

بررسی آزمایشگاهی پایداری فوم حاصل از نانوذره و سورفکتانت در حضور نفت خام

سپیده بابامحمودی، محمدهادی جباران و سیاوش ریاحی*

انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۹/۲۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۱

چکیده

تزریق گاز به مخزن نفتی یکی از پرکاربردترین روش‌های ازدیاد برداشت نفت است. اما تحرک‌پذیری نامطلوب ناشی از ویسکوزیته کم گاز منجر به جاروب نشدن بخشی از مخزن می‌شود. فوم با افزایش ویسکوزیته ظاهری گاز، این مشکل را کاهش می‌دهد. به علت کشش بین سطحی بالا در فصل مشترک گاز و آب، برای تشکیل سطح میان گاز و مایع انرژی زیادی لازم است. در اثر تزریق سورفکتانت انرژی لازم کاهش یافته و ناپایداری فوم را کاهش می‌دهد. اما عواملی چون جذب و تجزیه سورفکتانت تحت شرایط سخت دمایی و فشاری مخزن، کارایی سورفکتانت را محدود می‌کند. بدین‌منظور، نانوذرات بدون بروز مشکل استفاده می‌شوند. از آنجایی که در تزریق فوم به مخزن، حضور نفت امری ناگزیر است و امکان حذف یا تغییر ساختار آن ممکن نیست، بررسی تأثیر نفت‌خام بر فوم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پروژه، فوم حاصل از نانوسیلیکا و سورفکتانت SDS مطالعه شده و تفاوت آن با فوم حاصل از سورفکتانت تنها بررسی می‌شود. سپس تأثیر انواع نفت‌خام با ویسکوزیته‌های مختلف بر فوم مطالعه می‌شود. برای این کار با استفاده از روش استاتیک «مخلوط کردن» و به کمک دستگاه آزمایشگاهی که بدین‌منظور طراحی شده، میزان فوم‌زایی و پایداری فوم در درصدهای مختلف این سه نفت‌خام بررسی می‌شود. طبق نتایج، حضور نانوذره بر فوم‌زایی تأثیری ندارد اما پایداری فوم را افزایش می‌دهد. در رابطه با اثر نفت خام نیز مشخص شد که حضور نفت خام پایداری فوم را کاهش می‌دهد و با افزایش اشباع نفت، این کاهش پایداری بیشتر می‌شود. همچنین معلوم شد که با افزایش ویسکوزیته نفت، پایداری و خواص فوم بهبود می‌یابد.

کلمات کلیدی: فوم‌زایی، پایداری فوم، نانوسیلیکا، سورفکتانت SDS، نفت خام

مقدمه

جایگزین نماید. اما ناهمگونی مخزن و بالاروی ثقلی گاز منجر به کاهش بازده جاروب می‌شود [۱]. استفاده از فوم، مشکلات ناشی از تزریق گاز مانند بازده پایین جاروب را کاهش می‌دهد. مکانیسم اصلی که فوم با استفاده از آن تحرک گاز را کاهش می‌دهد، بی‌حرکت کردن و یا به دام انداختن بخش زیادی از گاز در محیط متخلخل و افزایش ویسکوزیته ظاهری گاز می‌باشد [۲].

تزریق گاز به مخزن یکی از پرکاربردترین روش‌های ازدیاد برداشت نفت به شمار می‌رود. چنانچه گاز طی یک یا چند تماس با نفت امتزاج یابد، می‌تواند در حجم جاروب شده تقریباً تمام نفت را

ما و همکاران تأثیر هم‌گذاری نانوذره و سورفکتانت بر کشش سطحی مؤثر را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها ابتدا اثر نانوذره تنها بر روی کشش سطحی مؤثر را بررسی کردند. طی آزمایش‌ها معلوم شد که استفاده از نانوذره تنها، تأثیر بسیار اندکی بر کشش سطحی مؤثر دارد. آن‌ها دریافتند که چون سیلیکا آب‌دوست بوده، از این‌رو تمایلی به قرار گرفتن در سطح تماس آب-هوا نداشته است. یکی دیگر از بخش‌های مهم کار آن‌ها، بررسی میزان جذب در سطح تماس آب-هوا در زمانی بود که سیستم هم دارای نانوذره و هم دارای سورفکتانت بود. برای این منظور سورفکتانت آنیونی SDS^۲ انتخاب شد و نتیجه‌ی کار با نتایج راورا و همکارانش که از سورفکتانت کاتیونی CTAB^۳ استفاده کرده بودند، مقایسه شد.

در این مطالعات، کشش سطحی مؤثر به‌عنوان تابعی از غلظت سورفکتانت برای سیستم محتوی SDS تنها و سیستم محتوی ترکیب SDS و نانو سیلیکا مقایسه شده است. برای تمام سامانه‌ها، با افزایش غلظت سورفکتانت کشش سطحی مؤثر کاهش می‌یابد. جالب توجه است که حضور نانوذره موجب افزایش بازدهی مولکول‌های SDS می‌شود (در غلظت‌های کم سورفکتانت که کشش سطحی مؤثر با شیب زیادی کاهش می‌یابد). اما در غلظت‌های بالای سورفکتانت که کشش سطحی مؤثر تقریباً ثابت است، اثر چندانی ندارد [۷].

با مقایسه سیستم محتوی نانو سیلیکا و سورفکتانت آنیونی SDS با سیستم محتوی نانو سیلیکا و سورفکتانت کاتیونی CTAB نتیجه می‌شود که در سیستم دوم به دلیل برهمکنش جاذبه‌ای که بین نانوذره و CTAB وجود دارد، ذرات سورفکتانت به سطح نانوذره چسبیده و به طرز چشمگیری بازده سیستم را کاهش می‌دهند. اما در سیستم موجود،

فوم به‌صورت توزیعی از حباب‌های گاز که در فاز مایع پراکنده شده‌اند تعریف می‌شود که در آن اندازه‌ی حباب‌ها خیلی کوچک‌تر از اندازه ظرف است. به علت کشش سطحی بالا میان فاز گازی و آبی برای تشکیل سطح میان گاز و مایع، انرژی زیادی لازم است [۳]. در اثر تزریق سورفکتانت انرژی لازم جهت تشکیل سطح میان دو فاز کاهش می‌یابد و در نتیجه فوم تشکیل شده دارای پایداری بیشتری می‌شود. این ترکیبات فعال سطحی هستند و از این‌رو تأثیر زیادی بر سطح و خواص سطحی محلول‌ها خواهند داشت. با افزایش غلظت سورفکتانت در زیر "غلظت بحرانی میسل"^۱، کشش سطحی کاهش می‌یابد که باعث کم شدن انرژی مکانیکی مورد نیاز برای تولید فوم می‌شود. در بالای غلظت بحرانی میسل، کشش سطحی تقریباً ثابت می‌ماند و افزایش غلظت سورفکتانت تأثیر اندکی بر پایداری فوم دارد و تنها باعث هدر رفتن سورفکتانت می‌شود [۴]. با این حال عوامل مختلفی از جمله جذب سورفکتانت بر روی سنگ مخزن، از بین رفتن سورفکتانت به دلیل پخش شدن در نفت و تجزیه سورفکتانت تحت شرایط سخت مخزنی، کارایی اقتصادی استفاده از سورفکتانت را محدود می‌کند [۵].

بینک و همکاران نشان دادند که نانوذرات برخلاف سورفکتانت‌ها می‌توانند بدون جذب شدن یا شکست شیمیایی استفاده شوند. از آنجا که نانوذرات نیروی چسبندگی بیشتری نسبت به سورفکتانت‌ها در سطح تماس بین دو سیال دارند، بنابراین مستعد پایداری طولانی‌تری می‌باشند. علاوه بر این، نانوذرات را می‌توان با صرف هزینه‌ای مناسب از مواد خام ارزان مانند خاکستر و سیلیکا به دست آورد. مطالعات زیادی گزارش شده که در آن‌ها از ذرات کلوئیدی با شیمی سطح‌های مختلف برای پایداری فوم استفاده شده است. سطح این ذرات توسط سورفکتانت‌ها و یا پلیمرها پوشیده شده است تا بتوانند به‌عنوان عوامل فعال سطحی عمل کنند [۶].

1. Critical Micelle Concentration (cmc)
2. Sodium Dodecyl Sulfate
3. Cetyl Trimethylammonium Bromide

جابجایی نفت در فوم است. این عدد نشان‌دهنده تمایل یک فاز نفتی برای امولسیون شدن و جذب شدن به درون لاملا می‌باشد. یک عبارت پیشنهادی ساده برای عدد لاملا عبارت است از:

$$L = 0.15 \frac{\sigma_{w/g}}{\sigma_{w/o}} \quad (3)$$

بر اساس این نظریه، نفت‌ها یا فوم را ناپایدار می‌کنند، یا فوم نسبتاً پایدار ایجاد می‌کنند و یا تأثیر کمی بر فوم از خود نشان می‌دهند. بر اساس آزمایش‌های انجام شده در یک میکرو سلول دیداری، اسکرام و نواساد سه نوع فوم الف، ب و ج را تعریف نموده‌اند. مقدار عدد لاملا برای هریک از این سه نوع فوم به شرح زیر است [۱۳]:

فوم نوع الف: $L < 1$ ؛

• فوم نوع ب: $1 < L < 7$ ؛

• فوم نوع ج: $L > 7$ ؛

فوم‌های نوع "الف" بهترین پایداری را در حضور نفت از خود نشان می‌دهند. این شرایط اشاره به حالتی دارد که در آن هر دو ضریب پخش و ضریب ورود منفی هستند. این فوم‌ها، برهم‌کنش‌های کمی را با نفت خام از خود نشان می‌دهند. فوم‌های نوع "ب" دارای ضریب پخش منفی و ضریب ورود مثبت است. این فوم‌ها در مجاورت نفت نسبتاً پایدار خواهند بود. فوم‌های نوع "ج" در مجاورت نفت فوم‌های ناپایداری خواهند بود. هر دو ضریب پخش و ضریب ورود برای این فوم‌ها مثبت می‌باشد.

ضریب پل زنی

پارامتر دیگری که اغلب در هنگام بحث در مورد بازده ضد فومی افزودنی‌های نفتی به فوم مطرح می‌شود، ضریب پل زنی (B) است [۱۴-۱۶]. معادله ضریب پل زنی به شرح زیر است:

$$B = \sigma_{w/g}^2 + \sigma_{w/o}^2 - \sigma_{o/g}^2 \quad (4)$$

برای اینکه نفت به‌عنوان یک عامل ضد فوم عمل کند، لازم است ضریب پل زنی مثبت باشد (گرچه کافی نیست).

نیروی دافعه‌ای موجود بین نانو سیلیکا با بار الکتریکی منفی و SDS منفی منجر به ترغیب سورفکتانت برای پخش شدن در سطح میان دو سیال می‌شود.

در این مقاله، فوم حاصل از نانوذره سیلیکا و سورفکتانت SDS مورد مطالعه قرار می‌گیرد و تفاوت آن با فوم حاصل از سورفکتانت تنها بررسی می‌شود. سپس تأثیر انواع نفت خام با ویسکوزیته‌های مختلف بر فوم مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

پایداری فوم در حضور نفت

به‌طور کلی حضور نفت بر پایداری فوم اثر خواهد داشت. نفت خام دارای ترکیبات و خواص پیچیده‌ای می‌باشد. نفت می‌تواند در میسل‌ها حل شود، یا به‌عنوان یک امولسیون باقی بماند و یا به‌عنوان یک فاز نفتی پیوسته در فیلم‌های مایع باقی می‌ماند. جهت‌گیری نفت و خواص آن، در اثرگذاری و یا بی‌اثری نفت بر فوم بسیار مهم هستند. میزان وابستگی به غلظت سورفکتانت و نانوذره، ترکیبات آب نمک، دما و فشار نیز بر پایداری فوم در حضور نفت بسیار مهم است. چهار نظریه کلی برای توضیح پایداری فوم در حضور نفت وجود دارد که عبارتند از ضریب پخش^۱ و ضریب ورود^۲؛ عدد لاملا^۳؛ ضریب پل زنی^۴ و نظریه فیلم شبه امولسیون [۸].

$$\sigma = \sigma_{w/g} - \sigma_{w/o} - \sigma_{o/g} \quad (1)$$

$$E = \sigma_{w/g} + \sigma_{w/o} - \sigma_{o/g} \quad (2)$$

$\sigma_{w/g}$ کشش سطحی بین آب و گاز، $\sigma_{w/o}$ کشش سطحی بین آب و نفت و $\sigma_{o/g}$ کشش سطحی بین نفت و گاز می‌باشد. طبق این تعریف چنانچه ضریب پخش مثبت باشد، نفت در سطح گسترش یافته و فوم را می‌شکند. چنانچه ضریب پخش منفی باشد، نفت به‌عنوان یک قطره در سطح باقی خواهد ماند و طبق نظریات این یک شرط لازم برای پایداری فوم است.

عدد لاملا

عدد لاملا یکی دیگر از روش‌های تعیین پایداری

1. Spreading Coefficient
2. Entering Coefficient
3. Lamella Number
4. Bridging Coefficient

پیچیده است. آنالیز داده‌های چند متغیره نشان داد که هیچ یک از پارامترها به‌تنهایی قادر به توضیح برهمکنش پیچیده‌ی مشاهده شده نیست [۱۹].

بی‌ثباتی فوم

بی‌ثباتی فوم به دلایل مختلفی می‌تواند رخ دهد: اول، نیروی گرانش سبب تخلیه مایع از ساختار فوم و تجمع آن در زیر فوم می‌شود. همچنین فوم به دلیل وجود فشار اسمز ناپایدار می‌شود. این فشار سبب تخلیه‌ی فوم از لاملا تا پلاتو می‌شود، زیرا غلظت درونی فوم متفاوت است و فشار لاپلاس به دلیل وجود اختلاف فشار، سبب انتشار گاز از حباب‌های کوچک به حباب‌های بزرگ می‌شود. علاوه بر این‌ها، فیلم مایع ممکن است تحت فشار دیسجوبینینگ^۱ بشکند. این عوامل می‌توانند منجر به بازآرایی ساختار فوم از حالت حباب به ساختارهایی بزرگ‌تر شوند. رابینسکی و هدامار رابطه‌ای را برای محاسبه سرعت گسترش و بزرگ شدن حباب‌های فوم ارائه دادند، با فرض اینکه حباب‌ها کروی بوده و دارای شعاع r باشند (رابطه ۵) [۲۰].

$$u = \frac{2gr^2}{9\eta}(\rho_2 - \rho_1) \quad (5)$$

u سرعت بزرگ شدن حباب‌ها، ρ_1 دانسیته گاز، ρ_2 دانسیته مایع، η ویسکوزیته مایع و g شتاب گرانش است.

مواد و روش‌های آزمایشگاهی توده فوم

روش‌های آزمایشگاهی

پایداری فوم را می‌توان با روش‌های مختلفی از جمله روش دینامیک و استاتیک مورد بررسی قرار داد. یکی از روش‌های بررسی دینامیک عملکرد فوم، روش سیلاب‌زنی مغزه می‌باشد. تعدادی از روش‌های استاتیک بررسی توده‌ی فوم نیز عبارت‌اند از روش مخلوط کردن، آزمون راس-میل، آزمون لرزشی، آزمون کف‌زایی تحت جریان گاز و غیره [۲۱].

در این مقاله، از روش استاتیک "مخلوط کردن" استفاده شده

حتی زمانی که ضریب پخش منفی باشد به محض اینکه قطره وارد هر دو سطح فیلم مایع شود، به‌طوری‌که بین دو فیلم پل ایجاد کند، فوم ناپایدار می‌شود.

نظریه فیلم شبه امولسیون

طبق این نظریه، پایداری فوم در حضور نفت به پایداری یک فیلم شبه امولسیون مربوط است. یک فیلم شبه امولسیون، فیلم مایع نازک است که بین قطرات نفت و فاز گازی قرار می‌گیرد. اگر فیلم شبه امولسیون پایدار باشد، نفت در لاملا باقی می‌ماند. چنانچه فیلم شبه امولسیون پاره شود، یک لنز نفتی ممکن است در سطح تماس آب-گاز شکل گیرد و فوم را در هم بشکند [۱۷].

فرزانه و همکاران، عملکرد فوم در حضور نفت خام سبک و سنگین را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها همچنین تأثیر انواع سورفکتانت در غلظت‌های مختلف را نیز بررسی کردند. بر اساس این آزمایش‌ها معلوم شد که در مجاورت نفت خام، سورفکتانت آنیونی فوم بهتری را در مقایسه با سورفکتانت غیر یونی تولید می‌کند. همچنین معلوم شد که با افزایش غلظت سورفکتانت، نیم‌عمر فوم افزایش می‌یابد اما یک غلظت بهینه برای سورفکتانت وجود دارد. در رابطه با اثر نفت خام نیز مشخص شد که حضور نفت خام پایداری فوم را کاهش می‌دهد و با افزایش اشباع نفت، کاهش پایداری فوم چشمگیرتر خواهد شد اما با افزایش ویسکوزیته نفت، پایداری فوم بیشتر خواهد شد [۱۸].

آنه کاری و همکاران برهمکنش میان فوم و نفت خام را با استفاده از روش استاتیک بررسی توده فوم مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور از ۶ نوع نفت خام با خواص فیزیکی و شیمیایی مختلف استفاده کردند. محلول مولد فوم دارای ۰/۵ درصد وزنی سورفکتانت AOS و ۱ درصد وزنی نمک سدیم کلرید بود. بر اساس نتایج معلوم شد که تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی نفت خام بر فوم بسیار

جدول ۱ ویسکوزیته و درجه API نفت‌های الف، ب و ج.

نفت خام	درجه API	ویسکوزیته (kg/m.s)
الف	۴۹/۹	۰/۰۰۱۱۷
ب	۲۸/۵	۰/۰۲۳۸۸
ج	۲۰	۰/۶۲۷۲۵

در این روش cc ۲۰۰ از محلول مولد فوم به درون استوانه مدرج ریخته می‌شود. سپس مقدار مشخص از نفت به آن اضافه می‌شود. نرخ تزریق گاز به درون سیال مولد توسط MFC برای تمام آزمایش‌ها برابر با ۲۰۰ min/cc در فشار ۱۴/۷ psi تنظیم می‌شود. همزمان با تزریق گاز از یک سو، هوای موجود در استوانه از مسیر دیگر تخلیه می‌شود. این تزریق ۵ min ادامه می‌یابد تا تمام فضای استوانه از هوا خالی شده و پر از گاز نیتروژن شود. پس از پایان مدت زمان تزریق، شیر گاز و تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها بسته شده و همزن روشن شده و با دور ۶۰۰ rpm به مدت ۲ min محلول حاوی نفت را به هم می‌زند. پس از اتمام دو دقیقه دستگاه را خاموش کرده و ارتفاع فوم در بازه‌های زمانی مختلف ثبت می‌شود. بدین ترتیب کاهش ارتفاع فوم با گذشت زمان به عنوان معیاری از پایداری فوم اندازه‌گیری می‌شود.

نتایج

آزمایش رسانایی سنجی

غلظت بحرانی میسل SDS، با آزمایش رسانایی سنجی به دست آمد. این گونه که در هر مرحله غلظت معینی از سورفکتانت در آب دیونیزه حل شد و سپس با دستگاه رسانایی سنج میزان رسانایی محلول اندازه‌گیری شد و نموداری همانند شکل ۲ رسم شد که در این نمودار محل تلاقی دو خط با شیب‌های متفاوت، غلظت بحرانی میسل برای سورفکتانت SDS را نشان می‌دهد. با افزایش غلظت

و دستگاه آزمایشگاهی که بدین منظور طراحی شده که در بخش بعد به آن پرداخته شده است.

مواد آزمایشگاهی

نانوذره مورد استفاده در این پروژه، نانو سیلیکا با قطر ۲۰-۳۰ nm نانومتر و درصد خلوص بالای ۹۸٪ می‌باشد که به صورت پودر جامد از شرکت نانو ثانی خریداری شده است. نقطه ایزو الکتریک این نانوذره در pH برابر با ۲ می‌باشد که با توجه به اینکه محدوده pH محلول‌ها در این مقاله در بازه ۵-۶ می‌باشد، بار نانوذره در تمامی آزمایش‌ها منفی است [۲۲]. نمک مورد استفاده، نمک سدیم کلرید می‌باشد که از شرکت مرک^۱ خریداری شده و دارای درصد خلوص ۹۹٪ می‌باشد. سورفکتانت آنیونی SDS با درصد خلوص بالای ۹۹٪ نیز به صورت پودر جامد از شرکت مرک خریداری شده است. سه نوع نفت خام با API های ۲۰، ۲۸/۵ و ۴۹/۹ تهیه شده است. گاز نیتروژن استفاده شده دارای درصد خلوص ۹۹٪ می‌باشد. آب مورد استفاده در تمامی آزمایش‌ها، آب دیونیزه تهیه شده با استفاده از دستگاه دیونایزر بوده و کیفیت آب خروجی ۰/۱ μs/cm می‌باشد.

دستگاه‌های آزمایشگاهی

وسایل مورد استفاده در این مقاله عبارت‌اند از ترازوی دیجیتالی، همزن مغناطیسی-حرارتی، دستگاه آلتراسونیک، دستگاه رسانایی سنج، دستگاه آب ساز و دستگاه آزمایشگاهی بررسی استاتیک فوم که بدین منظور طراحی شده است (شکل ۱).

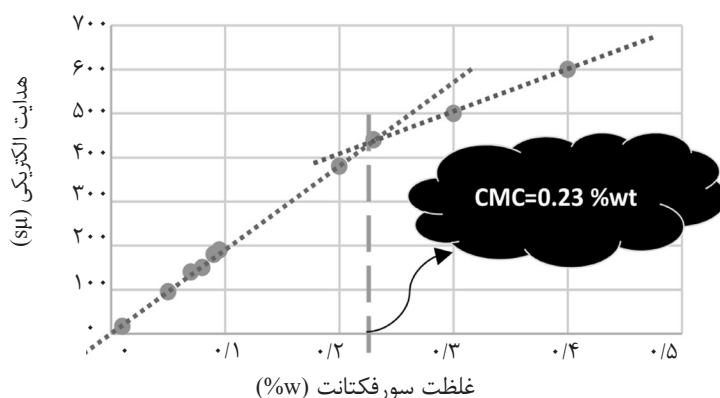
روند انجام آزمایش‌ها

نانوذره در دو سطح ۰ و ۰/۱ درصد وزنی، سورفکتانت در سه سطح ۰/۱۱۵، ۰/۲۳ و ۰/۳۴۵ درصد وزنی، نمک با غلظت ۲ درصد وزنی و سه نوع نفت خام در سه سطح ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد وزنی استفاده شد. جدول ۱ ویسکوزیته نفت‌های "الف"، "ب" و "ج" را نشان می‌دهد. طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار "دیزاین اکسپرت"^۲ و با استفاده از روش "جنرال فاکتوریال"^۳ انجام گرفت.

1. Merk
2. Design Expert
3. General Factorial



شکل ۱ شماتیکی از دستگاه اندازه‌گیری استاتیک خواص فوم.



شکل ۲ تعیین غلظت بحرانی میسل SDS با استفاده از نمودار رسانایی - غلظت سورفکتانت

مدت زمانی که طول می‌کشد تا دو سوم از ارتفاع اولیه فوم کاهش یابد. (یعنی ارتفاع فوم به حدوداً ۰/۳۳ مقدار اولیه‌اش) برسد.

برای توضیح نحوه‌ی محاسبه‌ی $t_{2/3}$ ، فوم حاصل از محلول محتوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذره، و ۰/۱۱۵ درصد وزنی SDS، ۲ درصد وزنی سدیم کلرید و ۱۵٪ وزنی نفت نوع "ج" در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۳).
تأثیر غلظت سورفکتانت بر پایداری فوم

تأثیر افزایش غلظت سورفکتانت بر پایداری فوم، در حضور و عدم حضور نفت و در محلول حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذره اندازه‌گیری شده است و برای نمونه، نمودار مربوط به غلظت ۳۵ درصد وزنی نفت "ج" نشان داده شده است.

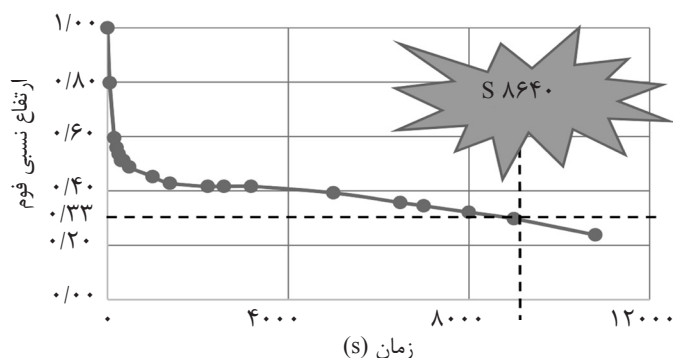
همان‌گونه که از شکل ۴ نمایان است، با افزایش غلظت سورفکتانت تا غلظت بحرانی میسل، پایداری فوم افزایش چشمگیری پیدا می‌کند. اما با افزایش بیشتر غلظت سورفکتانت به مقادیر بالای CMC، پایداری فوم افزایش چندانی پیدا نمی‌کند.

سورفکتانت تا قبل از میسلی شدن، تعداد بار سورفکتانت و در نتیجه هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد. در لحظه میسلی شدن یک شکست و تعلیق در هدایت به وجود می‌آید و پس از میسلی شدن، افزایش در هدایت به دلیل افزایش غلظت میسل می‌باشد. غلظت بحرانی میسل به دست آمده در این آزمایش برابر با ۰/۲۳ درصد وزنی می‌باشد که با مقادیر گزارش شده در منابع همخوانی خیلی خوبی دارد [۴].

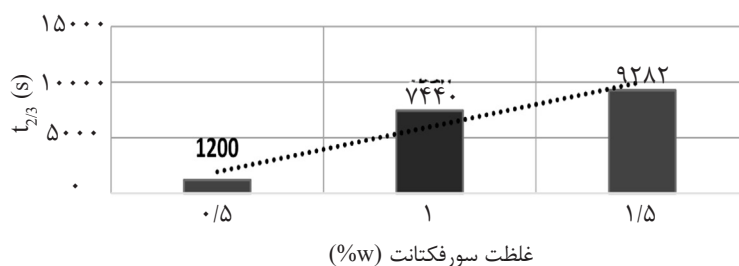
آزمایش استاتیک فوم

$t_{2/3}$ به عنوان معیار مقایسه پایداری فوم

معمولاً برای مقایسه میزان پایداری فوم از معیار "نیم‌عمر" استفاده می‌شود. یعنی مدت زمانی که طول می‌کشد تا ارتفاع فوم به نصف ارتفاع اولیه خود برسد. همان‌طور که در شکل ۳ نمایان است، پایداری فوم در نیمه دوم عمر بسیار بیشتر از نیمه اول آن است. بنابراین استفاده از معیار نیم‌عمر در این مورد کاملاً فریب‌دهنده است. بدین منظور و برای جلوگیری از خطا، معیار $t_{2/3}$ به عنوان معیاری برای بررسی پایداری فوم انتخاب می‌شود. $t_{2/3}$ یعنی



شکل ۳ تغییر ارتفاع فوم برحسب زمان برای فوم حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذره و ۰/۱۱۵ درصد وزنی سورفکتانت و ۱۵ درصد وزنی نفت.



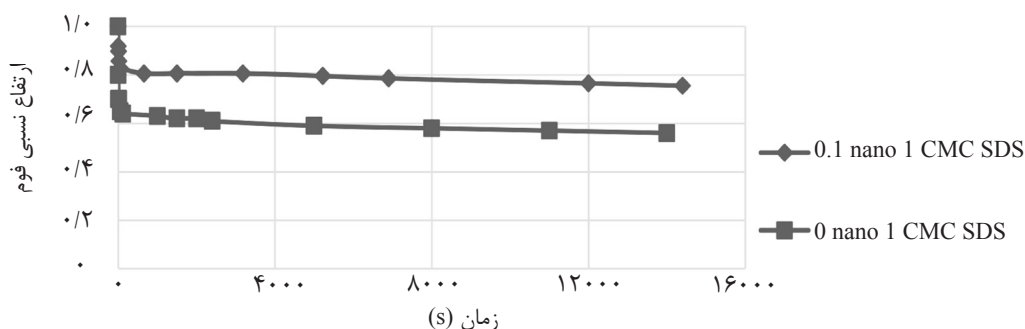
شکل ۴ نیم عمر فوم در حضور ۳۵ درصد وزنی نفت "ج" در محلول مولد فوم حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذره و غلظت‌های مختلف سورفکتانت.

این روند برای سایر نفت‌ها و سایر غلظت‌های نفت نیز مشاهده می‌شود. اما برای جلوگیری از تکرار، تنها نمودار مربوط به غلظت ۳۵ درصد وزنی نفت "ج" نمایش داده شده است.

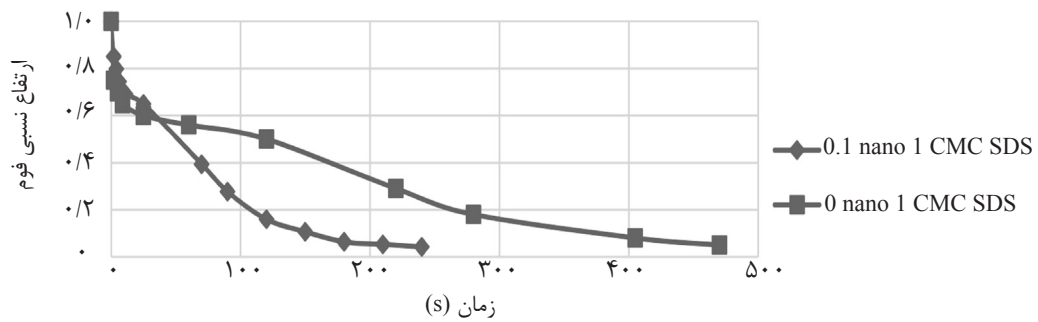
تأثیر غلظت نانوذره بر پایداری فوم

تأثیر افزایش غلظت نانوذره بر پایداری فوم، در عدم حضور نفت و حضور نفت‌های مختلف در شکل ۵ تا شکل ۸ آمده است. همان‌گونه که از نمودارهای بالا مشهود است، افزایش غلظت نانوذره به شکل قابل توجهی باعث افزایش پایداری فوم می‌شود. افزایش غلظت نانوذره باعث افزایش شرکت نانوذره‌ها در میان رویه می‌شود و مانند یک سد فیزیکی از خروج گاز جلوگیری می‌کند.

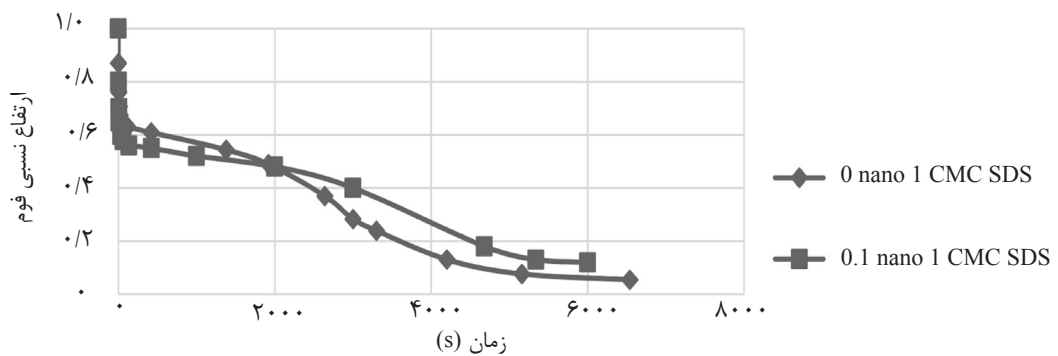
برای مثال در شکل ۴، با افزایش غلظت سورفکتانت تا غلظت بحرانی میسل، پایداری فوم حدوداً ۶ برابر شده است. اما با افزایش بیشتر غلظت سورفکتانت به مقادیر بالای CMC ۱، پایداری فوم تنها ۱/۲ (یک و دو دهم) برابر شده است. دلیل این امر را می‌توان تشکیل لایه دوگانه دانست. به این ترتیب که سورفکتانت‌ها پس از تجمع و تشکیل میسل، دوباره از سر آب‌دوست خود به یکدیگر نزدیک شده و لایه دومی را تشکیل می‌دهند و به این ترتیب سرگروه‌های آب‌گریز در محلول قرار می‌گیرند که تمایل به قرار گرفتن در سطح میان دو فاز ندارند. پس تأثیر چندانی بر پایداری فوم نخواهند داشت.



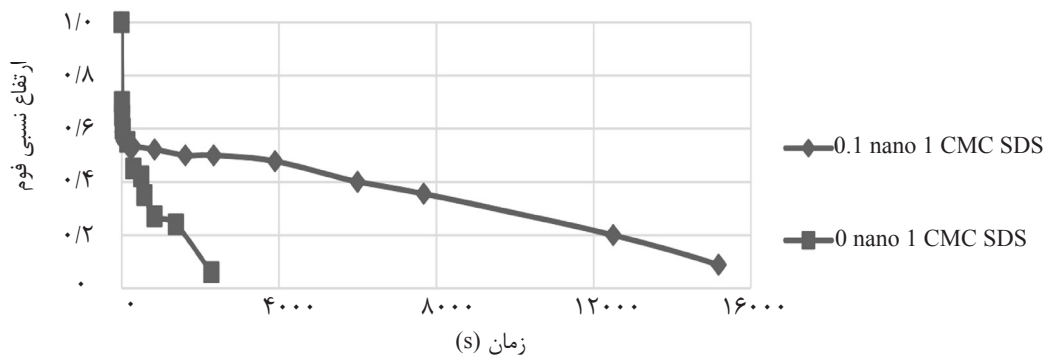
شکل ۵ تأثیر افزایش غلظت نانوذره بر پایداری فوم (عدم حضور نفت).



شکل ۶ تأثیر افزایش غلظت نانوذره بر پایداری فوم (۲۵ درصد وزنی نفت "الف").



شکل ۷ تأثیر افزایش غلظت نانوذره بر پایداری فوم (۲۵ درصد وزنی نفت "ب").



شکل ۸ تأثیر افزایش غلظت نانوذره بر پایداری فوم (۲۵ درصد وزنی نفت "ج").

درجه API برابر با ۴۹/۹ بوده و نفتی سبک به شمار می‌آید. بنابراین هنگامی که فوم تشکیل می‌شود این نفت به راحتی وارد ساختار فوم شده، درون لاملها حرکت کرده و باعث فروپاشی فیلم مایع و ناپایداری فوم می‌شود. به طوری که نانوذره فرصت پیدا نمی‌کند تا وارد میان رویه شود و مانند یک سد فیزیکی عمل کند و تنها باعث کاهش مقدار سورفکتانت‌های آزاد می‌شود. بنابراین فوم حاوی سورفکتانت تنها، عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد. اما در مورد نفت نوع "ب" این قضیه کمی

همچنین با افزایش غلظت نانوذره، نانوذره‌های موجود در فیلم مایع در یک آرایش نزدیک‌تر به هم قرار می‌گیرند و از گسیختگی لاملها در هنگام ریزش جلوگیری می‌کند. بنابراین همان‌طور که در شکل ۵ مشهود است، در عدم حضور نفت، پایداری فوم در حضور نانوذره بسیار بیشتر از پایداری فوم در غیاب نانوذره است. اما در هنگام حضور نفت قضیه کمی پیچیده می‌شود. زیرا ویسکوزیته نفت امری تعیین کننده است. شکل ۶ پایداری فوم در حضور نفت نوع "الف" را نشان می‌دهد. نفت "الف" دارای

بیشتر باشد، میزان تحرک آن نفت کمتر بوده و از این رو تمایل آن نفت برای گسترش در فیلم مایع و فروپاشی ساختار فوم کمتر می‌شود.

درباره تأثیر افزایش غلظت نفت خام بر پایداری فوم نیز می‌توان گفت که نفت به خودی خود اثری مخرب بر ساختار فوم دارد. بنابراین با افزودن نفت به فوم پایداری آن به شدت کاهش یافته و با افزایش درصد اشباع نفت این اثر مخرب بیشتر شده و پایداری فوم کاهش چشمگیری می‌یابد.

این روند برای سایر غلظت‌های سورفکتانت نیز مشاهده می‌شود. اما برای جلوگیری از تکرار، تنها نمودار مربوط به غلظت ۰/۲۳ درصد وزنی سورفکتانت نمایش داده شده است.

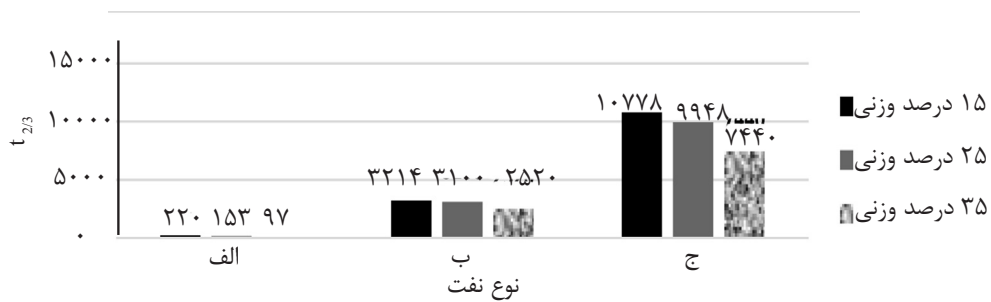
بررسی ضرایب پخش، نفوذ، پل زنی و عدد لاملا

قطرات نفت به منظور تأثیر بر پایداری فوم لازم است در ابتدا وارد فصل مشترک سیال مولد-گاز شوند. این امکان با استفاده از ضریب نفوذ قابل بررسی است. ضریب نفوذ مثبت بدین معناست که قطرات نفت وارد ساختار فوم شده است. جدول ۲ نشان می‌دهد که ورود نفت "الف" به درون ساختار فوم بسیار بیشتر از دو نفت دیگر است و نفت "ج" ورود کمتری به ساختار فوم دارد. ضریب پخش مثبت نیز نشان‌دهنده این است که نفت وارد شده به درون ساختار فوم، درون سطح میان دو سیال حرکت کرده و موجب فروپاشی آن می‌شود. بر اساس جدول ۲، ضریب پخش نفت "ج" نزدیک به صفر است و این بدین معناست که نفت "ج" تمایل کمی برای گسترش در میان فیلم مایع دارد. برعکس نفت "الف" بالاترین ضریب پخش را در میان این سه نفت به خود اختصاص داده است. با استفاده از ضرایب به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب نفوذ و ضرایب پخش به دست آمده، با نتایج مشاهده شده از عملکرد فوم در حضور این سه نوع نفت کاملاً همخوانی دارد.

متفاوت است. همان‌طور که در شکل ۷ نمایان است فوم حاصل از نفت "ب" دارای پایداری بیشتری می‌باشد و با اینکه در نیمه‌ی اولیه عمر فوم، عملکرد فومی که حاوی سورفکتانت تنها می‌باشد بهتر است، اما با گذر زمان نانوذره وارد ساختار فوم شده و با شرکت در میان رویه مانع از فروپاشی فیلم مایع می‌شود. بنابراین در نیمه دوم عمر فوم، حضور نانوذره در ساختار فوم پررنگ شده و پایداری فوم حاوی نانوذره به طرز چشمگیری افزایش یافته است. همان‌گونه که در شکل ۸ مشخص است، فوم حاصل از نفت نوع "ج" دارای پایداری بسیار بالایی می‌باشد. زیرا این نفت ویسکوز بوده و از این رو تمایل کمی به حرکت درون ساختار فوم و فروپاشی فیلم مایع خواهد داشت. به همین دلیل در حضور این نفت، فوم ساختار خود را حفظ می‌کند و این‌گونه این فرصت در اختیار نانوذره قرار می‌گیرد تا وارد ساختار فوم شود. در نتیجه پایداری فوم در حضور نانوذره به طرز چشمگیری نسبت به پایداری فوم در حضور سورفکتانت تنها افزایش می‌یابد. این روند برای سایر غلظت‌های سورفکتانت و نفت نیز مشاهده می‌شود. اما برای جلوگیری از تکرار، تنها نمودارهای مربوط به غلظت ۲۵ درصد وزنی نفت و ۰/۲۳ درصد وزنی سورفکتانت نمایش داده شده است.

تأثیر ویسکوزیته و غلظت نفت خام بر پایداری فوم

در این بخش تأثیر ویسکوزیته و غلظت نفت خام بر پایداری فوم بررسی شده است که برای نمونه نمودار مربوط به محلول مولد فوم حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذره و ۰/۲۳ درصد وزنی سورفکتانت نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۹ مشهود است، پایداری فوم در حضور نفت نوع "ج" بالاتر از پایداری فوم در حضور نفت "الف" و "ب" بوده و پایداری فوم در حضور نفت نوع "ب" نیز بیشتر از پایداری فوم در حضور نفت نوع "الف" می‌باشد. دلیل این امر تفاوت در ویسکوزیته این سه نوع نفت می‌باشد. به‌طور کلی نفت دارای اثری مخرب بر ساختار فوم می‌باشد. اما هرچه ویسکوزیته نفتی



شکل ۹ پایداری فوم در غلظت‌های مختلف نفت الف، ب و ج در محلول مولد فوم حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوذره و ۰/۲۳ درصد وزنی سورفکتانت.

جدول ۲ ضرایب پخش، نفوذ، پل زنی و عدد لاملا در حالت تعادل برای فوم حاوی ۰/۱ درصد وزنی نانوسیلیکا و ۰/۲۳ درصد وزنی سورفکتانت SDS و نفت خام.

نفت خام	ضریب نفوذ (mN/m)	ضریب پخش (mN/m)	عدد لاملا	ضریب پل زنی (mN/m) ²
الف	۱۴/۰۷	۶/۸۷	۱/۳۵	۵۸۴/۴۸
ب	۴/۵۷	۲/۶۹	۵/۱۸	-۱۲۸/۷۸
ج	۲/۹۵	۰/۲۴	۳/۵۹	۱۰۲/۹۹

اما عدد لاملا و ضریب پل زنی، توصیف مناسبی از عملکرد فوم را ارائه نمی‌دهند. پس در میان نظریه‌های تجربی بیان شده برای توضیح پایداری فوم در حضور نفت، نظریه ضریب نفوذ و ضریب پخش از اعتبار بیشتری برخوردار است.

نتیجه گیری

طبق نتایج معلوم شد که حضور نانوسیلیکا تأثیر چندانی بر افزایش فوم‌زایی ندارد اما پایداری فوم را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد. این افزایش پایداری فوم در حضور نفت‌های "الف"، "ب" و "ج" به ترتیب برابر با ۰/۷، ۱/۱ و ۱۳ برابر بوده و در غیاب نفت، ۴ برابر بوده است. این بدین معنی است که فوم ایجادشده به‌وسیله ترکیب نانوذره و سورفکتانت، نسبت به فوم ایجادشده به‌وسیله سورفکتانت تنها، پایداری بسیار بالایی دارد. همچنین مشخص شد که حضور نفت اثری مخرب داشته و فوم زایی و پایداری فوم را به‌شدت کاهش می‌دهد. اما در میان نفت‌های مختلف، هرچه ویسکوزیته نفتی بیشتر باشد، فوم حاصل از آن پایدارتر خواهد بود.

(نفت "ج"). با بررسی غلظت‌های مختلف نفت نیز معلوم شد که برای تمام نفت‌ها با ویسکوزیته‌های مختلف، با افزایش غلظت نفت، فوم زایی و پایداری فوم کاهش می‌یابد. محاسبه ضرایب نفوذ و پخش، عدد لاملا و ضریب پل زنی نیز نشان داد که ضریب نفوذ و ضریب پخش، نتایج مشاهده شده از عملکرد فوم در حضور نفت را کاملاً توجیه می‌کنند. اما عدد لاملا و ضریب پل زنی، توصیف مناسبی از عملکرد فوم ارائه نمی‌دهند. در آخر این نکته حائز اهمیت است که روند به‌دست آمده در رابطه با اثر مثبت افزایش ویسکوزیته نفت بر عملکرد فوم در رابطه با این سه نوع نفت خام صادق است. زیرا این نفت‌ها فاقد آسفالتین هستند و بنابراین ترکیبات پیچیده‌ای در آن‌ها وجود ندارد. اما به‌طور کلی، نفت‌های خام به دلیل وجود آسفالتین با ترکیبات پیچیده، دارای عملکردی بسیار پیچیده‌ای هستند و در مجاورت فوم، رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. بنابراین علاوه بر ویسکوزیته عوامل دیگری نیز دخیل هستند که نیاز به بررسی‌های بیشتری دارند.

$\sigma_{o/g}$: کشش سطحی فصل مشترک نفت و گاز mN/m
 $\sigma_{w/g}$: کشش سطحی فصل مشترک آب و گاز mN/m
 $\sigma_{w/o}$: کشش سطحی فصل مشترک آب و نفت mN/m
 ρ_1 : دانسیته گاز Kg/m³
 ρ_2 : دانسیته مایع Kg/m³
 η : ویسکوزیته مایع Kg/m.s

علائم و نشانه‌ها

B : ضریب پل زنی (mN/m)²
 E : ضریب ورود mN/m
 g : شتاب گرانش m/s²
 L : عدد لاملا D.L.
 K : ضریب پخش mN/m
 u : سرعت فروپاشی فوم m/s

مراجع

- [1]. Koval E., "A method for predicting the performance of unstable miscible displacement in heterogeneous media", Society of Petroleum Engineers Journal., Vol. 3, pp. 145-154, 1963.
- [2]. Patzek T. W., "Field applications of steam foam for mobility improvement and profile control", SPE Reservoir Engineering., Vol. 11, pp. 79-86, 1996.
- [3]. Bikerman J., "Foams", New York: Springer-Verlag., Vol. 10, pp. 65-97, 2013.
- [4]. Lindman B. and Wennerström H., "Micelles", Springer., Vol. 87, pp. 1-83, 1980.
- [5]. Grigg R. B. and Mikhailin A. A., "Effects of flow conditions and surfactant availability on adsorption", International Symposium on Oilfield Chemistry., Society of Petroleum Engineers., 2007.
- [6]. Binks B. P. and Horozov T. S., "Aqueous foams stabilized solely by silica nanoparticles", Angewandte Chemie., Vol. 117, pp. 3788-3791, 2005.
- [7]. Ma H., Luo M. and Dai L. L., "Influences of surfactant and nanoparticle assembly on effective interfacial tensions", Physical Chemistry Chemical Physics., Vol. 10, pp. 2207-2213, 2008.
- [8]. Speight J. G., "The chemistry and technology of petroleum", Springer., Vol. 66, pp. 298-300, 1999.
- [9]. Schramm L. L., "Foam sensitivity to crude oil in porous media", ACS Advances in Chemistry Series., Vol. 242, pp. 165-197, 1994.
- [10]. Aarra M., Ormehaug P. and Skauge A., "Foams for GOR control-improved stability by polymer additives", 9th European Symposium on Improved Oil Recovery., EAGE, 1997.
- [11]. Mannhardt K. and Svorstøl I., "Effect of oil saturation on foam propagation in Snorre reservoir core", Journal of Petroleum Science and Engineering., Vol. 23, pp. 189-200, 1999.
- [12]. Mannhardt K., Novosad J. J. and Schramm L. L., "Comparative evaluation of foam stability to oil", SPE Reservoir Evaluation & Engineering., Vol. 3, pp. 23-34, 2000.
- [13]. Schramm L. L. and Novosad J. J., "Micro-visualization of foam interactions with a crude oil", Colloids and Surfaces., Vol. 46, pp. 21-43, 1990.
- [14]. Garrett P. R., "Preliminary considerations concerning the stability of a liquid heterogeneity in a plane-parallel liquid film", Journal of Colloid and Interface Science., Vol. 76, pp. 587-590, 1980.
- [15]. Exerowa D., Kruglyakov P. and Möbius R., "Foam and foam films", Elsevier., Vol. 5, pp. 1-47, 1997.

- [16]. Denkov N. D., "Mechanisms of foam destruction by oil-based antifoams", *Langmuir.*, Vol. 20, pp. 9463-9505, 2004.
- [17]. Lobo L. and Wasan D., "Mechanisms of aqueous foam stability in the presence of emulsified non-aqueous-phase liquids: structure and stability of the pseudoemulsion film", *Langmuir.*, Vol. 9, pp. 1668-1677, 1993.
- [18]. Farzaneh S. A. and Sohrabi M., "Experimental investigation of CO₂-foam stability improvement by alkaline in the presence of crude oil", *Chemical Engineering Research and Design.*, Vol. 94, pp. 375-389, 2015.
- [19]. Vikingstad A. K., Skauge A., Høiland H. and Aarra M., "Foam-oil interactions analyzed by static foam tests", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.*, Vol. 260, pp. 189-198, 2005.
- [20]. Kitchener J. A., "Foams and free liquid films", *Recent Progress in Surface Science.*, Vol. 1, pp. 51-93, 1964.
- [21]. Nishioka G. and Ross S., "A new method and apparatus for measuring foam stability", *Journal of Colloid and Interface Science.*, Vol. 81, pp. 1-7, 1981.
- [22]. Cui Z. G., Yang L. L., Cui Y. Z. and Binks B. P., "Effects of surfactant structure on the phase inversion of emulsions stabilized by mixtures of silica nanoparticles and cationic surfactant", *Langmuir.*, Vol. 26, pp. 4717-4724, 2009.