افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند. این افزایش پایداری برای حالتی که هر سه پارامتر حضور داشتند، به حدود ۶۰٪ می‌رسد که می‌تواند تأثیر مطلوبی بر بازیابی نفت میکرومدل داشته باشد. این نکته را باید بیان کرد که تأثیر حضور صمغ زانتان در پایداری فوم به مراتب بیشتر از نانوذره سیلیکا است.

ج) تزریق هم‌زمان نانوذره سیلیکا و صمغ زانتان توانایی جاروب‌زنی بهتری از فوم بهبود یافته با نانوذره سیلیکا دارد. این مورد به‌علت افزایش ویسکوزیته ظاهری محلول و عدم ایجاد پدیده انگشتی در میکرومدل است.

همان‌طور که از این شکل پیدا است تزریق پلیمر به‌همراه نانوذره و سورفکتانت بازده جارویی بهتری از خود نشان داده است. در تزریق سیال این مرحله علاوه بر استفاده از خصوصیات سورفکتانت و نانوذره، از خصوصیات پلیمر زانتان به‌عنوان تکمیل‌کننده زنجیره پایداری استفاده شده است. در توجیه مکانیسم افزایش برداشت این‌گونه می‌توان ذکر نمود که حضور پلیمر در ساختار فوم علاوه بر افزایش ویسکوزیته ظاهری سیال تزریقی، باعث تشکیل یک لاملای قدرت‌مندتر و در نتیجه حباب پایدارتر خواهد شد. حباب‌های تشکیل شده دارای اندازه بزرگ‌تری بوده و زمان ادغام آن‌ها نیز طولانی‌تر خواهد بود. شاید مهم‌ترین دلیل برای افزایش برداشت قابل توجه این باشد که حضور پلیمر در ساختار فوم اثر وجود نفت به‌عنوان عامل مخرب فوم را تا حد زیادی تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین با حضور طولانی‌تر حباب در محیط متخلخل اثر تزریق فوم نیز در مدت طولانی‌تری باقی خواهد ماند که از نتایج آن بازده جارویی بالا است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر عوامل مختلف بر میزان پایداری فوم در شرایط دمایی و فشاری اتمسفری

مراجع

- [1]. Farhadi H, Riahi S (2016) Nanoparticle-surfactant stabilized CO₂ foam for potential mobility control, Journal of Petroleum Research, 26, 95-3: 4-15.
- [2]. Babamahmoudi S, Jabaran M H, Riahi S (2017) Experimental investigation of foam stability, improvement by nanoparticle and surfactant in the presence of crude oil, Journal of Petroleum Research, 27, 96-1: 152-163.
- [3]. Denkov N D (2004) Mechanisms of foam destruction by oil-based antifoams, Langmuir, 20, 22: 9463.
- [4]. Murray B S, Ettelaie R (2004) Foam stability: proteins and nanoparticles, Current Opinion in Colloid and Interface Science, 9, 5: 314-320.
- [5]. Zhao J, Torabi F, Yang J (2021) The synergistic role of silica nanoparticle and anionic surfactant on the static and dynamic CO₂ foam stability for enhanced heavy oil recovery: An experimental study, Fuel, 287: 119443.
- [6]. Khajepour M, Etmiran R, Goldman J, Wassmuth F, Bryant S (2018) Nanoparticles as foam stabilizer for steam-foam process, SPE Journal, 23, 06: 2232-2242.
- [7]. Chipfunhu D, Bournival G, Dickie S, Ata S (2019) Performance characterisation of new frothers for sulphide mineral flotation. Minerals Engineering, 131: 272-279.
- [8]. Lv Q, Li Z, Li B, Li S, Sun Q (2015) Study of nanoparticle-surfactant-stabilized foam as a fracturing fluid, Industrial and Engineering Chemistry Research, 54: 9468.
- [9]. Yu W, Kanj M Y (2022) Review of foam stability in porous media: The effect of coarsening, Journal of Petroleum Science and Engineering, 208: 109698.
- [10]. Monjezi K, Mohammadi M, Khazali A R (2020) Stabilizing CO₂ foams using APTES surface-modified nanosilica: Foamability, foaminess, foam stability, and transport in oil-wet fractured porous media, Journal of Molecular Liquids, 311: 113043.
- [11]. Yekeen N, Padmanabhan E, Idris A K (2018) A review of recent advances in foam-based fracturing fluid application in unconventional reservoirs, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 66: 45-71.
- [12]. Zheng C, Cheng Y, Wei Q, Li X, Zhang Z (2017) Suspension of surface-modified nano-SiO₂ in partially hydrolyzed aqueous solution of polyacrylamide for enhanced oil recovery, Colloids and Surfaces A: Physico-Chemical and Engineering Aspects, 524: 169-177.
- [13]. Lai N, Tang L, Jia N, Qiao D, Chen J, Wang Y, Zhao X (2019) Feasibility study of applying modified nano-SiO₂ hyperbranched copolymers for enhanced oil recovery in low-mid permeability reservoirs, Polymers, 11, 9: 1483.
- [14]. Jia D (2017) CO₂ Foam for heavy oil recovery: stabilization of CO₂ foam by nanoparticle and polymer.
- [15]. Rio E, Drenckhan W, Salonen A, Langevin D (2014) Unusually stable liquid foams, Advances in Colloid and Interface Science, 205: 74-86.
- [16]. Osei-Bonsu K, Shokri N, Grassia P (2015) Foam stability in the presence and absence of hydrocarbons: From bubble-to bulk-scale, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 481: 514-526.
- [17]. Zeng Y, Muthuswamy A, Ma K, Wang L, Farajzadeh R, Puerto M, Hirasaki G J (2016) Insights on foam transport from a texture-implicit local-equilibrium model with an improved parameter estimation algorithm, Industrial and Engineering Chemistry Research, 55, 28: 7819-7829.
- [18]. Wang W, Zhang L, Tong S, Li X, Song W (2009) Three-dimensional network films of electrospun copper oxide nanofibers for glucose determination, Biosensors and Bioelectronics, 25, 4: 708-714.
- [19]. Koehler S A, Hilgenfeldt S, Stone H A (2000) A generalized view of foam drainage: experiment and theory, Langmuir, 16, 15: 6327-6341.
- [20]. Petkova R, Tcholakova S, Denkov N (2012) Foaming and foam stability for mixed polymer-surfactant solutions: effects of surfactant type and polymer charge, Langmuir, 28, 11: 4996-5009.
- [21]. Pu W F, Liu R, Li B, Jin F Y, Peng Q, Sun L, Yao F S (2015) Amphoteric hyperbranched polymers with multi-stimuli-responsive behavior in the application of polymer flooding, RSC Advances, 5, 107: 88002-88013.
- [22]. Li D, Xu X, Xu J, Hou W (2011) Poly (ethylene glycol) haired layered double hydroxides as biocompatible nanovehicles: Morphology and dispersity study, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 384, 1-3: 585-591.