

Research Article



DOI: 10.22034/ijche.2025.488822.1466



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Experimental Evaluation of Foam Stabilized by Surfactant - Nanosilica Hybrid for Enhanced Oil Recovery

S. M. Hosseini-Nasab^{1*}, K. Gholipour Sangelaji², F. Hormozi³

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

2- M. Sc. Student of Petroleum Engineering, Semnan University

3- Professor of Chemical Engineering, Semnan University

Email: hosseininasab@iust.ac.ir

Abstract

Given the importance of foam stability in the oil phase displacement process, this paper investigates the synergistic effects of the anionic surfactant sodium lauryl ether sulfate and nano-silica on foam stability. To assess the dynamic stability of the foam, its performance was examined at qualities of 60%, 75%, and 90% in a micromodel with dual permeability. A static test was conducted to evaluate the impact of nanoparticles at a fixed surfactant concentration of 3CMC on enhancing foam stability. The effects of nanoparticles on reducing interfacial tension and Wettability alteration were also assessed. Experiment observations indicated that silica nanoparticles, at a concentration of 0.5%Wt, enhance the stability of surfactant foam due to high accumulation at the gas-liquid interface. By adding nano-silica to the surfactant solution, surface properties improved, with a reduction in interfacial tension and a shift in the glass surface wettability toward hydrophilicity. With a decrease in foam quality due to reduced gas saturation, foam mobility decreased, resulting in improved sweep efficiency.

Received: 16 November 2024

Accepted: 26 January 2025

Page Number: 119-131

Keywords:

Foam,
Silica Nanoparticles,
Micromodel,
Wettability,
Enhanced Oil
Recovery

Please Cite this Article Using:

Hosseini-Nasab, S. M., Gholipour Sangelaji, K., & Hormozi, F. (2025). Evaluation of Enhanced Oil Recovery Mechanisms Using Foam Stabilized by Surfactant-Nanosilica Hybrid. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(141), 119-131, [In Persian].



ارزیابی سازوکارهای ازدیاد برداشت نفت به وسیله فوم پایدار شده با هیبرید سورفکتانت و نانوسیلیکا

سید مجتبی حسینی نسب^{۱*}، کوثر قلی پور سنگلجی^۲، فرامرز هرمزی^۳

۱- استادیار مهندسی نفت، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشگاه سمنان

۳- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه سمنان

پیام نگار: hosseininasab@iust.ac.ir

چکیده

باتوجه به اهمیت پایداری فوم در فرایند جابه جایی فاز نفتی، این مقاله اثرات هم افزایی سورفکتانت آنیونی سدیم لوریل اتر سولفات و نانوسیلیکا را بر پایداری فوم بررسی کرده است. برای سنجش پایداری دینامیکی فوم، عملکرد فوم در کیفیت های ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد در میکرومدل با نفوذ پذیری دوگانه بررسی شده است. آزمایش استاتیکی به منظور بررسی تأثیر نانوذرات در غلظت ثابت ۳CMC سورفکتانت بر افزایش پایداری فوم انجام شد. تأثیر نانوذرات بر کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی ارزیابی شد. مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که نانوذرات سیلیکا در غلظت ۰/۵ درصد وزنی، پایداری فوم سورفکتانت را به دلیل تجمع بالا در سطح گاز-مایع افزایش می دهد. با افزودن نانوسیلیکا به محلول سورفکتانت، خواص سطحی با کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی سطح شیشه به سمت آب دوستی بهبود یافت. با کاهش کیفیت فوم به دلیل کاهش اشباع گاز، تحرک فوم کاهش و در نتیجه، راندمان جاروب افزایش یافت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

شماره صفحات: ۱۱۹ تا ۱۳۱

کلیدواژه ها:

فوم،

نانوذرات سیلیکا،

پایداری،

میکرومدل،

ترشوندگی،

ازدیاد برداشت نفت

* تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز

استناد به مقاله:

حسینی نسب، سید مجتبی، قلی پور سنگلجی، کوثر، و هرمزی، فرامرز. (۱۴۰۴). ارزیابی سازوکارهای ازدیاد برداشت نفت به وسیله فوم پایدار شده با هیبرید سورفکتانت و نانوسیلیکا، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۱)، ۱۱۹-۱۳۱.

تزریق گاز با حدود ۳۹ درصد سهم جهانی در بین روش‌های ازدیاد برداشت نفت، یکی از متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در این زمینه است. با این حال، فرایند بازیافت نفت مبتنی بر تزریق گاز به دلیل تحرک بیشتر گاز و چگالی کمتر در مقایسه با نفت دارای راندمان جاروب ماکروسکوپی ضعیف است [۱]. تزریق فوم در ۱۹۵۰ با هدف بهبود نسبت تحرک بین گاز و نفت رایج شد [۲]. گرانروی ظاهری فوم می‌تواند به‌طور قابل توجهی از گرانروی اجزای تشکیل‌دهنده آن فراتر رود و حتی به ۱۰۰۰ برابر برسد [۳]. بر همین اساس، فوم در محیط‌های متخلخل ناهمگن با کاهش تحرک گاز در مناطق با نفوذپذیری بالا مسیره‌های جریان را تغییر می‌دهد و سیال تزریق شده را از مناطق پرتراوا به سمت مناطق کم‌تراوا منحرف می‌کند [۴]. با وجود این برتری‌ها، فوم سورفکتانت به دلیل فروپاشی سریع لایه‌های سطحی مایع نازک به نام لاملا^۱ در شرایط مخزن از جمله دما و شوری بالا، حضور نفت و جذب بالای سورفکتانت به سطوح سنگ ناپایدار است [۵]. از این رو، برای تولید و پایداری طولانی‌مدت در شرایط مخزن به مواد پایدارکننده نیاز دارد. استفاده از نانوذرات در چند دهه اخیر در کاربردهای ازدیاد برداشت نفت برجسته شده است [۶-۷]. برتری‌های نانوذرات به‌عنوان مواد پایدارکننده فوم در شرایط مخزن از مطالعات مختلف اثبات شده است [۸-۱۰]. این امر را می‌توان به جذب برگشت‌ناپذیر و تجمع نانوذرات در سطح مشترک گاز- مایع مشترک گاز- مایع فوم و مرزهای مسطح^۲ نسبت داد؛ در حالی که سورفکتانت‌ها می‌توانند به راحتی از سطح مشترک دفع شوند. رابطه (۱) انرژی لازم برای حذف ذره از سطح مشترک گاز- مایع فومها (به‌عنوان انرژی جدایشی^۳ ذره شناخته می‌شود) برای انتقال یک نانوذره^۴ کروی از قسمت توده به سطح مشترک سیالات مربوطه به شعاع ذره (R)، کشش سطحی (σ) و زاویه تماس آب- جامد (θ_{SA}) است [۱۱].

$$\Delta E = -\pi R^2 \sigma (1 - \cos \theta_{SA})^2 \quad (1)$$

این معادله نشان می‌دهد که ΔE به شدت به ترشوندگی ذرات بستگی دارد و برای اتصال ذرات به سطح گاز- مایع به ترشوندگی متوسط

(زاویه تماس ۹۰°) نیاز است. در میان نانوذرات مختلف در فرایند پایداری سازی فوم، ذرات سیلیکا از لحاظ صرفه اقتصادی بیشتر به کار می‌رود. نانوذرات سیلیکا ذاتاً آب‌دوست است و با اصلاح سطح این ذرات تا آب‌گریزی متوسط تبدیل به ذرات فعال سطحی می‌شود و تمایل دارد که در سطح مشترک گاز/ آب جذب شود و فوم‌های پایداری را تولید کند [۱۲]. روش‌های مختلفی برای تغییر ترشوندگی سطح نانوذرات برای افزایش پایداری فوم استفاده می‌شود؛ این روش‌ها، شامل: (۱) اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات سیلیکا با عامل سیلان‌دار [۱۳]. (۲) پوشش سطحی ذرات با عواملی مانند پلیمرها [۱۴]. (۳) اصلاح درجا با استفاده از مخلوط سورفکتانت و نانوذرات است [۱۵]. تثبیت فوم با فعال‌سازی درجای سطح نانوذرات با استفاده از مخلوط‌های نانوذرات- سورفکتانت از نظر هزینه، زمان و انرژی به صرفه‌تر از اصلاح سطح نانوذرات به روش شیمیایی است [۱۶]. با تغییر نسبت غلظت نانوذرات/ سورفکتانت به دلیل برهم‌کنش الکترواستاتیکی بین سر قطبی سورفکتانت و سطح باردار نانوذرات و همچنین، جاذبه آب‌دوستی و یا آب‌گریزی بین آن‌ها می‌توان ترشوندگی سطح نانوذرات را با جذب مونومرهای سورفکتانت تا حد بهینه برای افزایش پایداری فوم تغییر داد [۱۷]. سان^۴ و همکاران، رفتارهای پراکندگی SiO₂/CTAB آب‌دوست را مطالعه کردند و دریافتند که نانوذرات SiO₂ در حضور CTAB به دلیل تشکیل ساختار تک‌لایه غیراشباع به وسیله مولکول‌های CTAB بر روی نانوذرات آب‌دوست SiO₂ آب‌گریزتر می‌شود. این مسأله، منجر به حرکت نانوذرات از توده به سطح مشترک گاز- مایع فوم و افزایش پایداری فوم می‌شود [۱۸]. گزارش شده است که روش اصلاح درجا و افزایش آب‌گریزی نانوذرات در مقایسه با روش‌های دیگر آسان‌تر و ارزان‌تر است و اتلاف سورفکتانت به سطح سنگ را می‌توان با جذب مخلوط نانوذرات- سورفکتانت به سطح مشترک گاز- مایع کاهش داد [۱۹]. وانگ^۵ و همکاران به مطالعه بر روی فوم سورفکتانت غیر یونی (SF) با استفاده از نانوذرات اتیل سلولز (ECNP) پرداختند و مشاهده کردند که فوم ECNP/SF نسبت به فوم SF در حضور نفت، کف‌پذیری و پایداری بهتری داشته است. ضریب کاهش تحرک فوم ECNP/SF، ۱۰۰ برابر بیشتر از فوم SF و ۳ برابر بیشتر از فوم آلفا لئین سولفونات (AOS) در یک شیشه‌ای بوده است. سپس، فوم به

4. Sun
5. Wang

1. Lamella
2. Plateau Border
3. Detachment Energy

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی سورفکتانت سدیم‌لوریل‌اترسولفات.

Table 1. Chemical properties of Sodium lauryl ether sulfates.

Code	Unit	Value
P-Purity (anionic active)	Wt%	70
P-Unsulfated fatty alcohol	Wt%	2.5
P-Sodium chloride	Wt%	0/5
P-Sodium sulfate	Wt%	1/5
P-Iron	ppm	20
P-Heavy metal (as Pb)	ppm	20
P-Dioxan	ppm	50
P-Formaldehyde	ppm	250
P-Bisulfate	ppm	50
P-Hg	ppm	3
P-Arsenic (as As2O3)	ppm	2

جدول ۲. مشخصات نفت خام استفاده شده در آزمایش‌ها.

Table 2. Specifications of the crude oil used in the experiments.

Density (g/cm ³)	Viscosity (cP)	Asphaltene (%Wt)
0.935	7.378	0.4

۲-۲ آماده‌سازی محلول کفزا

پراکندگی سورفکتانت-نانوسیلیکا با افزودن نانوذرات سیلیس در غلظت‌های متفاوت ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۰ و ۱ درصد وزنی به محلول از پیش رقیق شده SLES در غلظت ثابت CMC^۳ تهیه می‌شود. در طی مراحل آماده‌سازی، محلول به مدت یک ساعت کاملاً با همزن مغناطیسی به هم زده می‌شود تا از تجمع ذرات جلوگیری شود. پراکندگی سورفکتانت-نانوذرات نهایی به مدت ۳۰ دقیقه فراصوت می‌شود.

۲-۳ اصلاح‌سازی سطح شیشه

در این بخش، هدف از نفت‌دوست کردن سطح شیشه، بررسی تأثیر پراکندگی‌های مختلف بر تغییر ترشوندگی سطح شیشه از حالت نفت‌دوست به حالت آب‌دوست است. در ابتدا، نمونه‌های شیشه به وسیله متانول و آب مقطر، شست‌وشو و به مدت ۱۵ دقیقه در آن در دمای ۸۵° سلسیوس خشک شد. محلول رقیق ۵ درصد حجمی ۳ کلروپروپیل تری‌متوکسی سیلان در تلوئن به مدت ۱۵ دقیقه با استیرر به هم زده شد. سطح شیشه به مدت ۳۰ دقیقه در محلول حاصل غوطه‌ور شد. از نو نمونه‌ها با متانول و آب مقطر شست‌وشو و به مدت ۱۵ دقیقه در آن در دمای ۱۰۰° سلسیوس خشک شد.

مغزه سنگ آهک شکافدار اشباع شده از نفت تزریق شد. بازیابی نفت فوم ECNP/SF به طور قابل توجهی بیشتر از تزریق گاز و تزریق فوم AOS بود [۲۰]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ترکیب سورفکتانت و نانوذرات منجر به افزایش پایداری فوم در شرایط مخزن می‌شود که بر بهبود بازیافت نفت تأثیر به‌سزایی دارد.

در ترکیبات سورفکتانت-نانوذره، افزایش بیشتر آب‌گریزی ذرات ممکن است منجر به لخته‌سازی ذرات و فروپاشی فوم شود [۲۱]. بنابراین، بررسی نحوه عملکرد سورفکتانت در تغییرات ترشوندگی سطح ذرات و تعیین غلظت بهینه از نانوذرات و سورفکتانت برای افزایش پایداری فوم ضروری است. در این مقاله، اثر سورفکتانت آنیونی سدیم‌لوریل‌اترسولفات که جزو سورفکتانت‌های زیست‌تخریب‌پذیر و گران‌رو است بر تغییرات ترشوندگی سطح نانوسیلکا آب‌دوست برای افزایش پایداری فوم بررسی می‌شود و سرانجام، میزان اثربخشی فوم تزریقی در کیفیت‌های ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد بر ازدیاد برداشت نفت در یک میکرومدل نفت‌دوست با نفوذپذیری دوگانه بحث و مقایسه می‌شود. کیفیت فوم، حجم گاز موجود نسبت به کل حجم فوم (مایع و گاز) است و یک مشخصه حیاتی است که تأثیر قابل توجهی بر خواص فیزیکی فوم دارد [۲۲]. آزمایش‌های تکمیلی دیگر مانند کشش بین سطحی، تعیین زاویه تماس و پتانسیل زتا نیز برای بررسی سازوکارهای حاکم بر افزایش پایداری استاتیکی و دینامیکی فوم انجام گرفت.

۲. مواد و روش‌های آزمایشگاهی

۲-۱ مواد آزمایشگاهی

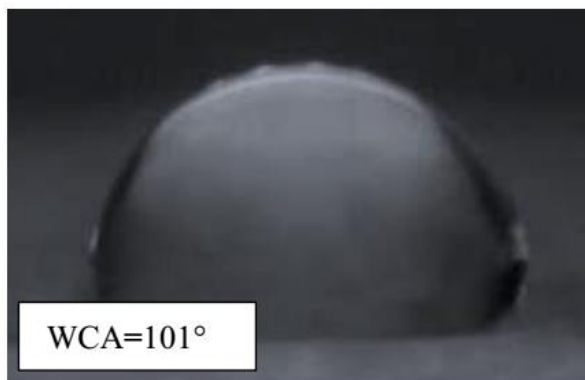
از سورفکتانت آنیونی سدیم‌لوریل‌اترسولفات SLES (شرکت بهدش) با ویژگی‌های ارائه شده در جدول (۱) و نانوسیلیکا با اندازه ۲۰-۱۵ نانومتر و خلوص ۹۹/۵٪ (شرکت US Research Nanomaterials) به عنوان مواد تثبیت‌کننده فوم استفاده شد. نمک استفاده شده، نمک سدیم کلرید NaCl با خلوص ۹۹/۰٪ (شرکت دکتر مجللی) است. از نفت خام با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) در آزمایش‌ها استفاده شده است. برای ساخت محلول اصلاح‌ساز سطح شیشه، تلوئن با خلوص ۹۹٪ (شرکت دکتر مجللی) و تری‌کلرو پروپیل تری‌متوکسی سیلان با خلوص ۹۷٪ (شرکت Sigma-Aldrich) استفاده شد.

پراکندگی‌های مختلف به داخل ستون فوم ریخته می‌شود و گاز نیتروژن که جریان آن با دستگاه کنترل کننده جریان در ۶۰ SCCM ثابت شده است به درون محلول تزریق می‌شود. پس از ۳ دقیقه تزریق، ارتفاع کف حاصل در بازه‌های زمانی مشخص به عنوان معیاری از پایداری فوم، ثبت و گزارش می‌شود.

۲-۵ وسایل آزمایشگاهی

کشش بین سطحی سیالات به روش قطره آویزان ساخت شرکت فناوری ازدیاد برداشت فارس در دما و فشار محیط اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری زاویه تماس از روش قطره بی پایه^۲ استفاده شد. ستاپ مورد استفاده در شکل (۲) نشان داده شد. برای تعیین پتانسیل زتای ذرات از دستگاه زتا سایزر (ZETAVIEW, Particlemetrix) استفاده شده است (هر نمونه ۳ بار اندازه‌گیری و مقدار میانگین گزارش می‌شود). از میکرومدل شیشه‌ای با نفوذپذیری متفاوت که مشخصات آن در جدول (۳) ارائه شده است، برای بررسی جابه‌جایی نفت طی تزریق سیالات استفاده شد (شکل (۲)).

شکل (۱) تصویر قطره آب روی سطح اصلاح شده شیشه است که با دوربین میکروسکوپی ثبت شده است.



شکل ۱. تغییر ترشوندگی سطح شیشه از حالت آب دوست به نفت دوست پس از اصلاح سازی.

Figure 1. Wettability alteration of the glass surface from water-wet to oil-wet after modification.

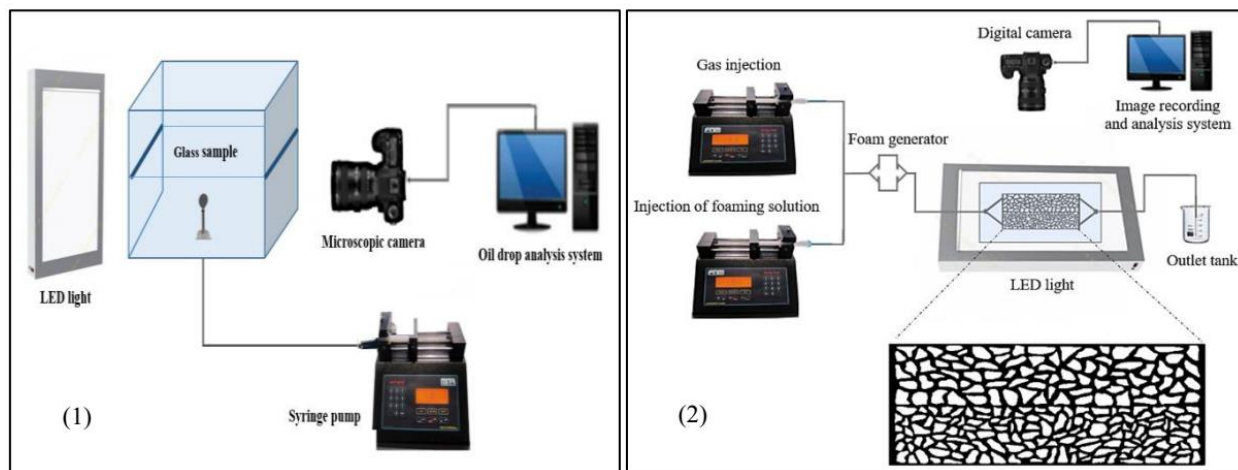
۲-۴ آزمایش استاتیکی فوم

برای تولید و ارزیابی پایداری فوم از روش بایکرمن^۱ استفاده شد [۲۳]. روش کار بدین صورت است که ۲۰ میلی لیتر از محلول

جدول ۳. مشخصات میکرومدل دوبعدی با نفوذپذیری دوگانه به عنوان محیط متخلخل مورد استفاده در آزمایش‌ها.

Table 3. Characteristics of two-dimensional micromodel with dual permeability as a porous media used in experiments.

Length of the Micromodel (Cm)	Width of the Micromodel (Cm)	Depth of the Pores (Cm)	Width of high Permeability (Cm)	Width of Low Permeability (Cm)	Porosity (%)
8.5	3.5	0.02	1.5	1.5	41.54



شکل ۲. طرحواره ستاپ‌های مورد استفاده. (۱): ستاپ مربوط به اندازه‌گیری زاویه تماس، (۲): ستاپ مربوط به سیلابزنی میکرومدل.

Figure 2. Schematic of used setups. (1): The contact angle measurement setup, (2): Micromodel flooding setup.

1. Bikerman

2. Sessile Drop

۲-۶ روند انجام تزریق

برای تغییر ترشوندگی میکرومدل، از روند اصلاح سازی شیشه که در بخش قبل بیان شد، استفاده شده است. پس از انجام هر آزمون این فرایند تکرار می شود. میکرومدل در ابتدا با نفت خام کاملاً اشباع می شود. سیلاب زنی آب نمک (۲/۵ درصد وزنی) به عنوان ازدیاد برداشت ثانویه انجام می شود. براساس سرعت متوسط تزریق سیال در مخزن، دبی کل تزریق در میکرومدل برابر 0.1 ml/hr ثابت شد. نفت با تزریق 1 PV آب نمک به عنوان بازیابی ثانویه به حداکثر تولید رسید. تزریق فوم بلافاصله پس از سیلاب زنی آب نمک به عنوان ازدیاد برداشت ثالثیه انجام شد. در تمامی سناریوهای تزریق، فوم با تزریق همزمان گاز و عامل کف کننده به مولد فوم در دمای محیط تولید می شود. فوم سورفکتانت SLES و فوم ترکیبی سورفکتانت SLES و نانوسیلیکا به ترتیب با کیفیت 90% تحت دبی های جریان 0.09 ml/hr گاز و 0.01 ml/hr محلول کفزا، کیفیت 75% با دبی های جریان 0.075 ml/hr گاز و 0.025 ml/hr محلول و در کیفیت 60% با دبی های جریان 0.06 ml/hr گاز و 0.04 ml/hr محلول به وسیله فوم جنریتور تولید و به میکرومدل تزریق شدند.

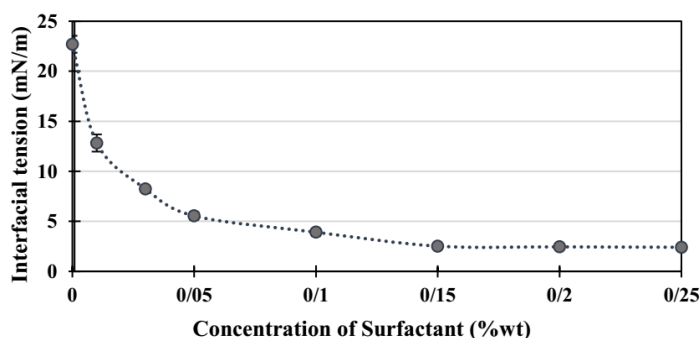
۳. نتایج و بحث

۳-۱ غلظت بحرانی مایسل

از روش کشش سنج^۲ برای تعیین غلظت بحرانی مایسل^۳ استفاده شد. طبق شکل (۳) مقدار CMC سورفکتانت حدود 0.17 درصد وزنی است. در تمامی آزمایش ها از غلظت ثابت 3 CMC (0.51 درصد وزنی) استفاده شد.

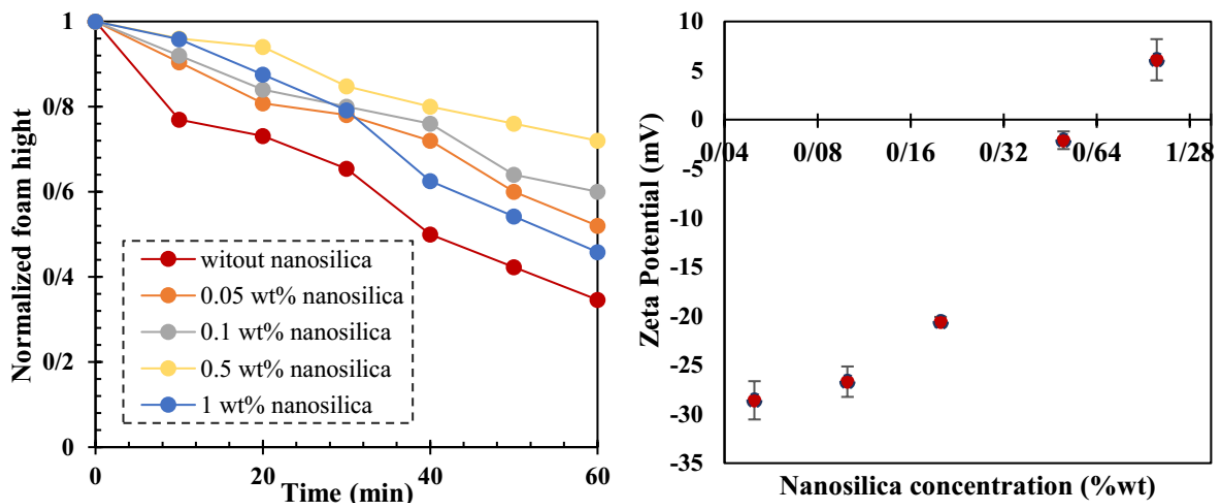
۳-۲ تأثیر برهم کنش بین نانوذرات و سورفکتانت بر پایداری فوم

طبق شکل (۴) پایداری کف با افزایش غلظت نانوذرات از 0.05 درصد وزنی به 0.5 درصد وزنی افزایش و در غلظت 1 درصد وزنی کاهش می یابد. سازوکار پایداری فوم با ذرات را می توان طبق نتایج آزمایش زتا در شکل (۴) اثبات کرد. پتانسیل زتا بالا نشان می دهد که ذرات پایدار هستند؛ زیرا یک نیروی دافعه قوی بین آنها وجود دارد و مقادیر پتانسیل زتا پایین تمایل ذرات برای تجمع را نشان می دهد [۲۴]. همان طور که از نمودار زتا مشخص است، اندازه پتانسیل زتا با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می یابد و در حدود 0.5 درصد وزنی SiO_2 تقریباً صفر شد. در واقع، در غلظت 0.05 درصد وزنی، دافعه الکترواستاتیکی ذره - ذره - سطح کاهش می یابد و سبب می شود که جذب ذرات در سطح مشترک به حداکثر مقدار برسد [۱۷]. در غلظت یک درصد وزنی نانوذرات، قدر مطلق پتانسیل ذره افزایش می یابد که نشان دهنده افزایش دافعه الکترواستاتیکی بین ذرات است که جذب ذرات در سطح مشترک گاز - مایع و در نتیجه، پایداری فوم را کاهش می دهد. می توان نتیجه گرفت که با افزودن نانوسیلیکای آب دوست به محلول سورفکتانت آنیونی، قدرت یونی سامانه افزایش می یابد؛ بنابراین، برخورد بین مولکول های سورفکتانت و نانوذرات به دلیل در دسترس بودن نانوذرات بیشتر در غلظت های بالا افزایش می یابد. در این حالت، برهم کنش جاذبه آب دوستی سر سورفکتانت و سطح نانوسیلیکا منجر به افزایش آگریزی نانوذرات می شود و این امر منجر به حرکت ذرات از فاز توده به سطح مشترک گاز - مایع فوم می شود (شکل (۵)).



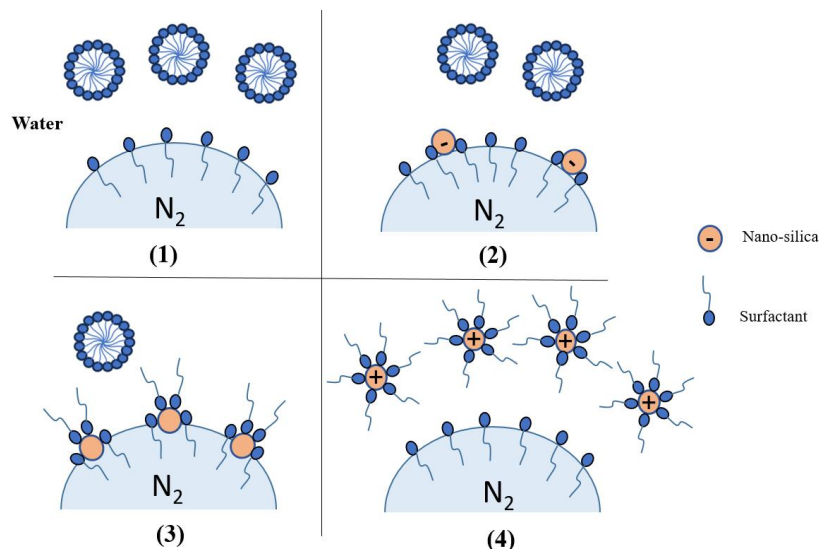
شکل ۳. تأثیر محلول سورفکتانت های تهیه شده در 0.5 درصد وزنی نمک بر کاهش کشش بین سطحی سامانه نفت - آب.

Figure 3. The effect of the surfactant solution prepared in 0.5 wt% of salt on reducing the surface tension of the oil-water system.



شکل ۴. سمت چپ: میزان پایداری فوم با گذشت زمان بر حسب غلظت‌های مختلف نانوسیلیکا در ۰/۵۱ درصد وزنی SLES و ۰/۵ درصد وزنی نمک، سمت راست: پتانسیل زتا بر حسب غلظت‌های مختلف نانوسیلیکا در ۰/۵۱ درصد وزنی SLES و ۰/۵ درصد وزنی نمک.

Figure 4. Left: The amount of foam stability over time in terms of Different concentrations of nanosilica in 0.51 wt% of SLES and 0.5 wt% of salt, Right : Zeta potential according to different concentrations of nanosilica in 0.51 wt% of SLES and 0.5 wt% of salt.



شکل ۵. طرحواره سازوکار اثر هم‌افزایی سورفکتانت و نانوسیلیکا. (۱): بدون حضور نانوذرات، (۲): غلظت پایین نانوذرات، (۳): نسبت غلظت بهینه سورفکتانت- نانوذرات، (۴): غلظت بالای نانوذرات.

Figure 5. Schematic of the synergistic effect mechanism of surfactant and nano-silica in (1): absence of nanoparticles, (2): low concentration of nanoparticles, (3): optimal concentration ratio of surfactant-nanoparticles, (4): high concentration of nanoparticles.

سورفکتانت بیشتری جذب ذرات می‌شود. با انتقال ذرات آب‌گریز به سطح مشترک نفت-آب این مونومرهای سورفکتانت نیز همراه با ذرات به سطح مشترک نفت-آب حمل می‌شوند [۲۶-۲۵]. در نتیجه، سطح از مونومرهای سورفکتانت بیشتری اشباع می‌شود که باعث کاهش بیشتر کشش بین سطحی بین محلول و نفت خام می‌شود. در غلظت یک درصد وزنی نانوذرات به دلیل کاهش تجمع ذرات

۳-۳ تأثیر نانوذرات بر کشش سطحی

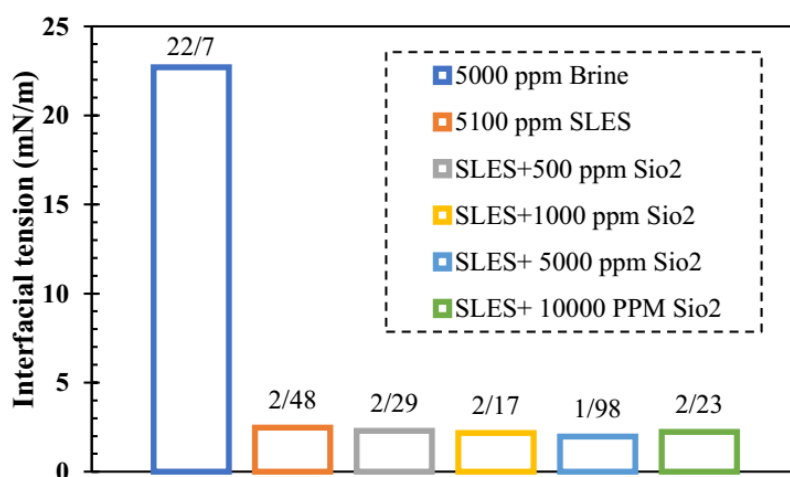
شکل (۶) اثر غلظت‌های مختلف نانوسیلیکا را بر IFT بین نفت و محلول سورفکتانت SLES نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوسیلیکا تا ۰/۵ درصد وزنی کشش بین سطحی کاهش و در غلظت یک درصد وزنی افزایش می‌یابد. در آزمایش زتا نشان داده شد که با افزایش غلظت نانوسیلیکا، مونومرهای

نانوذرات درمقایسه با سورفکتانت سبب می شود که سطح تماس این ذرات با قطره نفت و سطح نفت دوست افزایش یابد و با اعمال فشار انفصال^۱، ترشوندگی سطح را تغییر دهد [۲۷]. طبق نتایج پتانسیل زتای گزارش شده، با افزایش غلظت نانوذرات در ترکیب با سورفکتانت، خاصیت آبگریزی نانوذرات افزایش می یابد؛ در نتیجه، تمایل نانوذرات به جذب بین قطره نفت و سطح نفت دوست افزایش می یابد و این امر منجر به حذف قطره نفت از سطح شیشه و تغییر ترشوندگی از حالت نفت دوست به آب دوست می شود.

حامل مونومرهای سورفکتانت در سطح نفت- آب، کشش بین سطحی افزایش می یابد.

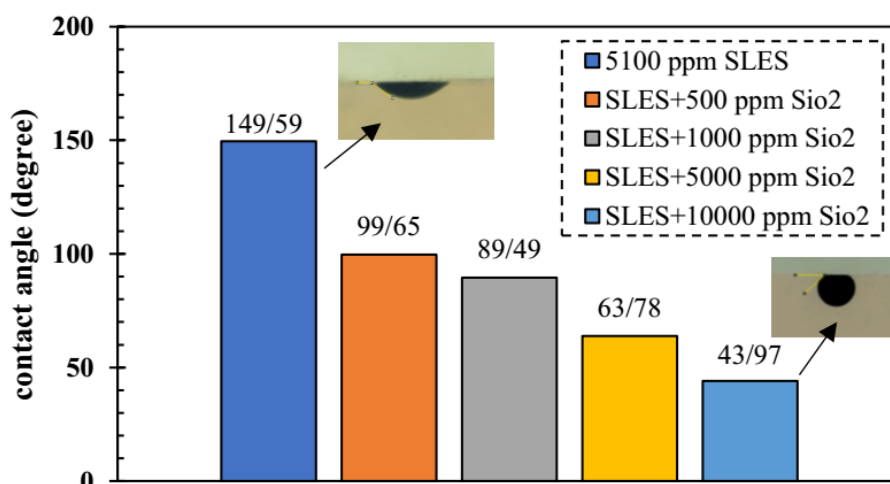
۳-۴ تأثیر نانوذرات بر تغییر ترشوندگی

برای بررسی تغییر ترشوندگی سطح شیشه، ابتدا نمونه شیشه های نفت دوست به مدت ۲۴ ساعت در محلول های مورد نظر غوطه ور شد و پس از آن، زاویه تماس قطره نفت با سطح شیشه با نرم افزار Image-J بررسی شد. نتایج در شکل (۷) نشان می دهد که افزایش غلظت نانوسیلیکا منجر به کاهش زاویه تماس می شود. سطح ویژه بالای



شکل ۶. تأثیر غلظت نانوذرات بر کشش سطحی.

Figure 6. Effect of nanoparticle concentration on interfacial tension.



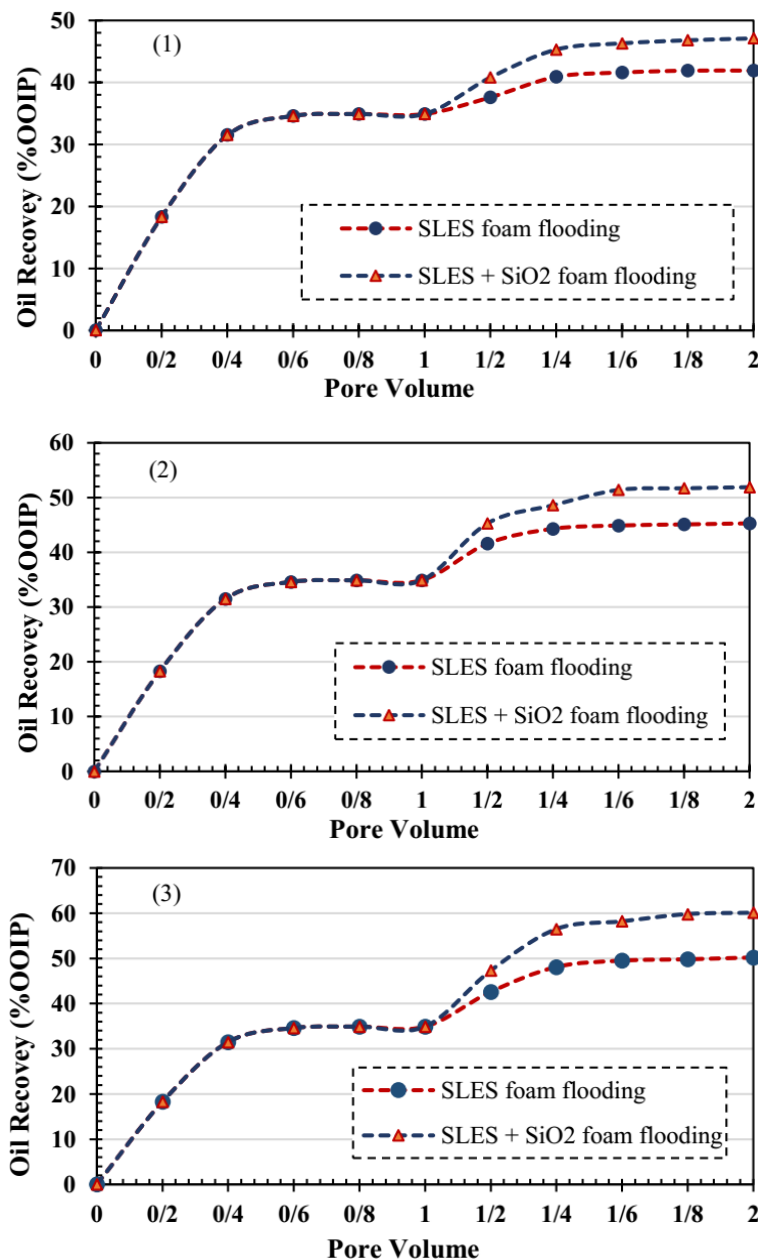
شکل ۷. تأثیر غلظت نانوذرات بر تغییر ترشوندگی.

Figure 7. Effect of nanoparticle concentration on wettability alteration.

۵-۳ آزمایش های سیلاب زنی میکرومدل

مختلف تعریف شده، نشان می دهد. در بازیابی ثانویه پس از تزریق، تقریباً ۰/۵ PV آب نمک، سیال تزریقی به خروجی میکرومدل رسید و با ادامه دادن تزریق، نفت قابل توجهی تولید نشد.

شکل (۸) میزان بازیابی تجمعی نفت ($OOIP\%$) را بر حسب حجم سیال تزریقی به داخل محیط متخلخل (PV) برای سناریوهای



شکل ۸. میزان بازیابی نفت بر حسب حجم سیال تزریقی پس از تزریق ۱ PV آب و (a) ۱ PV فوم سورفکتانت و ۱ PV فوم سورفکتانت و نانوذره در کیفیت ۹۰٪، (b) ۱ PV فوم سورفکتانت و ۱ PV فوم سورفکتانت و نانوذره در کیفیت ۷۵٪، (c) ۱ PV فوم سورفکتانت و ۱ PV فوم سورفکتانت و نانوذره در کیفیت ۶۰٪.

Figure 8. The amount of oil recovery vs. volume of injected fluid for different scenarios after 1 PV of water flooding and (a) 1 PV surfactant foam flooding and 1 PV surfactant-nanoparticle foam flooding at 90% quality, (b) 1 PV surfactant foam flooding and 1 PV surfactant-nanoparticle foam flooding in 75% quality, (c) 1 PV surfactant foam flooding and 1 PV surfactant-nanoparticle foam flooding in 60% quality.

1. Original Oil in Place

نتایج نشان می‌دهد که در بازیابی ثالثیه فوم با کنترل تحرک گاز و مایع و در نتیجه، بهبود راندمان جاروب منجر به بازیابی بیشتر نفت شده است. همچنین، میزان بازیابی نفت با کاهش کیفیت فوم افزایش یافته و این افزایش در حضور نانوذرات بیشتر است. همان‌طور که نتایج آزمایش‌ها نشان داد، با افزودن نانوسیلیکا به سورفکتانت، پایداری فوم حاصل افزایش می‌یابد و علاوه بر آن، خواص سطحی با کاهش کشش بین سطحی و تغییر ترشوندگی از حالت نفت دوست به آب دوست به‌طور مؤثری بهتر شد. به همین دلیل در هر کیفیت، میزان بازیابی نفت با تزریق فوم ترکیبی سورفکتانت و نانوسیلیکا نسبت به تزریق فوم سورفکتانت افزایش یافته است. افزایش میزان بازیابی نفت ناشی از کاهش کیفیت فوم می‌تواند ناشی از چندین اثر باشد: (۱) در حین آزمایش تزریق فوم با افزایش کیفیت، به خصوص در کیفیت ۹۰٪ مشاهده شد که کف تشکیل شده از خروجی مولد فوم دارای لاملای بسیار نازک است که نشان می‌دهد با افزایش کسرگازی، فوم خشک تولید می‌شود. فوم‌های خشک نسبت به فوم‌های آبی به علت تخلیه سریع تر لاملا ناپایدار است. (۲) در کیفیت‌های پایین، میزان اشباع مایع شامل سورفکتانت و نانوذره زیاد است؛ در نتیجه از حجم بیشتری از مواد تثبیت کننده فوم استفاده می‌شود که منجر به افزایش پایداری فوم و بازیابی بیشتر نفت می‌شود. (۳) با افزایش کسرگازی، نسبت تحرک فوم به نفت افزایش و راندمان جاروب کاهش می‌یابد [۲۸]. این پدیده سبب می‌شود تا فوم تزریقی عمدتاً مسیرهای از پیش جاروب شده با آب را در لایه با نفوذپذیری بالا طی کند. شکل (۹) نتایج نهایی تزریق سیلاب زنی میکرومدل را پس از ۱ PV برای سیالات مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیدا است، پس از سیلاب زنی آب، مقدار زیادی نفت در نواحی کم تراوا- که تأثیر نیروهای موینگی بیشتر است- به دام افتاده است. اختلاف چگالی و نسبت تحرک بالای آب و نفت منجر به پیشروی سریع جبهه آب در نواحی با تراکم پذیری بالا و ایجاد پدیده انگشتی شدن می‌شود. در سیلاب زنی‌های فوم با کاهش کیفیت فوم، میزان نفت باقی مانده در نواحی کم تراوا کاهش یافت. همچنین، در هر کیفیت، فوم ترکیبی سورفکتانت- نانوذره، نفت بیشتری را نسبت به فوم سورفکتانت تولید کرده است. همان‌طور که بیان شد، فوم به دلیل گرانروی ظاهری بالا نسبت به آب و گاز می‌تواند مناطق با نفوذپذیری بالا را مسدود کند و جریان سیال را به مناطق با

نفوذپذیری پایین و جاروب نشده، هدایت کند [۴]. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش کیفیت فوم و در حضور نانوذرات، فوم پایداری در لایه با تراوایی بالا تولید شده است که با مسدودسازی مؤثر آن منجر به انحراف حباب‌های گازی به مناطق کم تراوا و در نتیجه، تولید بیشتر نفت از این ناحیه می‌شود.

۴. نتیجه گیری

این مطالعه اثرات هم افزایی نانوذرات SiO_2 و سورفکتانت SLES را در افزایش پایداری فوم بررسی کرد. آزمایش‌های سنجش پایداری دینامیکی فوم در کیفیت‌های متفاوت فوم به وسیله میکرومدل شیشه‌ای با نفوذپذیری دوگانه انجام شد تا اثر کیفیت فوم سورفکتانت و فوم ترکیبی سورفکتانت- نانوسیلیکا بر رفتار جریان فوم طی جابه جایی فاز نفتی ارزیابی شود. نتایج حاصل از آزمایش‌ها، موارد زیر را نشان می‌دهد:

با افزودن نانوسیلیکا به سورفکتانت- به دلیل هم بار بودن بار سطحی ذرات و سر قطبی سورفکتانت- قدرت یونی سامانه افزایش می‌یابد. در نتیجه، برخورد بین مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات افزایش یافت و در این حالت، ترشوندگی سطح نانوذرات به دلیل برهم کنش جاذبه آب دوستی بین آن‌ها در غلظت ۰/۵ درصد وزنی برای انتقال به سطح گاز- مایع فوم تنظیم شد.

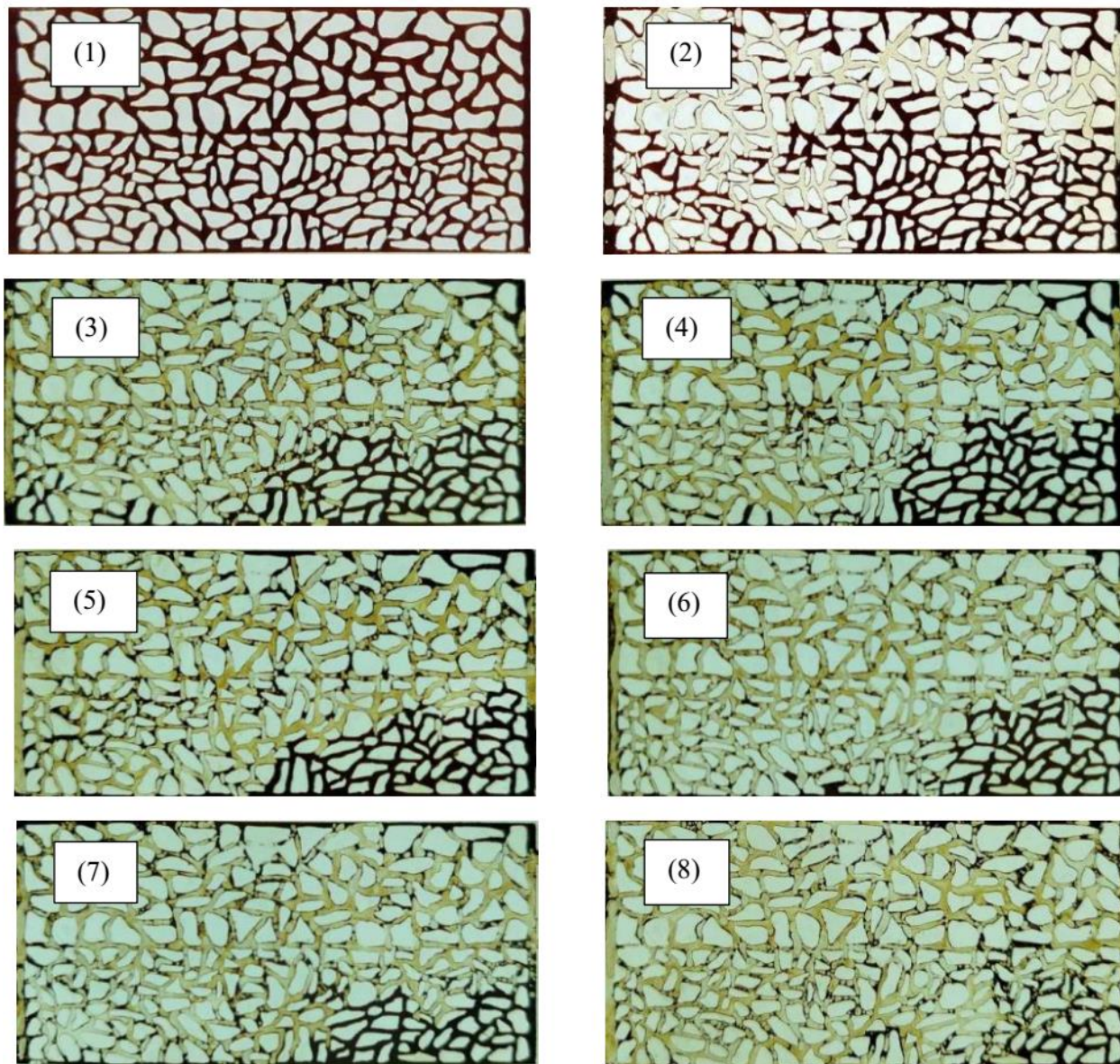
نانوسیلیکا در ترکیب با ۰/۵۱ درصد وزنی سورفکتانت، کشش سطحی را تا غلظت ۰/۵ درصد وزنی به دلیل جذب مونومرهای سورفکتانت و انتقال این مواد در سطح، کاهش می‌دهد و پس از این غلظت افزایش جزئی در کشش سطحی مشاهده شده است. بنابراین، انتخاب نسبت غلظت بهینه سورفکتانت- نانوذره به بهبود وجود مؤثر سورفکتانت‌ها در سطح و در نتیجه، دستیابی به کمترین IFT کمک می‌کند.

با کاهش اشباع گاز ناشی از کاهش کیفیت فوم، پایداری فوم افزایش و تحرک فوم کاهش یافت که این امر منجر به بهبود راندمان جاروب و افزایش تولید نفت شد.

با تزریق فوم ترکیبی سورفکتانت و نانوسیلیکا به دلیل اثرات هم افزایی سورفکتانت و نانوسیلیکا از جمله افزایش پایداری فوم، کاهش کشش بین سطحی و تغییر ترشوندگی از حالت نفت دوست به آب دوست، میزان بازیابی نفت در تمامی کیفیت‌ها افزایش یافت. با

ترکیبی سورفکتانت و نانوذرات حاصل شده است.

کاهش کیفیت فوم از ۹۰٪ به ۶۰٪، ۸ درصد افزایش بازیابی نفت با تزریق فوم سورفکتانت و ۱۳ درصد افزایش بازیابی نفت با تزریق فوم



شکل ۹. تصاویر جابه‌جایی نفت در میکرومدل شیشه‌ای. (۱): میکرومدل اشباع‌شده از نفت، (۲): پس از تزریق ۱ PV آب نمک، (۳): پس از تزریق ۱ PV آب نمک و ۱ PV فوم سورفکتانت در کیفیت ۹۰٪، (۴): پس از تزریق ۱ PV آب نمک و ۱ PV فوم سورفکتانت-نانوذره در کیفیت ۹۰٪، (۵): پس از تزریق ۱ PV آب نمک و ۱ PV فوم سورفکتانت در کیفیت ۷۵٪، (۶): پس از تزریق ۱ PV آب نمک و ۱ PV فوم سورفکتانت-نانوذره در کیفیت ۷۵٪، (۷): پس از تزریق ۱ PV آب نمک و ۱ PV فوم سورفکتانت در کیفیت ۶۰٪، (۸): پس از تزریق ۱ PV آب نمک و ۱ PV فوم سورفکتانت-نانوذره در کیفیت ۶۰٪.

Figure 9. Pictures of oil movement in glass micromodel. (1): micromodel saturated with oil, (2): after 1 PV of water flooding, (3): after 1 PV of water flooding and 1 PV surfactant foam flooding at 90% quality, (4): after 1 PV of water flooding and 1 PV of surfactant-nanoparticle foam flooding at 90% quality, (5): after 1 PV of water flooding and 1 PV surfactant foam flooding at 75% quality, (6): after 1 PV of water flooding and 1 PV of surfactant-nanoparticle foam flooding at 75% quality, (7): after 1 PV of water flooding and 1 PV surfactant foam flooding at 60% quality, (8): 1 PV of water flooding and 1 PV of surfactant-nanoparticle foam flooding at 60% quality.

- [1] Rossen, W. R., Vikingstad, A. K. (2010). Injection Strategies To Overcome Gravity Segregation in Simultaneous Gas and Water Injection Into Homogeneous Reservoirs. *SPE Journal*, 15(01), 76-90.
- [2] Bond, D. C., Holbrook, O. C., Lake, C. (1958). Gas drive oil recovery process. *Chemical Research Journal*. 51(5), 2214-2226.
- [3] Zhu, T., Ogbe, D.O., Khataniar, S. (2004). Improving the foam performance for mobility control and improved sweep efficiency in gas flooding. *Industrial & engineering chemistry research*, 43(15), 4413-4421.
- [4] Blaker, T., Aarra, M., Skauge, A., Rasmussen, L., Celius, H. K., Martinsen, H. (2002). Foam for gas mobility control in the Snorre field: the FAWAG project. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 5(04), 317-323.
- [5] Rio, E., Binnace, A.L. (2014). Thermodynamic and mechanical timescales involved in foam film rupture and liquid foam coalescence. *ChemPhysChem*, 15(17), 3692-3707.
- [6] Naghizadeh, A., Azin, R., Asfour, S., Fatehi, R. (2018). A Study of Nanoparticles Application in Different Oil and Gas Reservoir Rock Types. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 17(97), 32-43, [In Persian].
- [7] Hasani, M.R., Sabzidizajyekan, B., Jafari, A. (2024). Experimental Investigation of Modified Iron Oxide Nanoparticles with Ascorbic Acid on Enhanced Oil Recovery. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(135), 7-16, [In Persian].
- [8] Wu, X., Hou, Z., Wang, H., Yang, Y., Liu, X., Chen, Z.H., Cui, Z.H. (2023). Synergistic effects between anionic surfactant SDS and hydrophilic silica nanoparticles in improving foam performance for foam flooding. *Journal of Molecular Liquids*, 390, 123-156.
- [9] Pang, J., Mohanty, K. (2024). Surfactant-Nanoparticle Foam to Increase CO₂ Storage in High-Salinity Carbonate Reservoirs. *Energy & Fuels*, 29(2), 467-479.
- [10] Khajehpour, M., Etminan, S.H., Goldman, J., Wassmuth, F., Bryant, S. (2018). Nanoparticles as foam stabilizer for steam-foam process. *SPE Journal*, 23(06), 2232-2242.
- [11] 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, 119-443.
- [12] Li, S., Yang, K., Li, Z.H., Zhang, K., Jia, N. (2019). Properties of CO₂ foam stabilized by hydrophilic nanoparticles and nonionic surfactants. *Energy & Fuels*, 33(6), 5043-5054.
- [13] Choi, M., Choi, W., Jung, C.H., Kim, S.E. (2020). The surface modification and characterization of SiO₂ nanoparticles for higher foam stability. *Scientific Reports*, 10(1), 19399.
- [14] Li, X., C, P. U., Chen, X. (2022). Improved foam stability through the combination of silica nanoparticle and thixotropic polymer: An experimental study. *Journal of Molecular Liquids*, 346, 117-153.
- [15] Gu, Z., Lu, T., Li, Zh., Xu, Z. (2022). Experimental investigation on the SiO₂ nanoparticle foam system characteristics and its advantages in the heavy oil reservoir development. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 214, 110-438.
- [16] Long, B., Wang, D., Niu, R., Song, H., Ma, Y., Qu, G., He, J. (2020). In-situ activation of nano-silica and its foam stabilization mechanism. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 41(1), 72-80.
- [17] Sun, Q., Li, Z., Wang, J., Li, S., Li, B., Jiang, L., Wang, H., Lü, Q., Zhang, C.H., Liu, W. (2015). Aqueous foam stabilized by partially hydrophobic nanoparticles in the presence of surfactant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 471, 54-64.
- [18] Li, S., Qiao, C., Li, Z., Wanambwa, S. (2017). Properties of Carbon Dioxide Foam Stabilized by Hydrophilic Nanoparticles and Hexadecyltrimethylammonium Bromide. *Energy & Fuels*, 31(2), 1478-1488.
- [19] Yu, J., An, C.H., Mo, D., Liu, N., Lee, R. (2012). Study of adsorption and transportation behavior of nanoparticles in three different porous media. Presented at the *SPE Improved Oil Recovery Conference*, Oklahoma, USA, 153-337.
- [20] Xuezhen, W., Kishore, M.K. (2022). Nanoparticle Stabilized Strong Foam for EOR in High Salinity Fractured Carbonate Reservoirs. Presented at the *SPE Improved Oil Recovery Conference*, Virtual, 209-435.
- [21] Hunter, T.N., Pugh, R., Franks, G., Jameson, G. (2008). The role of particles in stabilizing foams and emulsions. *Advances in colloid and interface science*, 137(2), 57-81.
- [22] Salih, M., Ahmed, R., Amani, M. (2023). Stabilization of Drilling Foams Using Nanoparticles. Presented at the *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*, Texas, USA, 213-839.
- [23] Bikerman, J. (1973). Measurement of foaminess, in Foams. *Springer*, 65-97.
- [24] Rad, M. (2018). Natural gas foam stabilization by a mixture of oppositely charged nanoparticle and surfactant and the underlying mechanisms. PhD Thesis, University of Calgary, Canada.

- [25] Zargartalebi, M., Kharrat, R., Barati, N. (2015). Enhancement of surfactant flooding performance by the use of silica nanoparticles. *Fuel*, 143, 21-27.
- [26] Rezaei, A., Khodabakhshi, A., Esmaili, A., Razavifar, M. (2022). Effects of initial wettability and different surfactant-silica nanoparticles flooding scenarios on oil-recovery from carbonate rocks. *Petroleum*, 8(4), 499-508.
- [27] Rostami, P., Sharifi, M., Aminshahidy, B., Fahimpour, J. (2019). The effect of nanoparticles on wettability alteration for enhanced oil recovery: micromodel experimental studies and CFD simulation. *Petroleum Science*, 16, 859-873.
- [28] Mo, D., Yu, J., Liu, N., Lee, R. (2012). Study of the effect of different factors on nanoparticle-stablized CO₂ foam for mobility control. Presented at the *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Texas, USA, 159-282.