

# بررسی اثر جریان مارانگونی و چینش مولکولی در پایداری فوم ایجاد شده توسط نانوذرات - مطالعه آزمایشگاهی

فاطمه رئیسی<sup>۱</sup>، مریم خسروی<sup>۲\*</sup>، بهزاد رستمی<sup>۱</sup>، حمید وطن پرست<sup>۲</sup> و علیرضا فتح‌اللهی<sup>۱</sup>

۱- انستیتو مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- پژوهشکده مهندسی نفت، پردیس توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱

## چکیده

استفاده از نانو ذرات به‌همراه سورفکتانت برای تولید و پایدار کردن فوم می‌تواند باعث رفع محدودیت‌های استفاده از سورفکتانت شود و پایداری فوم را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. هدف اصلی مطالعه حاضر بررسی و پیدا کردن نحوه چینش نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت در سطح تماس و تأثیر جریان مارانگونی در پایداری فوم در حضور نانوذرات است. در این مطالعه، آزمایشات برای دو سیستم فوم مختلف: (۱) نانوذرات آنیونی-سورفکتانت کاتیونی (CTAB) و (۲) نانوذرات آنیونی-سورفکتانت آنیونی (SDS) انجام شدند. برای تعیین چینش مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات در سطح تماس و فیلم مایع و تعیین اثر مارانگونی نتایج این آزمایش‌ها با آزمایش‌های پایه متناظر در غیاب نانوذرات مقایسه شدند. مشاهدات نشان می‌دهند اگرچه حضور نانوذرات باعث افزایش پایداری فوم در هر دو سیستم می‌شود، اما مکانیسم‌های موثر در پایداری سیستم‌ها متفاوت هستند. براساس مشاهدات، حضور نانوذرات در سیستم فوم SDS (همبار) باعث افزایش فوم‌زایی و پایداری فوم می‌شود، اما در سیستم فوم CTAB (ناهمبار) علی‌رغم کاهش فوم‌زایی، پایداری فوم افزایش می‌یابد. بنابر مشاهدات ذکر شده در سیستم همبار مؤثرترین عامل در پایداری فوم، نیروهای دافعه هستند که مولکول‌های سورفکتانت بیشتری را به سطح تماس ارسال می‌کنند. تحلیل نتایج کشش سطحی نشان داد در این سیستم جریان مارانگونی با اثر منفی تخلیه مایع در اثر گرانش مقابله می‌کند و باعث پایداری فوم می‌شود. از سوی دیگر در سیستم ناهمبار حضور نانوذرات در سطح تماس با کاهش نفوذمولکولی و افزایش انرژی جدا کردن ذرات باعث افزایش پایداری فوم می‌شود. حضور نانوذرات در سطح تماس آن را به یک سطح جامد مانند تبدیل می‌کند و به‌علت الاستیسته بالای سطح جریان مارانگونی اتفاق نمی‌افتد.

**کلمات کلیدی:** نانوذرات، پایداری فوم، فوم‌زایی، اثر مارانگونی، چینش مولکولی

## مقدمه

تأثیر دیگر مارانگونی هنگامی است که حباب به دلایل مختلف کشیده می‌شود و یک افزایش سطح اتفاق می‌افتد. بنابراین، غلظت سورفکتانت در برخی قسمت‌های حباب کم می‌شود، پس مارانگونی باعث حرکت سورفکتانت روی سطح حباب و برگرداندن حباب به شکل اولیه‌اش و در نتیجه پایداری فوم می‌شود. مطالعات بررسی اثر مارانگونی در فوم نشان داده است اگرچه جریان مارانگونی باعث کاهش تخلیه فیلم مایع می‌شود اما میزان تأثیر آن وابسته به گرادیان کشش سطحی و ویسکوزیته سطحی حباب متفاوت است و در گرادیان کشش سطحی بالاتر و ویسکوزیته سطحی کمتر جریان مارانگونی تأثیر به سزاتری در پایداری فوم ایفا می‌کند [۱۱ و ۱۰]. تحقیقات نشان داده است که یکی از مؤثرترین راه‌ها برای تثبیت کف استفاده از نانوذرات است. موهانتی یک مطالعه تجربی جهت بررسی فوم پایدار شده توسط سورفکتانت-نانوذرات انجام داد. نتایج آزمایشات نشان داد که در حضور نانوذرات، نیمه عمر فوم و ضریب بازیافت نفت به طرز چشم‌گیری افزایش می‌یابد و همچنین در سیستم‌هایی که نانوذرات به سطح تماس گاز و مایع جذب می‌شوند، مقدار قابل توجهی انرژی برای حذف ذرات از سطح مورد نیاز است و این انرژی، انرژی جداسازی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. همچنین مطالعات نشان داده است در برخی سیستم‌های فوم حضور نانوذرات در سطح تماس به علت تغییر خواص سطحی باعث افزایش چشم‌گیر پایداری فوم می‌شود و در برخی از سیستم‌ها برخلاف عدم حضور نانوذرات در سطح تماس، پایداری فوم افزایش می‌یابد [۱۷-۱۲]. همان‌طور که گفته شد، مطالعات متعددی برای تعیین تأثیر نانوذرات بر پایداری فوم انجام شده است. با این حال، مطالعات کمی رفتار فوم را در سیستم‌های همبار و ناهمبار به‌طور هم‌زمان بررسی کرده‌اند.

تزیق گاز یکی از رایج‌ترین و مرسوم‌ترین تکنیک‌های ازدیادبرداشت نفت است، اما به دلیل تحرک بالای فاز گاز (و در نتیجه، پدیده‌ی انگشتی شدن، کانال‌زنی و بالاروی ثقلی<sup>۱</sup>) بازده نسبتاً پایینی دارد. تزیق فوم راه حل پیشنهادی برای بهبود تحرک‌پذیری گاز است. فوم از طریق کاهش تراوایی نسبی گاز به وسیله به دام انداختن گاز و نیز افزایش گرانیوی مؤثر گاز، سبب کاهش تحرک‌پذیری گاز و کاهش جدایش ثقلی می‌شود اما، این روش با چالش پایداری مواجه است. به همین منظور، مطالعات گسترده‌ای برای افزایش پایداری فوم و عوامل مؤثر بر آن شامل اثر گرانش، اثر مارانگونی، نفوذ مولکولی، فشار جدایش، فشار موینگی و اثر نفت انجام شده است. در چند دهه اخیر یکی از راه‌های پیشنهادی برای افزایش پایداری فوم استفاده از نانوذرات برای افزایش پایداری تمرکز اصلی این مطالعه بررسی اثر مارانگونی در حضور نانوذرات، و قرارگیری مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات در سطح تماس، در پایداری فوم است [۸-۱]. اثر مارانگونی برای اولین بار توسط وبر برای پدیده اشک شراب مورد بررسی قرار گرفت. او ادعا کرد این پدیده به علت گرادیان تنش میان رویه اتفاق می‌افتد. در اصل، جریان همرفتی سیالات از نقطه‌ای با کشش سطحی کم تا نقطه‌ای با کشش سطحی بالا را جریان مارانگونی می‌نامند. مطالعات نشان داده‌اند در سیستم فوم، هنگام تخلیه مایع از یک فیلم به علت حرکت فیلم مایع به سمت مرز مسطح و اختلاف فشار موینگی، فیلم در یک منطقه نازک می‌شود و باعث افزایش سطح حباب می‌شود. بنابراین در قسمت وسط فیلم نسبت به مرز مسطح غلظت سورفکتانت کمتر است، در نتیجه یک جریان از مرز مسطح به سمت وسط فیلم (عکس جریان در تخلیه فیلم مایع) در سطح مایع اتفاق می‌افتد که سرعت تخلیه را پایین می‌آورد [۹ و ۱۰].

1. Gravity Override

2. Detachment Energy

برمید (CTAB) با درجه خلوص بیش از ۹۷/۷٪ و سدیم دودسیل سولفات (SDS خلوص < ۹۹/۶۹۶) به ترتیب به عنوان سورفکتانت کاتیونی و آنیونی استفاده شدند. نانوذرات آب دوست سیلیکا ( $\text{SiO}_2$ ) به قطر میانگین ۱۲ تا ۱۴ nm که از شرکت نانو صدرا تهیه شدند به عنوان پایدارکننده فوم به کار رفتند. از آب مقطر جهت پراکنده ساختن سورفکتانت و نانوذرات استفاده شد.

#### آماده سازی محلول

به منظور به حداقل رساندن خطا، ۱۰۰ g محلول حاوی ۵ CMC سورفکتانت تهیه شده، سپس به غلظت‌های مورد نظر رقیق شد و همچنین به منظور جلوگیری از تشکیل ترکیب جدید به علت در معرض رطوبت قرار گرفتن سورفکتانت، روزانه قبل از انجام آزمایشات محلول جدیدی ساخته می‌شد. در ابتدا، سورفکتانت با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت ۵ رقم اعشار وزن شد. پس از آن، آب مقطر به آرامی و با استفاده از یک پیپت کالیبره اضافه شد. در مرحله بعدی برای پراکنده شدن سورفکتانت در فاز آبی، محلول در حمام اولتراسونیک به مدت ۱ h ۲-۳ قرار داده شد. طبق محاسبات، به منظور تهیه غلظت مد نظر به چند گرم از محلول ۵ CMC، آب مقطر اضافه می‌شد و سپس محلول آماده شده مجدداً به مدت ۴۵ min در حمام اولتراسونیک قرار داده شد. به منظور تهیه محلول حاوی نانوذرات روش مشابهی اعمال شد و تنها به جای حمام اولتراسونیک از اولتراسونیک پروب دار (UHP-۴۰۰- شرکت پژوهش‌گران نانو فن‌آوری) به مدت ۱ h استفاده شد.

بنابراین، این مطالعه با دیدگاهی جدید طراحی شده است تا با بررسی فوم‌زایی، پایداری فوم و کشش سطحی در حضور و عدم حضور نانوذرات بینشی از آرایش نانوذرات در لاملا ارائه دهد. لازم به ذکر است به علت جای خالی بررسی اثر مارانگونی بر پایداری فوم حاوی نانوذرات در مطالعات انجام شده، در این مقاله با مشاهده تغییر کشش سطحی با غلظت نانوذرات تأثیر جریان مارانگونی بر پایداری فوم در حضور نانوذرات مشخص می‌گردد.

#### طراحی آزمایشات

به منظور بررسی چینش نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت در فیلم مایع و سطح تماس، آزمایشات استاتیک (به منظور اندازه‌گیری فوم‌زایی و پایداری فوم) و کشش سطحی در حضور و عدم حضور نانوذرات انجام شدند و به منظور بررسی اثر مارانگونی گرادیان آزمایش‌های کشش سطحی در حضور نانوذرات مورد بررسی قرار گرفتند. آزمایشات راس میلز (آزمایش استاتیک) و اندازه‌گیری کشش سطحی برای چهار سری ذکر شده در **جدول ۱** انجام شد. در این جدول حضور دو نوع سورفکتانت آنیونی و کاتیونی مورد استفاده و نانوذرات در هر سری آزمایش مشخص می‌شود. علامت تیک به منزله حضور ماده مورد نظر در آن سری از آزمایشات است.

#### مواد استفاده شده

از دو نوع سورفکتانت به عنوان عامل ایجادکننده فوم استفاده شده است. هگزا دسیل تری متیل آمونیم

جدول ۱ جدول سری‌های آزمایشات

شماره سری	سورفکتانت سدیم دودسیل سولفات	سورفکتانت هگزا دسیل تری متیل آمونیم برمید	نانوذرات
۱	☑	-	-
۲	-	☑	-
۳	☑	-	☑
۴	-	☑	☑

به اهداف مورد نظر انجام شد. مقدار cc ۵۰ از محلول‌ها در بشر ریخته شده و پس از ۲۰ min در دستگاه سیگما قرار داده شدند و در نهایت، عددی که دستگاه به آن همگرا شد به‌عنوان عدد کشش سطحی ثبت شد.

### ارائه و تحلیل نتایج

همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد، دو دسته آزمایش صورت گرفت: (۱) آزمایشات استاتیک که از طریق این آزمایش‌ها، ارتفاع (قابلیت فوم‌زایی) و نیمه عمر فوم (پایداری) اندازه‌گیری شد. (۲) براساس نتایج آزمایشات استاتیک، آزمایش‌های کشش سطحی در چندین غلظت انتخابی انجام شدند. در ادامه به بررسی و تحلیل نتایج می‌پردازیم. در ابتدا، آزمایشات استاتیک برای هر دو سورفکتانت، در غیاب نانوذرات انجام شد. در غلظت‌های مختلف سورفکتانت از CMC ۵/۰ تا CMC ۲، ارتفاع فوم و نیمه‌عمر ثبت شدند. براساس شکل ۱ نمودار نیمه‌عمر فوم براساس ارتفاع فوم در غلظت‌های مختلف سورفکتانت برای هر دو مورد صعودی و کاملاً خطی است ( $R^2 \sim 1$ ) که این نتایج با مطالعات صورت‌گرفته مطابقت دارد و صحت آزمایش‌ها را تأیید می‌کند [۲۰]. همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، هنگامی که غلظت سورفکتانت افزایش می‌یابد و به‌علت حضور مولکول‌های سورفکتانت بیشتر در سطح تماس، کشش سطحی کاهش یافته و پایداری فوم افزایش می‌یابد که به‌طور کامل با نتایج آزمایشات استاتیک مطابقت دارد. در مرحله بعد به‌منظور بررسی اثر نانوذرات و تعیین آرایش ذرات در سطح تماس، دو یا سه غلظت از هر سورفکتانت انتخاب شد. برای هر دو سورفکتانت، یکی از غلظت‌های انتخابی بیشتر از CMC ۱ بود. در هر غلظت سورفکتانت، غلظت‌های مختلفی از نانوذرات اضافه شد. در شکل ۳ نیمه‌عمر فوم براساس ارتفاع فوم برای سری‌های یک و سه رسم شده است

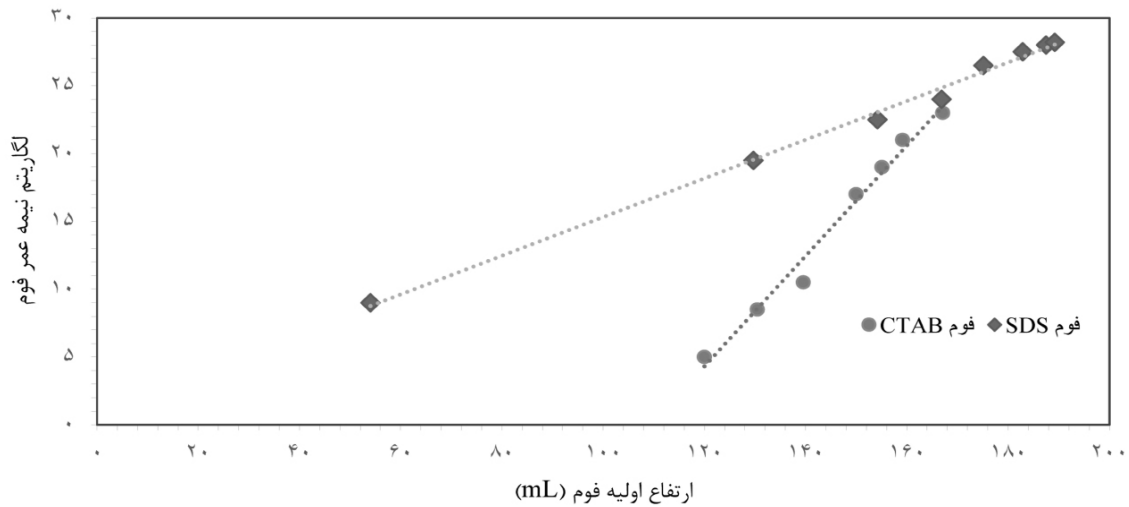
به‌منظور ترکیب کردن محلول‌های حاوی نانوذرات و سورفکتانت، محلول حاوی سورفکتانت روی استیرر مغناطیسی قرار داده شده و سپس محلول حاوی نانوذرات با استفاده از سرنگ و به‌صورت قطره‌ای اضافه شد و در نهایت پس از آماده شدن، محلول مجدداً به مدت ۴۵ min در حمام اولتراسونیک قرار داده شد.

### اندازه‌گیری پایداری و ارتفاع فوم با استفاده از آزمایش‌های استاتیک

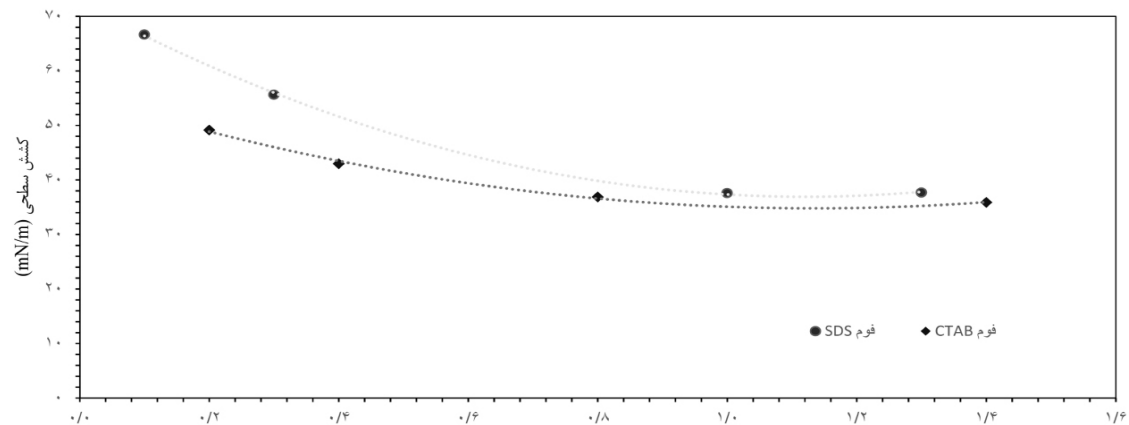
به‌منظور اندازه‌گیری قابلیت فوم‌زایی و پایداری فوم، آزمایش‌های استاتیک مطابق با استاندارد راس-میلز انجام شد [۱۹ و ۱۸]. مقدار cc ۲۰۰ از محلول آماده شده در بورت و cc ۵۰ در استوانه مدرج به آرامی ریخته شد. پس از ۲۰ min (جهت پایدار شدن محلول) شیر بورت باز شده و بلافاصله پس از ریختن آخرین قطره محلول، ارتفاع فوم توسط کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد. در نهایت، مدت زمانی که طول کشید ارتفاع فوم به نصف ارتفاع اولیه برسد، به‌عنوان نیمه عمر فوم ثبت شد. تمامی آزمایشات استاتیک سه مرتبه با دقت بالا تکرار شد، با این حال که خطای آزمایشات کمتر از ۵/۰٪ بود مقادیر متوسط گزارش شده‌اند. به‌منظور کاهش خطای آزمایش تمام آزمایش‌های مربوط به هر سورفکتانت و حتی در شرایطی که نانو ذرات اضافه می‌شدند، در یک روز انجام شدند. با این روش، میزان خطا به‌علت تغییر دما، شرایط آزمایشگاه و حتی تحت تأثیر قرار گرفتن نتایج به‌علت بوی مواد شیمیایی مورد استفاده در آزمایشات دیگر به حداقل رسید.

### اندازه‌گیری کشش سطحی

کشش سطحی محلول‌ها با استفاده از دستگاه ۷۰۰ Sigma (Biolin scientific, Sweden) اندازه‌گیری شد. تمام محلول‌ها ۴ h قبل از انجام آزمایش‌ها آماده و همه اندازه‌گیری‌ها در دما و فشار محیط انجام شده‌است. لازم به ذکر است که اندازه‌گیری کشش سطحی برای برخی از غلظت‌های انتخاب شده براساس نتایج آزمایشات استاتیک برای دست‌یابی

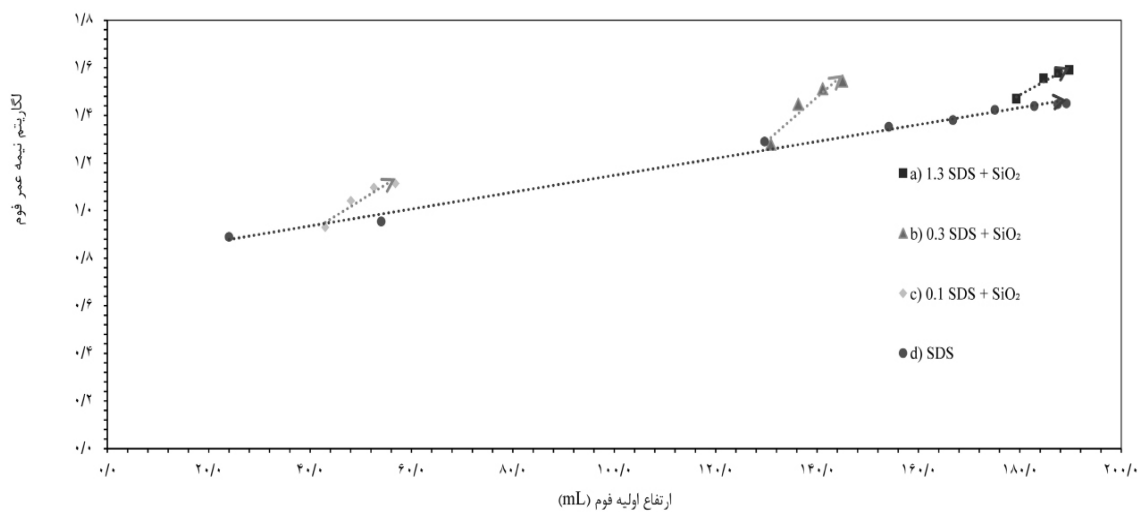


شکل ۱ مقایسه تغییرات نیمه عمر فوم براساس ارتفاع اولیه فوم در دو سورفکتانت SDS و CTAB



غلظت سورفکتانت (CMC)

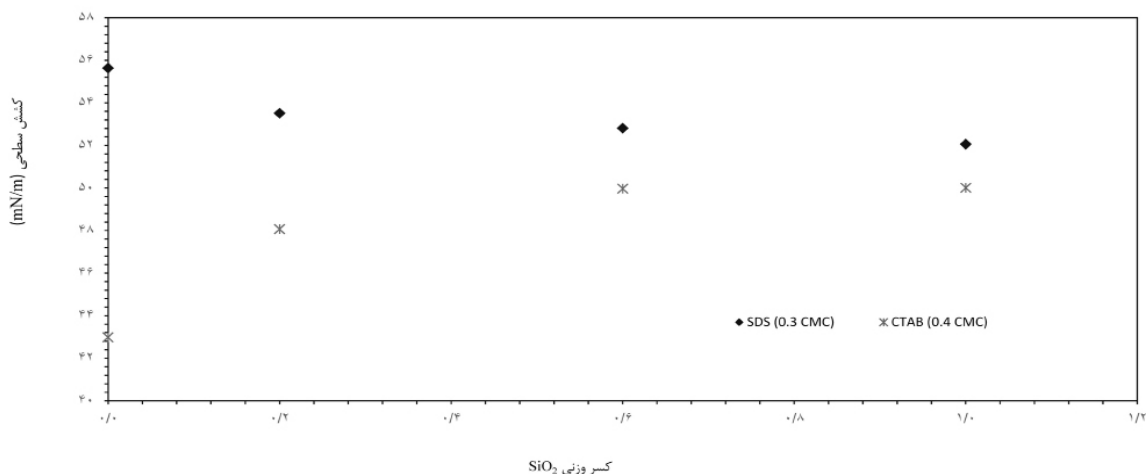
شکل ۲ تغییرات کشش سطحی براساس غلظت سورفکتانت برای فوم تشکیل شده از سورفکتانت های SDS و CTAB



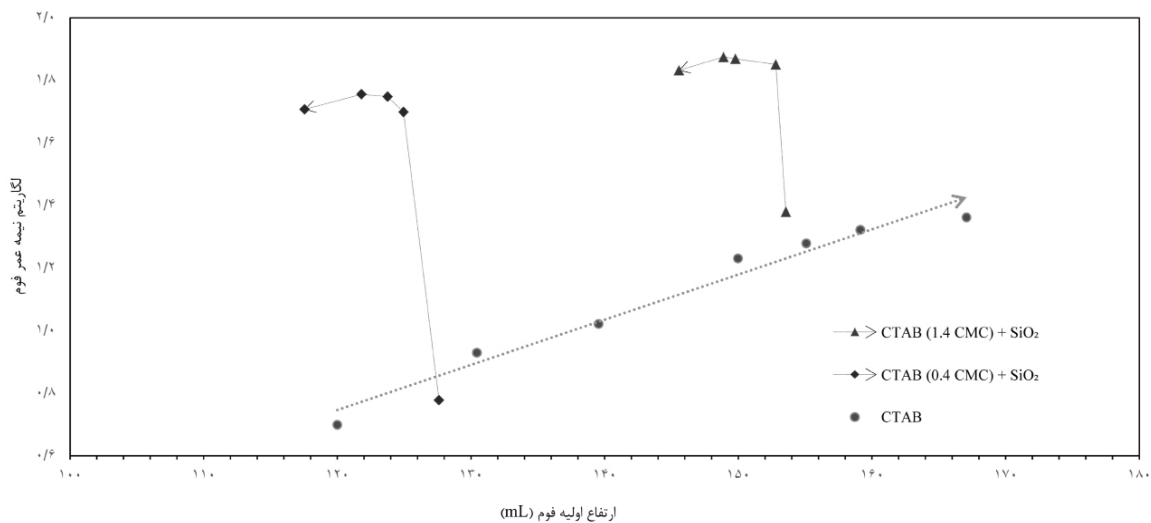
شکل ۳ مقایسه نیمه عمر فوم (پایداری) برحسب ارتفاع اولیه فوم (فوم زایی) برای سورفکتانت SDS بدون حضور نانوذرات و در حضور نانوذرات

نیمه عمر فوم براساس ارتفاع فوم برای سری های دو و چهار رسم شده است و در این شکل هر نقطه بیانگر یک غلظت است و افزایش غلظت در جهت فلش است. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش غلظت  $\text{SiO}_2$  در یک غلظت ثابت CTAB، ارتفاع فوم کاهش می یابد اما پایداری فوم بیشتر می شود. تشکیل فوم کمتر به این معنی است که سورفکتانت کمتری به سطح تماس رسیده است که نتایج کشش سطحی طبق شکل ۴ نیز این فرض را تأیید می کند. همان طور که در این شکل قابل مشاهده است، در غلظت های بالاتر نانوذرات، کشش سطحی بیشتر است و بیانگر این امر است که مولکول های سورفکتانت کمتری در سطح تماس وجود دارند. علی رغم کاهش قابلیت فومزایی و افزایش کشش سطحی، که به صورت طبیعی به علت کاهش حضور مولکول های سورفکتانت در سطح تماس باید پایداری فوم را کاهش دهد، پایداری افزایش می یابد. براساس این مشاهدات، می توان استنباط کرد که دلیل حضور کمتر مولکول های سورفکتانت در سطح تماس درگیر شدن با نانوذرات است و طبق مشاهدات این مطالعه و همچنین نتایج مطالعات پیشین می توان نتیجه گرفت افزایش پایداری به علت حضور نانوذرات در سطح تماس است [۱۲ و ۲۱، ۲۲].

و در این شکل هر نقطه بیانگر یک غلظت است و افزایش غلظت در جهت فلش است. همان طور که شکل ۴ نشان می دهد، در حضور SDS با افزایش کسر وزنی  $\text{SiO}_2$  قابلیت فومزایی و پایداری فوم به صورت خطی افزایش می یابد و این روند را می توان در سه غلظت انتخابی مشاهده کرد. براساس شکل ۳ زمانی که نانوذرات بیشتری به محلول اضافه می شود، ارتفاع فوم افزایش می یابد. بنابراین، می توان فرض کرد که مولکول های سورفکتانت بیشتری در حضور نانوذرات به سطح تماس می رسند. برای صحت سنجی این فرض، آزمایش های کشش سطحی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۴ نشان می دهد که افزایش غلظت نانوذرات در یک غلظت ثابت سورفکتانت، کشش سطحی را کاهش می دهد، لازم به ذکر است در این شکل غلظت در جهت فلش ها افزایش می یابد. کاهش کشش سطحی نشان دهنده وجود سورفکتانت بیشتری در سطح تماس است. در نتیجه می توان گفت که نیروهای دافعه بین مولکول های سورفکتانت و نانوذرات و همچنین اندازه بسیار کوچک تر مولکول های سورفکتانت در مقایسه با نانوذرات، باعث می شود مولکول های سورفکتانت بیشتری به سطح تماس برسند [۲۰]. هنگامی که از سورفکتانت CTAB استفاده شد، روند متفاوتی مشاهده شد. در شکل ۵



شکل ۴ تغییرات کشش سطحی براساس غلظت  $\text{SiO}_2$  برای فوم تشکیل شده از ۰/۳ CMC SDS و ۰/۴ CMC سورفکتانت CTAB

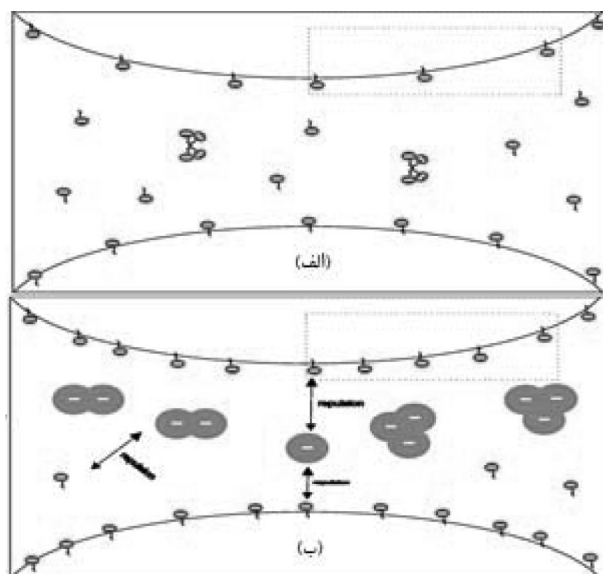


شکل ۵ مقایسه نیمه عمر فوم (پایداری) بر حسب ارتفاع اولیه فوم (فومزایی) برای سورفکتانت CTAB بدون حضور و در حضور نانوذرات

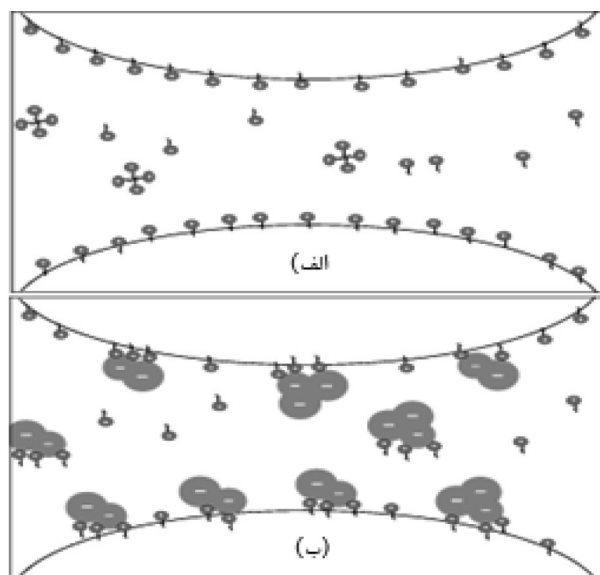
فومزایی کاهش می‌یابد. در این حالت، نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت به دلیل بارهای متفاوت یکدیگر را جذب می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، این جاذبه ترکیب جدیدی از نانوذرات و مولکول‌های CTAB را ایجاد می‌کند. در واقع سر مولکول‌های سورفکتانت به نانوذرات متصل شده و ترکیبی ایجاد می‌کند که دارای یک سر آب دوست و یک سر آب‌گریز است، بنابراین می‌تواند به‌عنوان یک مولکول سورفکتانت عمل کند. همانند مولکول‌های سورفکتانت، ترکیب تشکیل شده نیز تمایل دارد به سطح تماس برسد. افزایش انرژی جداسازی ذرات و کاهش نفوذ مولکولی به دلیل وجود نانوذرات در سطح تماس، پایداری را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. بدیهی است که به دلیل درگیر شدن مولکول‌های سورفکتانت با نانوذرات و تشکیل ترکیبات ذکر شده مولکول‌های سورفکتانت کمتری به سطح تماس می‌رسند، پس فومزایی کاهش و کشش سطحی افزایش می‌یابد. پس از بررسی آرایش ذرات می‌توان به بررسی اثر مارانگونی بر پایداری فوم در حضور نانوذرات پرداخت. جهت بررسی و مقایسه اثر مارانگونی از عدد مارانگونی که در رابطه ۱ تعریف شده است استفاده می‌شود.

اگرچه آرایش مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات به‌طور مختصر در پاراگراف‌های قبلی توضیح داده شد، این پاراگراف آن را با جزئیات بیشتری موشکافی می‌کند. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، در حالتی که هم بار سورفکتانت و هم بار نانوذرات منفی هستند (سیستم فوم هم‌بار)، دافعه الکترواستاتیک از نزدیک شدن مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات جلوگیری می‌کند. بدیهی است که مولکول‌های سورفکتانت بسیار سبک‌تر از نانوذرات هستند. مولکول‌های سورفکتانت به دلیل وزن کمتر، یک سر آب دوست و یک سر آب‌گریز، تمایل بیشتری برای رفتن به سطح تماس دارند. در نتیجه، وجود نانوذرات در فیلم مایع به‌عنوان یک محرک برای مولکول‌های سورفکتانت عمل می‌کند و نیروی دافعه باعث می‌شود مولکول‌های سورفکتانت موجود در فیلم مایع به سطح تماس برسند. با توجه به دلایل ذکر شده، استفاده از نانوذرات به‌همراه سورفکتانت معادل است با استفاده از غلظت‌های بیشتر سورفکتانت و در نتیجه قابلیت فومزایی را افزایش می‌دهد. همان‌طور که در پاراگراف‌های بالا اشاره شد، در حالت دوم (سورفکتانت کاتیونی و نانوذرات آنیونی)، با افزایش غلظت  $\text{SiO}_2$ ، برخلاف پایداری فوم و کشش سطحی،





شکل ۶ الف) چیدمان مولکول‌های SDS در لاملا و سطح تماس در غیاب نانوذرات و ب) آرایش مولکول‌های SDS و نانوذرات در لاملا و سطح تماس



شکل ۷ الف) چیدمان مولکول‌های CTAB در لاملا و سطح تماس در غیاب نانوذرات و ب) آرایش مولکول‌های CTAB و نانوذرات در لاملا و سطح تماس.

کشش سطحی با افزایش غلظت نانوذرات در یک سیستم همباز افزایش می‌یابد. این افزایش شیب کششی سطحی نشان‌دهنده افزایش عدد مارانگونی و در نتیجه تأثیر مثبت اثر مارانگونی است که ثبات کف را افزایش می‌دهد. برخلاف سیستم فوم همباز، در سیستم فوم ناهمباز، گرادیان کشش سطحی با افزایش غلظت نانوذرات کاهش می‌یابد. همان‌طور که ذکر شد در سیستم ناهمباز، نانوذرات به‌سطح

عدد مارانگونی (Ma) عدد بی‌بعدی است که از نسبت نیروی کشش سطحی به نیروی ویسکوزیته حاصل می‌شود. افزایش این عدد به‌منزله افزایش گرادیان کشش سطحی است که عامل رخداد اثر مارانگونی است. در این مطالعه، اثر مارانگونی طبق رابطه ۱ با استفاده از گرادیان کشش سطحی بر غلظت نانوذرات مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳] و [۱۱]. نتایج جدول ۲ نشان می‌دهد که گرادیان



جدول ۲ نتایج مربوط به تغییرات کشش سطحی براساس غلظت نانوذرات برای بررسی اثر مارانگونی

$ d\sigma/dc $	نانوذرات کسر وزنی	هگزا دسیل تری متیل آمونیم برمید (CMC)	سدیم دودسیل سولفات (CMC)
۱/۶۹	۰/۲	-	۰/۳
۱/۸۱	۰/۶	-	۰/۳
۱/۹۳	۱	-	۰/۳
۶/۰۸	۰/۲	۰/۴	-
۳/۴۳	۰/۶	۰/۴	-
۰/۷۷	۱	۰/۴	-

همبار) و ۴) سورفکتانت CTAB و نانوذرات  $SiO_2$  (سیستم ناهمبار) انجام شدند. نتایج حاصل از این مطالعه در ادامه ذکر شده‌اند.

• حضور نانوذرات باعث افزایش پایداری فوم در هر دو سیستم مورد مطالعه می‌شود درحالی‌که فوم‌زایی برخلاف سیستم همبار در سیستم ناهمبار کاهش می‌یابد.

• در سیستم فوم نانوذرات آنیونی-سورفکتانت آنیونی (همبار)، نیروهای دافعه بین نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت باعث می‌شود مولکول‌های سورفکتانت بیشتری به سطح تماس برسند و در نتیجه پایداری فوم افزایش می‌یابد. علاوه‌براین، جریان مارانگونی با جریان تخلیه فیلم مایع مقابله می‌کند و عامل دیگر پایداری فوم است.

• در سیستم فوم سورفکتانت کاتیونی-نانوذرات آنیونی (ناهمبار)، عامل اصلی که پایداری فوم را بهبود می‌بخشد، وجود ترکیب‌های تشکیل شده از مولکول‌های سورفکتانت و نانوذرات در سطح تماس است. حضور این ترکیب‌ها در سطح تماس، انرژی جداسازی ذرات را افزایش می‌دهد و پایداری فوم را افزایش می‌دهد. برخلاف سیستم همبار در این سیستم، الاستیسیته بالای سطح مانع جریان مارانگونی می‌شود.

تماس می‌رسند. بنابراین، وجود ذرات جامد در سطح تماس باعث می‌شوند سطح تماس جامد شود [۱۲] و جامد مانند شدن سطح مانع جریان یافتن سورفکتانت در سطح تماس می‌شود. لذا در این سیستم جریان مارانگونی اتفاق نمی‌افتد.

$$M \propto \frac{1}{\mu D} \cdot \frac{d\sigma}{dc} \quad (1)$$

$\mu$  ویسکوزیته،  $D$  ضریب نفوذمولکولی،  $\sigma$  کشش سطحی،  $C$  غلظت و  $M$  عدد مارانگونی است.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه به‌منظور بررسی تأثیر جریان مارانگونی در حضور نانوذرات و آرایش نانوذرات و مولکول‌های سورفکتانت در لاملا بر پایداری فوم دو سیستم همبار و ناهمبار فوم به‌صورت هم‌زمان و در شرایط یکسان مورد مطالعه قرار گرفتند. برای هر دو سیستم آزمایشات مشابه در شرایط یکسان انجام شدند تا رفتار دو سیستم مقایسه شود و عوامل مؤثر در پایداری آن‌ها مشخص شود. بدین منظور، آزمایش‌های استاتیک جهت اندازه‌گیری پایداری فوم‌زایی و اندازه‌گیری کشش سطحی انجام شدند. همه آزمایشات ذکر شده برای چهار سری فوم تشکیل شده از: ۱) سورفکتانت SDS، ۲) سورفکتانت CTAB سورفکتانت SDS و نانوذرات  $SiO_2$  (سیستم

## مراجع

- [1]. Green D W, Willhite G P (1998) Enhanced oil recovery, Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers.
- [2]. Singh R, Mohanty K K (2016) Foams stabilized by in-situ surface-activated nanoparticles in bulk and porous media, SPE Journal, 21: 121-130.
- [3]. Maini B Ma V (1984) Relationship between foam stability measured in static tests and flow behavior of foams in porous media, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, OnePetro.
- [4]. Sohrabi M, Danesh A, Tehrani D H, Jamiolahmady M (2008) Microscopic mechanisms of oil recovery by near-miscible gas injection, Transport in Porous Media, 72: 351-367.
- [5]. Madadzadeh A, Sadeghein A, Riahi S (2020) The use of nanotechnology to prevent and mitigate fine migration: a comprehensive review, Reviews in Chemical Engineering.
- [6]. Khoshnevis N, Mahani H, Rehling J (2017) Investigation of pressure transient behavior during Injection Fall-off (IFO) test in foam flooding, Journal of Petroleum Science and Engineering, 149: 860-872.
- [7]. Shojaiepour M, Rashidi F, Dabir B, Amirsardari M (2021) Investigation of foam injection scenarios to control the gas oil ratio in carbonate reservoirs with permeability heterogeneity: simulation of the process in an oil reservoir sector, Journal of Petroleum Research, 31, 119: 3-14.
- [8]. Khoshkalam Y, Khosravi M, Roostami B (2019) An experimental investigation on foam injection in a fractured matrix: effect of viscous cross flow, Journal of Petroleum Research, 29, 98-2: 61-71.
- [9]. Weber E H (1854) Mikroskopische beobachtungen sehr gesetzmäßiger bewegungen, welche die bildung von niederschlag harziger körper aus weingeist begleiten berichte über die verhandlungender königlich schsischen gesellschaft der wissenschaften-Physische Classe, 57.
- [10]. Thiele R, Brettschneider O, Repke J U, Thielert H, Wozny G (2003) Experimental investigations of foaming in a packed tower for sour water stripping, Industrial and Engineering Chemistry Research, 42: 1426-1432.
- [11]. Khosravi M, Bahramian A, Emadi M, Roostami B, Roayaie E (2014) Effect of Marangoni flow on recovery of bypassed oil during CO<sub>2</sub> injection, Journal of Petroleum Science and Engineering, 114: 91-98.
- [12]. Singh R, Mohanty K K (2014) Synergetic stabilization of foams by a mixture of nanoparticles and surfactants, SPE Improved Oil Recovery Symposium, OnePetro.
- [13]. Nguyen P, Fadaei H, Sinton D (2014) Nanoparticle stabilized CO<sub>2</sub> in water foam for mobility control in enhanced oil recovery via microfluidic method, SPE Heavy Oil Conference-Canada, OnePetro.
- [14]. Ma H, Luo M, Dai L L (2008) Influences of surfactant and nanoparticle assembly on effective interfacial tensions, Physical Chemistry Chemical Physics, 10: 2207-2213.
- [15]. Maestro A, Rio E, Drenckhan W, Langevin D, Salonen A (2014) Foams stabilized by mixtures of nanoparticles and oppositely charged surfactants: relationship between bubble shrinkage and foam coarsening, Soft Matter, 10: 6975-6983.
- [16]. Yang W, Wang T, Fan Z, Miao Q, Deng Z, Zhu Y (2017) Foams stabilized by in situ-modified nanoparticles and anionic surfactants for enhanced oil recovery, Energy and Fuels, 31: 4721-4730.
- [17]. Zhao J, Torabi F, Yang J (2021) The synergistic role of silica nanoparticle and anionic surfactant on the static and dynamic CO<sub>2</sub> foam stability for enhanced heavy oil recovery: An experimental study, Fuel, 287: 119443.
- [18]. Rosen M, Solash J (1969) Factors affecting initial foam height in the Ross-Miles foam test, Journal of the American Oil Chemists' Society, 46: 399-402.
- [19]. John R, Miles, G. D (1941) An apparatus for comparison of foaming properties of soaps and detergents, Oil and Soap, 18, 5: 99-102.
- [20]. Vatanparast H, Samiee A, Bahramian A, Javadi A (2017b) Surface behavior of hydrophilic silica nanoparticle-SDS surfactant solutions: I. Effect of nanoparticle concentration on foamability and foam stability, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 513: 430-441.
- [21]. Binks B P, Lumsdon S (2000) Influence of particle wettability on the type and stability of surfactant-free emulsions, Langmuir, 16: 8622-8631.
- [22]. Vatanparast H, Javadi A, Bahramian A (2017a) Silica nanoparticles cationic surfactants interaction in water-oil system, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 521: 221-230.
- [23]. Saranjam N, Chandra S, Mostaghimi J, Fan H, immer J (2016) Orange peel formation due to surface tension-driven flows within drying paint films, Journal of Coatings Technology and Research, 13, 3: 413-426.