

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

بررسی تجربی پایداری فوم کربن دی اکسید با استفاده از مخلوط سورفکتانت و نانوذرات به وسیله تست‌های استاتیک و دینامیک

نگارنده: حسن حاجی سلیمی

اساتید راهنما

دکتر محسن نظری

دکتر جلال فهم‌پور

اسفند ۱۴۰۰

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً

توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم اثر

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم

به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاه‌هم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان مهربان مادرم

که هرچه آموختم در کتب عشق شما آموختم

و هرچه بگوختم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیان را سپاس توانم بگویم

باشد که حاصل تلاشم نسیم کونه غبار محسنتان را بزداید

بوسه بر دستان پرمهربان

تشکر و قدردانی

سپاس پروردگار یکتا را که در همه احوال مشمول لطف و رحمتش هستیم، پروردگاری که هستی ما را

بخشید و به طریق علم و دانش را هممونمان شد و همواره ما را از مواهب ارزشمند تفکر و پژوهش

بهره مند ساخت.

سپاس از استادان گرامی و فرهیخته جناب دکتر محسن نظری و جناب دکتر جلال فهیم پور که در

کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کجی در این عرصه بر من دریغ ننموده اند و بی شک

بدون راهنمایی های ارزشمندشان انجام این پژوهش، امری ناممکن بود.

تعمدنامه

اینجانب **حسن حاجی سلیمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تجربی پایداری فوم کربن دی اکسید با استفاده از مخلوط سورفکتانت و نانوذرات به وسیله تست های استاتیک و دینامیک تحت راهنمایی دکتر محسن نظری و دکتر جلال فهیم پور متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

سیلاب‌زنی فوم یک روش ثابت‌شده در فرآیند ازدیاد برداشت نفت برای بازیابی مقدار قابل توجهی از نفت باقی‌مانده در مخزن است. با این حال، استفاده از سورفکتانت به‌عنوان عامل فوم‌کننده در فوم کربن دی اکسید، ممکن است بتواند تحرک‌پذیری را کاهش دهد اما معایب آن که احتباس سورفکتانت در محیط متخلخل و ناپایداری فوم در شرایط مخزن (شوری زیاد، دما و فشار بالا) است، مانع از کارایی مطلوب این ماده شیمیایی در فرآیند سیلاب‌زنی فوم می‌شود. از آنجایی که نانوذرات دارای ویژگی‌هایی نظیر انرژی چسبندگی بالا در رابط بین دو فاز می‌باشند، کاندید بسیار خوبی برای پایدار کردن فوم حتی در شرایط سخت هستند. بنابراین، هدف از این پژوهش ارزیابی ویژگی‌های پایداری و تحرک‌پذیری فوم کربن دی اکسید در غلظت‌های بسیار کم (۱۰۰ Ppm) نقاط کوانتومی اکسید روی، سورفکتانت آلفا اولفین سولفونات در غلظت بحرانی میسل (۰/۱wt%) و آب دریا مصنوعی با غلظت شوری ۴۰۰۰۰ Ppm به‌عنوان سیال پایه است. توانایی فوم‌کنندگی محلول‌های آماده‌شده و پایداری فوم آن‌ها از طریق ثبت زمان تشکیل فوم و کاهش ارتفاع آن درون ستون فوم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فوم حاصل از هم‌افزایی نقاط کوانتومی و سورفکتانت در حالت استاتیکی و بدون حضور نفت، پایداری را ۷۴٪ بهبود بخشیده است. بنابراین محلول نقاط کوانتومی اکسید روی و سورفکتانت، فوم بسیار پایداری را ایجاد می‌کنند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای این ذرات در فرآیندهای سیلاب‌زنی فوم است. همچنین، تزریق دینامیکی فوم درون میکرومدل، منجر به افزایش میزان بازیابی نفت از ۳۷/۶٪ محلول سورفکتانت به‌تنهایی به ۹۷/۵۵٪ در حضور نقاط کوانتومی شد.

کلمات کلیدی: فوم، سورفکتانت، نانوذره، نقاط کوانتومی، پایداری، تحرک‌پذیری، میکرومدل

فهرست مطالب

۵	فهرست جداول
۹	فهرست اشکال
ح	فهرست علائم
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ کلیات.....
۴	۲-۱ سازمان‌بندی پایان‌نامه.....
۵	فصل ۲: مفاهیم و پیشینه مطالعات
۶	۱-۲ ازدیاد برداشت نفت.....
۸	۲-۲ تعریف فوم.....
۱۰	۱-۲-۲ مکانیسم‌های تولید فوم.....
۱۲	۲-۲-۲ سورفکتانت.....
۱۳	۳-۲ نانوذرات.....
۱۳	۱-۳-۲ طبقه‌بندی نانومواد.....
۱۴	۲-۳-۲ ویژگی نانوذرات.....
۱۷	۳-۳-۲ کاربرد نانوذرات در بهبود بازیابی نفت.....
۲۲	۴-۳-۲ نقاط کوانتومی.....
۲۵	۴-۲ مروری بر مطالعات پیشین.....
۳۶	۵-۲ تعریف مسئله.....
۳۹	فصل ۳: دستگاه‌ها و روش‌های آزمایش
۴۰	۱-۳ بسترهای آزمایشگاهی.....

- ۴۰ ۱-۱-۳ بستر آزمایشگاهی پایداری و فوم‌کنندگی فوم در مقیاس انباشته.
- ۴۱ ۲-۱-۳ بستر آزمایشگاهی آزمون دینامیک و بازیابی نفت
- ۴۴ ۲-۳ تجهیزات آزمایشگاهی
- ۴۴ ۱-۲-۳ ترازو
- ۴۵ ۲-۲-۳ همزن مغناطیسی
- ۴۶ ۳-۲-۳ دستگاه التراسونیک پروبی
- ۴۷ ۴-۲-۳ کنترل‌کننده جریان جرمی
- ۴۷ ۵-۲-۳ دوربین
- ۴۸ ۶-۲-۳ کوره
- ۴۹ ۷-۲-۳ پمپ سرنگی
- ۴۹ ۸-۲-۳ کمپرسور هوا
- ۵۰ ۳-۳ مواد مورد نیاز برای انجام آزمایش
- ۵۰ ۱-۳-۳ سورفکتانت
- ۵۰ ۲-۳-۳ نانوذره
- ۵۱ ۳-۳-۳ نفت
- ۵۱ ۴-۳-۳ نمک
- ۵۱ ۵-۳-۳ سایر سیالات
- ۵۲ ۴-۳ روند انجام آزمایش‌ها
- ۵۲ ۱-۴-۳ آماده‌سازی محلول‌ها
- ۵۳ ۲-۴-۳ تعیین غلظت بحرانی میسل
- ۵۴ ۳-۴-۳ روند انجام آزمون پایداری در مقیاس انباشته
- ۵۵ ۴-۴-۳ روند انجام آزمون دینامیکی

۱-۴	مقدمه	۵۸
۲-۴	آزمون تعیین غلظت بحرانی میسل	۵۸
۳-۴	آزمون تعیین قابلیت فوم‌کنندگی	۵۹
۱-۳-۴	تأثیر غلظت سورفکتانت بر قابلیت فوم‌کنندگی	۵۹
۲-۳-۴	تأثیر شوری بر قابلیت فوم‌کنندگی	۶۲
۳-۳-۴	تأثیر حضور نانوذره بر قابلیت فوم‌کنندگی	۶۳
۴-۳-۴	تأثیر نفت بر قابلیت فوم‌کنندگی	۶۵
۴-۴	آزمون تعیین پایداری استاتیکی فوم	۶۸
۱-۴-۴	تأثیر غلظت سورفکتانت بر پایداری استاتیکی فوم	۶۸
۲-۴-۴	تأثیر شوری بر پایداری استاتیکی فوم	۷۱
۳-۴-۴	تأثیر حضور نانوذره بر پایداری استاتیکی فوم	۷۴
۴-۴-۴	تأثیر نفت بر پایداری استاتیکی فوم	۷۶
۵-۴	بررسی تأثیر عوامل مختلف بر شکل حباب‌ها	۸۰
۱-۵-۴	تأثیر غلظت سورفکتانت	۸۰
۲-۵-۴	تأثیر حضور شوری	۸۱
۶-۴	آزمون دینامیکی و بازیابی نفت توسط میکرومدل	۸۲
۱-۶-۴	آزمون تزریق فوم AOS بدون نانوذره	۸۴
۲-۶-۴	آزمون تزریق فوم AOS با نانوذرات کوانتومی اکسید روی	۸۸
۳-۶-۴	آنالیز نتایج حاصل از آزمون‌های دینامیکی میکرومدل	۸۹

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱-۵	مقدمه	۹۴
-----	-------	----

۵-۲ نتایج ۹۴

۵-۳ پیشنهادها ۹۵

مراجع ۹۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۲. مثال‌هایی از ابعاد مختلف نانوذرات ۱۵
- جدول ۱-۳. ویژگی سورفکتانت استفاده شده ۵۰
- جدول ۲-۳. ترکیبات آب دریا خلیج فارس ۵۱

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲. فلوچارت روش‌های بهبود بازیابی نفت، چالش‌ها و مکانیسم‌ها..... ۷
- شکل ۲-۲. مکانیسم‌های تولید فوم ۱۰
- شکل ۳-۲. شکل مولکول سورفکتانت ۱۲
- شکل ۴-۲. طبقه‌بندی سورفکتانت‌ها..... ۱۲
- شکل ۵-۲. طبقه‌بندی نانومواد: نانوذرات، نانورس، نانوامولسیون‌ها..... ۱۴
- شکل ۶-۲. نانوذرات با نسبت مساحت سطح به حجم زیاد ۱۷
- شکل ۷-۲. کاربرد نانوفناوری در EOR ۱۸
- شکل ۸-۲. سورفکتانت‌ها و نانوذرات در محیط متخلخل ۲۱
- شکل ۹-۲. طرح شماتیک: الف) نوار انرژی مواد مختلف، ب) طول موج انتشار نقاط کوانتومی..... ۲۴
- شکل ۱۰-۲. ویسکوزیته ظاهری فوم در برابر غلظت‌های مختلف نانوذرات ۳۳
- شکل ۱-۳. ستاپ آزمون استاتیک ۴۱
- شکل ۲-۳. ستاپ آزمون دینامیک ۴۱
- شکل ۳-۳. الگوی میکرومدل ۴۲
- شکل ۴-۳. میکرومدل ۴۳
- شکل ۵-۳. ترازو با دقت بالا ۴۴
- شکل ۶-۳. همزن مغناطیسی ۴۵
- شکل ۷-۳. دستگاه التراسونیک پروبی ۴۶
- شکل ۸-۳. کنترل‌کننده جریان ۴۷
- شکل ۹-۳. دوربین ۴۸
- شکل ۱۰-۳. کوره آزمایشگاهی ۴۸
- شکل ۱۱-۳. پمپ سرنگی ۴۹
- شکل ۱۲-۳. کمپرسور هوا ۴۹
- شکل ۱۳-۳. توزیع مولکول‌های سورفکتانت (a) زیر غلظت CMC (b) بالای غلظت CMC ۵۳
- شکل ۱۴-۳. فوم‌کنندگی و پایداری محلول فوم ۵۴
- شکل ۱۵-۳. خلأسازی میکرومدل ۵۵
- شکل ۱-۴. هدایت الکتریکی برحسب غلظت سورفکتانت ۵۸
- شکل ۲-۴. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: CMC ۱/۵ (راست)، CMC ۱ (وسط)، CMC ۰/۵ (چپ). ۶۰
- شکل ۳-۴. اثر افزایش غلظت سورفکتانت بر قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS ۶۱
- شکل ۴-۴. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: بدون شوری (راست)، با شوری (چپ). ۶۲

- شکل ۴-۵. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS در حضور شوری ۶۳
- شکل ۴-۶. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: با نانوذره (راست)، بدون نانوذره (چپ) ۶۴
- شکل ۴-۷. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS با و بدون نانوذره ۶۵
- شکل ۴-۸. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: بدون نفت (راست)، با نفت (وسط)، با نفت و نانوذره (چپ) ۶۶
- شکل ۴-۹. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS با و بدون نفت ۶۷
- شکل ۴-۱۰. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS در حضور نفت با و بدون نانوذره ۶۷
- شکل ۴-۱۱. پایداری فوم AOS: CMC ۱/۵ (راست)، CMC ۱ (وسط)، CMC ۰/۵ (چپ) ۶۹
- شکل ۴-۱۲. نمودار حاصل از بی‌بعد سازی اثر افزایش غلظت سورفکتانت بر پایداری فوم AOS ۷۰
- شکل ۴-۱۳. اثر افزایش غلظت سورفکتانت بر پایداری فوم AOS ۷۱
- شکل ۴-۱۴. پایداری فوم AOS: بدون شوری (راست)، با شوری (چپ) ۷۲
- شکل ۴-۱۵. نمودار حاصل از بی‌بعد سازی پایداری فوم AOS در حضور شوری ۷۳
- شکل ۴-۱۶. پایداری فوم AOS در حضور شوری ۷۳
- شکل ۴-۱۷. پایداری فوم AOS: بدون نانوذره (سمت راست)، با نانوذره (سمت چپ) ۷۴
- شکل ۴-۱۸. نمودار حاصل از بی‌بعد سازی پایداری فوم در حضور نانوذره ۷۵
- شکل ۴-۱۹. پایداری فوم AOS در حضور نانوذره ۷۶
- شکل ۴-۲۰. پایداری فوم AOS: بدون نفت (راست)، ب) با نفت (وسط)، پ) با نفت و نانوذره (چپ) ۷۷
- شکل ۴-۲۱. نمودار حاصل از بی‌بعد سازی پایداری فوم AOS در حضور نفت ۷۸
- شکل ۴-۲۲. نمودار حاصل از بی‌بعد سازی پایداری فوم AOS در حضور نفت با و بدون نانوذره ۷۸
- شکل ۴-۲۳. پایداری فوم AOS در حضور نفت ۷۹
- شکل ۴-۲۴. پایداری فوم AOS در حضور نفت با و بدون نانوذره ۸۰
- شکل ۴-۲۵. مقایسه بصری اندازه حباب‌ها: غلظت CMC ۰/۵ (بالا)، غلظت CMC ۱ (وسط)، غلظت CMC ۱/۵ (پایین) ۸۱
- شکل ۴-۲۶. مقایسه بصری اندازه حباب‌ها در غلظت CMC ۱: بدون شوری (بالا)، ب) با شوری (پایین) ۸۲
- شکل ۴-۲۷. میکرومدل اشباع شده از نفت (بالا) و تصویر باینری آن (پایین) ۸۳
- شکل ۴-۲۸. پانزده دقیقه پس از تزریق فوم AOS در میکرومدل ۸۵
- شکل ۴-۲۹. ۳۰ دقیقه پس از تزریق فوم AOS در میکرومدل ۸۶
- شکل ۴-۳۰. اتمام بازیابی پس از یک ساعت تزریق فوم AOS در میکرومدل ۸۷
- شکل ۴-۳۱. ده دقیقه پس از تزریق فوم AOS - نانوذره در میکرومدل ۸۸
- شکل ۴-۳۲. پایان تزریق فوم AOS - نانوذره در میکرومدل ۸۹
- شکل ۴-۳۳. مقایسه میزان بازیابی انجام شده توسط فوم حاصل از سورفکتانت AOS (بالا، ۳۷/۶٪؛ بازیابی) و فوم حاصل از سورفکتانت و نقاط کوانتومی اکسید روی (پایین، ۹۷/۵۵٪؛ بازیابی) ۹۰

فهرست علائم

$A(m^2)$	سطح مقطع
$C(Ppm)$	غلظت
$CMC(Ppm)$	غلظت بحرانی میسل
Ca	عدد موئینگی
$H_0(cm)$	ارتفاع اولیه فوم در ستون فوم
$H(cm)$	ارتفاع فوم
$K(mD)$	نفوذپذیری
L	عدد لاملایی
$M(m^2)$	تحرک پذیری
MR	نسبت تحرک پذیری
MRF	فاکتور کاهش تحرک پذیری
$P(psi)$	فشار
$PV(ml)$	حجم منافذ
$Q(m^3/s)$	دبی حجمی
$T(^{\circ}C)$	دما
$\mu(cp)$	ویسکوزیته
$\sigma(N/m \text{ or } dyn/cm)$	کشش سطحی
$\theta(degree)$	زاویه تماس
$\varphi(\%)$	تخلخل

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ کلیات

رفاه بشر، رشد اقتصادی و تأمین انرژی از آغاز انقلاب صنعتی تا به امروز رابطه مثبت قوی نشان داده است. در طول قرن بیستم، انرژی ارزان و قابل اطمینان از منابع فسیلی به وفور در دسترس قرار گرفت. با این حال، نگرانی‌های مربوط به تغییرات آب و هوایی به طور فزاینده‌ای توسط دانشمندان و سیاست‌گذاران معاصر مشکل ساز شده است. به طور خاص، انتشار کربن دی اکسید^۱ به عنوان یک مسئله مهم در نظر گرفته می‌شود، زیرا عامل اصلی اثر گلخانه‌ای است. بنابراین کاهش انتشار کربن دی اکسید، درحالی که جهان را با انرژی ارزان، فراوان و قابل اطمینان تأمین می‌کند، برای آینده‌ای پررونق حیاتی خواهد بود. تجمع کربن دی اکسید جو را می‌توان با جذب کربن دی اکسید و تدفین آن در سازه‌های زیرزمینی مناسب کاهش داد. اجرا در مقیاس وسیع جذب و تدفین کربن^۲ می‌تواند به تثبیت غلظت گازهای گلخانه‌ای جو کمک کند. برای شرکت‌هایی که به دنبال سود حداکثری هستند، هزینه‌های پیاده‌سازی روش فوق در مقایسه با هزینه انتشار کربن دی اکسید در اتمسفر زیاد است. با استفاده از کربن دی اکسید به عنوان پارامتر ورودی در فرآیند تولید، می‌توان انگیزه‌های اقتصادی را به میزان قابل توجهی افزایش داد و در نتیجه ارزش افزوده‌ای را به محصول نهایی افزود. یکی از راه‌های دیگر استفاده از کربن دی اکسید، کاربرد آن در بهبود بازیابی نفت^۳ است که سرمایه‌گذاری در ذخیره‌سازی ایمن کربن دی اکسید را درحالی که روند تولید نفت را بهبود می‌بخشد، افزایش می‌دهد. این هم‌افزایی به احتمال زیاد پیشرفت‌های فناوری مربوط به ذخیره کربن دی اکسید را تسریع کرده و انتشار چرخه عمر پروژه‌های تولید نفت را کاهش می‌دهد. در شرایط مخزن، کربن دی اکسید چندین ویژگی مفید برای اهداف EOR دارد. به همین دلیل، بیش از ۵۰ سال است که به عنوان عامل جابجایی نفت کاربرد دارد. تزریق کربن دی اکسید خالص، به دلیل تفاوت چگالی^۴ و لزجت^۵ بین سیالات مخزن و کربن دی

^۱ CO2

^۲ Sequestration

^۳ EOR

^۴ Density

^۵ Viscosity

اکسید، دارای چالش‌های ذاتی است. این اختلاف باعث می‌شود که کربن دی اکسید به سمت بالای مخزن حرکت کند، درحالی‌که اختلاف دوم باعث ایجاد انگشتی شدن چسبناک^۱ و انتقال گاز از طریق مناطق با نفوذپذیری^۲ بالا می‌شود. هر دو اثر برای بازیابی نفت و ذخیره کربن دی اکسید مضر است، زیرا جبهه‌های ناپایدار جابجایی باعث کاهش کارایی جارویی^۳ و کاهش ذخیره‌سازی می‌شود. در نتیجه، سودآوری پروژه از طریق بازیابی کمتر نفت تحت تأثیر منفی قرار خواهد گرفت. کاهش تحرک‌پذیری کربن دی اکسید برای کاهش ناپایداری جریان مهم است. تولید فوم در محل یکی از راه‌حل‌های ممکن است، جایی که مخلوط کربن دی اکسید و آب‌نمک با یک عامل فوم‌کننده (سورفکتانت‌ها یا نانوذرات) ثابت کرده است که تحرک کربن دی اکسید و انتشار جبهه را به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌دهد.

فوم‌ها به‌طور ذاتی از نظر ترمودینامیکی ناپایدار هستند، اما این جنبه را می‌توان با بهینه‌سازی نوع و غلظت عامل فوم‌کننده بهبود بخشید. نشان داده شده است که سورفکتانت‌ها از طریق آزمون‌های آزمایشگاهی (و تا حدی در آزمون‌های میدانی) فوم قوی تولید می‌کنند، اما ممکن است در شرایط سخت مخزن مانند درجه حرارت بالا و شوری ناپایدار شوند. نانوذرات در حال حاضر به‌عنوان عامل پایداری فوم مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و نتایج آزمایشگاهی امیدوارکننده‌ای نشان داده‌اند. انرژی چسبندگی بالا روی رابطه، هزینه کم و توانایی پایداری ماندن در محیط‌های سخت، همگی از ویژگی‌هایی است که برای تحقیقات بیشتر قابل بررسی است. در مقایسه با سورفکتانت‌ها، نانوذرات به‌عنوان عوامل پایداری‌کننده برای EOR، هنوز یک فناوری جدید است و همچنان در زمینه‌هایی آزمایش نشده است.

اثر هم‌افزایی^۴ نانوذرات با سورفکتانت^۵ روش‌هایی را ارائه می‌دهد که به‌طور بالقوه برخی از کاستی‌های شناخته‌شده در فوم^۶ را با موفقیت برطرف می‌کند. درک اساسی از مکانیسم‌های فوم و پایداری فوم برای تهیه فرمولاسیون بهتر سیالات فوم که برای مخزن و چالش‌های مخزن مناسب هستند، ضروری است.

¹ Viscous Fingering

² Permeability

³ Sweep Efficiency

⁴ Synergy

⁵ Surfactant

⁶ Foam

به‌طور مشابه، درک ذرات پیچیده، سورفکتانت، آب‌نمک، نفت، گاز تزریقی و تعاملات سنگ در محیط مخزن برای کاربرد موفقیت‌آمیز آن در EOR بسیار مهم است.

۱-۲ سازمان‌بندی پایان‌نامه

پژوهش حاضر شامل پنج فصل می‌باشد. در فصل یک همان‌طور که ملاحظه شد، به توضیح کلیات مسائل مربوط به فرآیند ازدیاد برداشت و ضرورت استفاده از گاز کربن دی‌اکسید هم برای بهبود بازیابی نفت و هم ذخیره آن، هم‌چنین رفع معایب موجود در عملکرد گاز کربن دی‌اکسید به‌وسیله‌ی فوم‌ها پرداخته شد. در فصل دوم مفاهیم و مطالعات انجام‌شده در این حوزه، هم‌چنین بیان مسئله، اهداف و نوآوری این پژوهش ذکر خواهد شد. فصل سوم شامل بسترهای آزمایشگاهی، تجهیزات، مواد و روش‌های مورد استفاده برای انجام پژوهش می‌باشد. در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمون‌ها بیان شده و تفسیر و ارزیابی آن‌ها انجام شده است. در فصل پنجم نتیجه‌گیری کلی ذکر شده و پیشنهادها برای مطالعات بعدی ارائه شده است.

فصل ۲: مفاهیم و پیشینه مطالعات

۲-۱ ازدیاد برداشت نفت

به صورت کلی، برداشت نفت از مخازن به سه مرحله تقسیم می شود. مرحله اول تولید از چاه های نفتی با استفاده از انرژی طبیعی موجود در مخزن که منبع اصلی انرژی برای جابجایی نفت به سمت چاه تولیدی است، انجام می شود. منبع این انرژی طبیعی شامل رانش کلاhek گازی^۱، رانش آبخوان^۲، رانش گاز محلول^۳، انبساط سنگ و سیال^۴ و ریزش ثقلی^۵ می باشد. در این مرحله تنها در حدود ۳۰-۵۰ درصد نفت اصلی موجود در مخزن^۶ برداشت می شود.

مرحله دوم عملیات بازیابی، به طور معمول زمانی انجام می شود که انرژی مخزن کاهش یافته و در نتیجه کاهش برداشت نفت رخ می دهد. برداشت مرحله دوم با افزایش انرژی طبیعی مخزن با کمک تزریق آب یا گاز انجام می شود. در این فرآیند، گاز و آب را می توان برای تثبیت فشار با انبساط کلاhek گازی و آبخوان و یا رویکرد جابه جایی غیرامتزاجی نفت بر اساس نفوذپذیری نسبی و جابجایی حجمی، درون چاه نفتی تزریق کرد.

جابجایی غیرامتزاجی گازی به اندازه سیلاب زنی آب^۷ مفید نیست و امروزه به ندرت به عنوان برداشت مرحله دوم استفاده می شود. بنابراین روش سیلاب زنی آب به طور معمول معادل برداشت مرحله دوم طبقه بندی می شود. آب باعث رانده شدن نفت به سمت چاه های تولید می شود و این فرآیند تا زمانی که نسبت آب به نفت در چاه های تولید بالا رود و تولید نفت بیشتر صرفه اقتصادی نداشته باشد، ادامه می یابد. در پایان این مرحله برداشت نفت به ۶۰-۴۰ درصد می رسد.

پس از بازیابی نفت توسط مرحله اول و دوم، بیش از ۵۰ درصد نفت موجود در مخزن به دام افتاده باقی می ماند [۱]. این مقدار نفت باقی مانده در مخزن می تواند به عنوان منبع انرژی برای آینده در نظر

¹ Gas Cap Drive

² Aquifer Drive

³ Solution Gas Drive

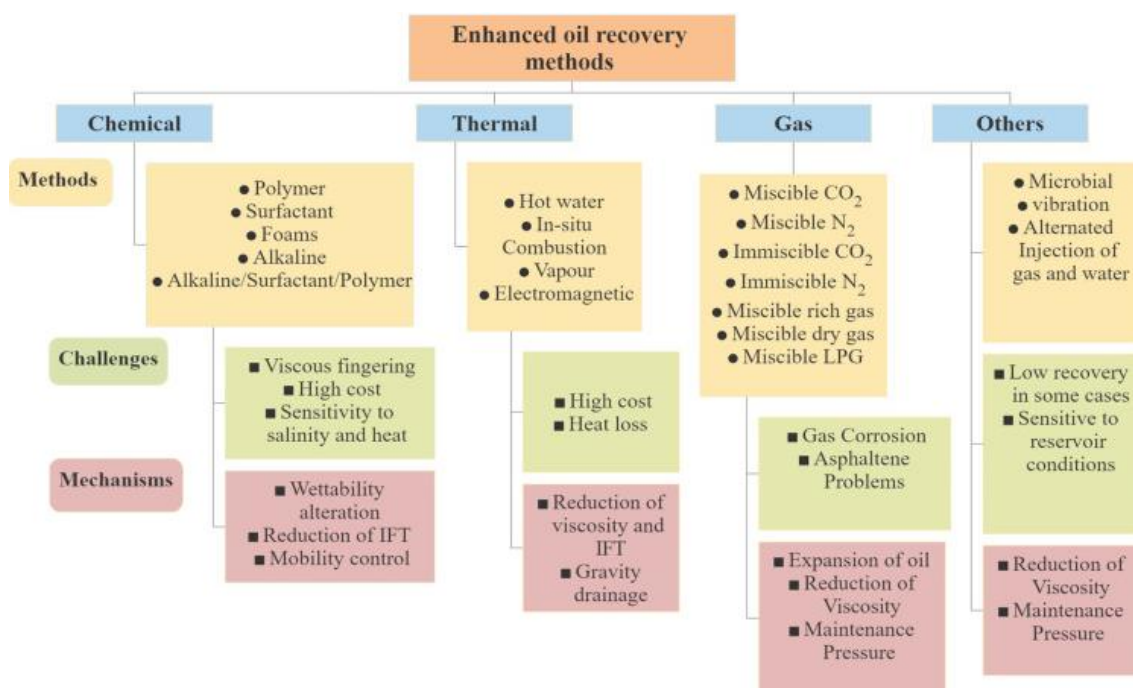
⁴ Rock and Fluid Expansio

⁵ Gravity Segregation

⁶ Original Oil in Place (OOIP)

⁷ Water Flooding

گرفته شود. از آنجا که اکثر مخازن فعلی بالغ هستند و حفر مخازن جدید نیاز به وقت، سرمایه و فناوری‌های بیشتری دارد، بنابراین استفاده از روش‌های بازیابی مرحله سوم یا بهبود بازیابی نفت، دسترسی و برداشت حداکثری را از مخازن موجود به همراه دارد. روش‌های بازیابی مرحله سوم شامل فرآیندهای سیلاب‌زنی شیمیایی، سیلاب‌زنی حرارتی، سیلاب‌زنی امتزاج‌پذیر و غیره برای افزایش تولید نفت می‌باشند که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. فلوچارت روش‌های بهبود بازیابی نفت، چالش‌ها و مکانیسم‌ها [۲]

جذب و احتباس مواد شیمیایی در طی جریان از طریق محیط متخلخل رخ می‌دهد. این عوامل بستگی به نوع مواد شیمیایی تزریق شده به مخزن دارند. مواد شیمیایی با سنگ مخزن به روش‌های مختلف مانند جاذبه الکترواستاتیک^۱، نیروهای واندروالس^۲، برهم‌کنش استریکی^۳، کاهش غلظت محلول‌های شیمیایی تزریق شده و غیره در تعامل می‌باشند [۳]. جذب در رابط جامد-مایع به دلیل انتقال یک

^۱ Electrostatic

^۲ Van der Waals

^۳ Steric

مولکول شیمیایی از فاز محلول به رابط جامد-مایع اتفاق می‌افتد [۴]. از جمله مواد شیمیایی که روی سطح سنگ جذب می‌شوند، سورفکتانت‌ها و ترکیبات قلیایی هستند.

۲-۲ تعریف فوم

تزریق گاز به‌طور گسترده‌ای برای کاربردهای بهبود بازیابی نفت استفاده می‌شود. تزریق گاز کربن دی اکسید برای کاربردهای EOR در دهه ۱۹۵۰ برای بهبود بازیابی نفت و تدفین کربن در سازندهای زیرزمینی آغاز شد [۵، ۶]. با این حال، تزریق کربن دی اکسید در آن زمان به دلیل ویسکوزیته پایین در مقایسه با سیالات سازند غیرعملی بود که منجر به انگشتی شدن چسبناک و میان‌شکنی زودهنگام^۱ شد [۷]. از این رو، کارایی جارویی و ضریب بازیابی پایین بود [۸]. سیلاب‌زنی پلیمری برای کاهش نسبت تحرک‌پذیری سیال جابجاکننده به سیال جابجاشده معرفی شد [۹].

فوم کربن دی اکسید در دهه ۱۹۶۰ به‌عنوان جایگزینی برای پلیمرها برای جلوگیری از آسیب سازند، معرفی شد [۱۰]. فوم دارای مقدار کمی آب است که آسیب سازند را در سازندهای حساس به آب کاهش می‌دهد و امکان پاک‌سازی سریع را فراهم می‌کند [۱۱]. فوم پراکندگی یک گاز (نیتروژن، کربن دی اکسید یا متان)، به‌عنوان یک سیال غیر مرطوب‌کننده در یک فاز مرطوب‌کننده پیوسته است. فاز مرطوب‌کننده آبی است که حاوی سورفکتانت در غلظت خاصی است که برابر یا بالاتر از غلظت بحرانی میسل^۲ است. فیلم مایع که فاز گاز را از یکدیگر جدا می‌کند (غشای خارجی حباب‌های گاز)، لاملای فوم نامیده می‌شود. اولین خانواده سورفکتانت انتخاب شده برای روش بهبود بازیابی نفت، سولفونات‌های معطر مصنوعی و نفتی (مانند آلفا اولفین سولفونات^۳) به دلیل در دسترس بودن، جذب کم‌تر روی سنگ‌های متخلخل، سازگاری با آب سخت و خواص مرطوب‌کننده و فوم‌کننده خوب، بودند [۱۲، ۱۳].

¹ Early Breakthrough

² Critical Micelle Concentration (CMC)

³ Alpha-Olefin Sulfonates (AOS)

سیال فوم در مقایسه با سیالات دیگر، دارای ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر ویسکوزیته‌ی ظاهری بالا، انرژی سیستم بالا و اثر مسدودکننده می‌باشد [۱۴، ۱۵]. خواص سیال فوم را می‌توان برای انطباق بهتر با شرایط زمین‌شناسی مخزن اصلاح کرد؛ که معمولاً به صورت تغییر ترکیب فرمولاسیون، روش آماده‌سازی و/یا شرایط آماده‌سازی سیستم فوم انجام می‌شود [۱۶، ۱۷].

فوم انباشته را می‌توان با چندین ویژگی مانند کیفیت، بافت، پایداری و چگالی فوم مشخص کرد [۱۸]. کیفیت فوم، درصد حجم گاز درون فوم در فشار و دمای مشخص است [۱۹]. کیفیت فوم برای کاربردهای EOR معمولاً ۷۵-۹۰ درصد است. بافت فوم اندازه‌گیری شده، متوسط اندازه حباب گاز است. پایداری فوم بستگی به خواص شیمیایی و فیزیکی فیلم آب (لاملاها) پایدار شده با سورفکتانت دارد که حباب‌های گاز را جدا می‌کند. فوم‌ها سیستم‌های با پایداری کم هستند؛ بر این اساس، تمام فوم‌ها در نهایت تجزیه می‌شوند. پایداری فوم با زمان نیمه‌عمر^۱، یعنی زمان مورد نیاز برای از دست دادن ۵۰ درصد حجم فوم اندازه‌گیری می‌شود [۲۰]. به‌طور کلی، با ظریف شدن بافت فوم، فوم پایدارتر می‌شود و مقاومت بیشتری در برابر جریان در سنگ ماتریس دارد. مقاومت جریان فوم در محیط متخلخل با فاکتور کاهش تحرک‌پذیری^۲ اندازه‌گیری می‌شود. فاکتور کاهش تحرک‌پذیری به‌عنوان نسبت تحرک‌پذیری کلی آب‌نمک/کربن دی اکسید به تحرک‌پذیری فوم تعریف می‌شود. هنگامی که فوم‌ها پایدارتر می‌شوند، مقاومت بیشتری در برابر جریان انتظار می‌رود و منجر به کاهش تحرک‌پذیری بیشتر می‌شود [۲۱]. فاکتور کاهش تحرک‌پذیری طبق رابطه ۱-۲ بدست می‌آید:

$$MRF = \frac{\mu_f}{\mu_b} = \frac{\left[\frac{kA\Delta P}{Q_L}\right]_f}{\left[\frac{kA\Delta P}{Q_L}\right]_b} = \frac{\Delta P_f}{\Delta P_b} \quad (1-2)$$

که در آن Q نرخ جریان کل، k نفوذپذیری مطلق مغزه، A مساحت سطح مقطع مغزه، L طول مغزه، μ ویسکوزیته، ΔP افت فشار در سراسر مغزه است و اندیس‌های "f" و "b" به ترتیب نشان‌دهنده آزمایش‌های با و بدون فوم هستند. افزایش فشار در امتداد محیط متخلخل نشان‌دهنده کاهش تولید

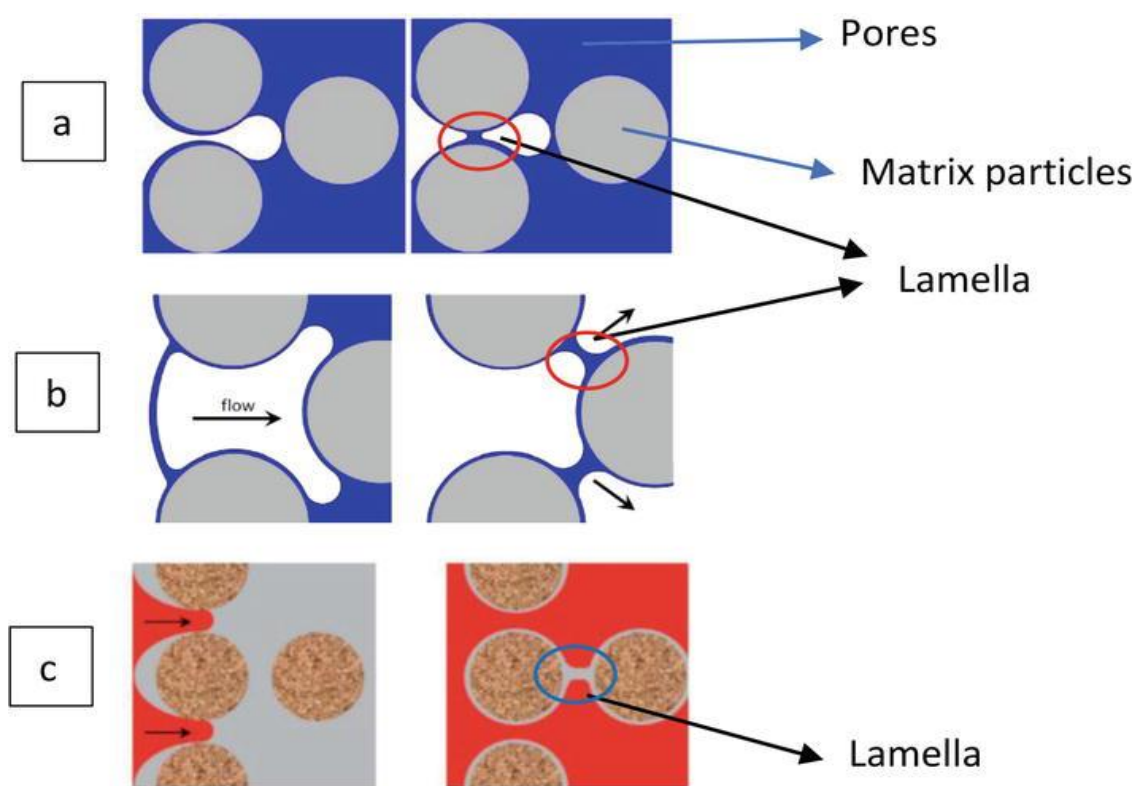
¹ Half-Life Time

² Mobility Reduction Factor (MRF)

فوم و کاهش تحرک پذیری گاز است [۲۲]. افت فشار بیشتر، نشان دهنده فوم چسبناک و مقاومت قابل توجه در برابر تحرک پذیری گاز در محیط متخلخل است.

۱-۲-۲ مکانیسم های تولید فوم

همان طور که در شکل ۲-۲ مشخص است، فوم از طریق سه مکانیسم مختلف در محیط متخلخل تولید می شود: (الف) حالت ناگهانی^۱، (ب) تقسیم لاملا^۲ و (ج) پسماندگی^۳ [۲۳، ۲۴].



شکل ۲-۲. مکانیسم های تولید فوم [۲۵]

¹ Snap-Off

² Lamella Division

³ Leave-Behind

۲-۱-۲-۱ حالت ناگهانی

در مکانیسم حالت ناگهانی، لاملاها در گلویی حفره‌ای پر از گاز، در اثر اختلاف فشار مؤینگی بین بدنه و گلوگاه حفره‌ها ایجاد می‌شوند [۲۳]. شکل ۲-۲ بخش a، فرآیند تولید فوم را با مکانیسم حالت ناگهانی نشان می‌دهد. همان طور که فاز گاز منطقه مایع را جابجا می‌کند، اختلاف فشار مؤینگی بین بدنه منافذ و گلوگاه منافذ باعث می‌شود که فاز مرطوب‌کننده (آب) به عقب برگردد و سپس فاز گاز را قطع کند.

۲-۱-۲-۲ تقسیم لاملا

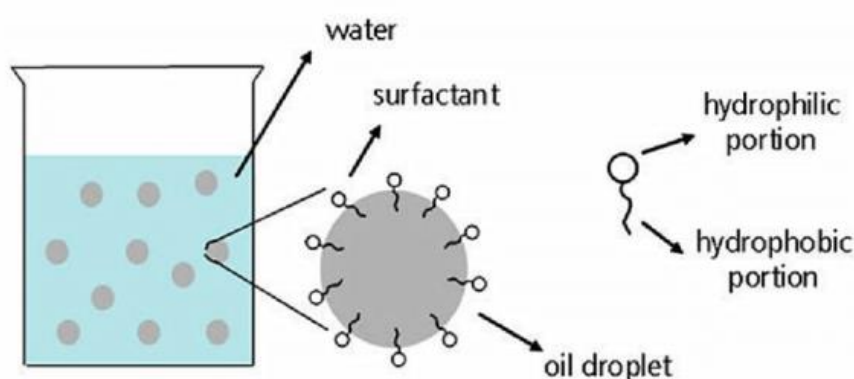
مکانیسم تقسیم لاملا به‌طور کلی زمانی اتفاق می‌افتد که یک لاملای فوم بزرگ‌تر از بدنه منافذ به یک نقطه انشعاب نزدیک شده و به دو یا چند حباب تقسیم شود (شکل ۲-۲ b). اگر لاملا در نقطه انشعاب با بیش از یک مسیر باشد که برای جریان لاملا نیاز به فشار یکسان دارد، لاملا به دو حباب یا لاملا تقسیم می‌شود [۲۶].

۲-۱-۲-۳ پسماندگی

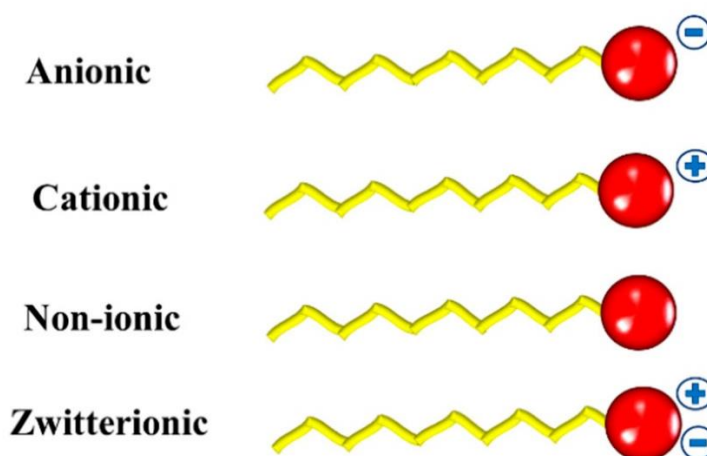
مکانیسم پسماندگی گاز زمانی اتفاق می‌افتد که گاز وارد محیط متخلخل می‌شود که در ابتدا با مایع اشباع شده است یا وقتی دو جبهه گاز به فضای حفره‌ای که پر از مایع است نزدیک می‌شود؛ این فرآیندها مایع را در یک لاملا فشار می‌دهند (شکل ۲-۲ c). این مکانیسم معمولاً یک فوم ضعیف ایجاد می‌کند زیرا لاملا تولید شده موازی جهت جریان است [۲۴، ۲۶].

۲-۲-۲ سورفکتانت

سورفکتانت‌ها یا مواد فعال سطحی، به عنوان عوامل فوم‌کننده عمل می‌کنند [۲۷]. این دسته از مولکول‌ها دارای دو بخش متفاوت در ساختار مولکولی خود می‌باشند که شامل یک قسمت گروه سر آب‌دوست (چربی‌گریز) و یک قسمت گروه دم آب‌گریز (چربی‌دوست) است. قسمت دم آب‌گریز بیشتر سورفکتانت‌ها در واقع از یک زنجیره هیدروکربنی تشکیل شده است که طول متوسط آن معمولاً از ۱۲ تا ۱۸ اتم کربن است. سورفکتانت‌ها برحسب بار سطحی گروه سر خود، به چهار گروه آنیونی (بار منفی)، کاتیونی (بار مثبت)، غیر یونی (بدون بار) و زوئیترونیک (هر دو بار مثبت و منفی) طبقه‌بندی می‌شوند. شکل ۲-۳ و شکل ۲-۴ نمایی شماتیک از شکل مولکول و طبقه‌بندی سورفکتانت‌ها را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۳. شکل مولکول سورفکتانت [۲۸]



شکل ۲-۴. طبقه‌بندی سورفکتانت‌ها [۲۹]

سورفکتانت‌ها به دلیل توانایی آن‌ها در کاهش کشش بین سطحی نفت-آب [۳۰، ۳۱] و تسهیل نمودن فرآیند تولید فوم [۳۲-۳۴]، به صورت گسترده در فرآیندهای شیمیایی بهبود بازیابی نفت مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در میدان‌های مختلف بررسی و استفاده شده‌اند [۳۵، ۳۶].

جذب سورفکتانت روی مواد معدنی یکی از موارد بسیار مهم برای فرآیند بهبود بازیابی نفت است [۳۷-۳۹]. بنابراین درک مکانیسم جذب برای یک مخزن هدف بسیار مهم است [۴۰]. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده است که ترکیب سورفکتانت‌ها با یون‌های مختلف، می‌تواند عملکرد آن‌ها را در شرایط مختلف بهبود ببخشد [۴۱].

۳-۲ نانوذرات

نانوذرات در ساختار فوم عموماً به عنوان عامل پایدارکننده استفاده می‌شود.

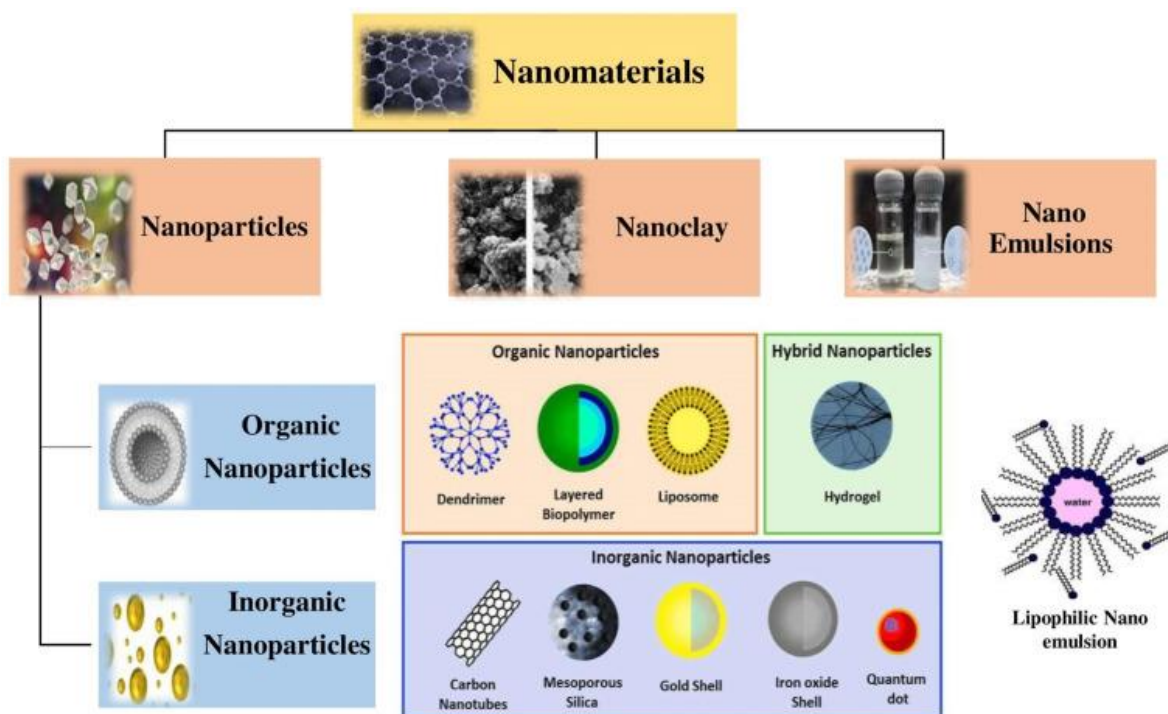
۳-۲-۱ طبقه‌بندی نانومواد

نانومواد ساختاری با اندازه کوچک‌تر از ۱ میکرومتر با ابعاد در مقیاس نانو می‌باشند [۴۲]. نانومواد اشکال مختلفی دارند که شامل کروی، لوله‌ای و نامنظم هستند و می‌توان آن‌ها را به صورت تکی، ذوب‌شده، تجمع یافته یا تجمع یافته یافت. نانومواد بر اساس شکل و ساختار آن‌ها به سه گروه نانوذرات، نانورس‌ها^۱ و نانومولسیون‌ها دسته‌بندی می‌شوند که در شکل ۲-۵ نشان داده شده‌اند. یک نانوذره به عنوان ذرات فوق‌ریز با ابعاد ۱ تا ۱۰۰ نانومتر شناخته می‌شود [۴۳]. نانوذرات بر حسب جنس آن‌ها به دو دسته نانوذرات آلی و معدنی (غیرآلی) طبقه‌بندی می‌شوند. نانوذرات معدنی شامل نانوذرات فلزی و سرامیکی هستند. نانوذرات آلی نانوذرات مبتنی بر کربن، نانوذرات لیپیدی و پلیمری هستند. نانوذرات هم‌چنین به عنوان نانو کریستال، نانو خوشه^۲، نانولوله، آبر مولکول‌ها و غیره طبقه‌بندی می‌شوند. نانورس‌ها نانوذراتی

^۱ Nanoclays

^۲ Nanoclusters

هستند که از لایه‌های سیلیکات معدنی با ضخامت ۱ نانومتر و عرض ۷۰-۱۵۰ نانومتر تشکیل شده‌اند [۴۴]. مونت‌موریلونیت^۱، کائولینیت^۲ و ساپونیت^۳ نمونه‌هایی از نانورس‌ها هستند. نانوامولسیون‌ها سیستم‌های کلوئیدی هستند که در آن‌ها اندازه زیر یک میکرون از ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر متغیر است [۴۲]. نانوامولسیون‌ها به‌صورت نانوامولسیون‌های نفت در آب، نانوامولسیون‌های آب در نفت و نانوامولسیون‌های دوطرفه طبقه‌بندی می‌شوند.



شکل ۲-۵. طبقه‌بندی نانومواد: نانوذرات، نانورس، نانوامولسیون‌ها [۴۲]

۲-۳-۲ ویژگی نانوذرات

محدوده اندازه یک نانوذره بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است [۴۲]. نانوذرات به شکل نانوکامپوزیت‌ها یا نانو ساختارها یافت می‌شوند. همه نانوساختارها عمدتاً از واحدهای ابتدایی با بعد کم (بلوک) تشکیل شده‌اند. آن‌ها ممکن است دارای ابعاد مختلف یعنی صفر، یک، دو و سه بعد باشند که در آن‌ها تأثیر اندازه بر

^۱ Montmorillonite (MMT)

^۲ Kaolinite

^۳ Saponite

ویژگی حاصله قابل مشاهده است که به عنوان نقاط کوانتومی^۱ نیز شناخته می شود. همان طور که در جدول ۱-۲ نشان داده شده است، نانومواد به صفر بعدی (نقاط کوانتومی)، یک بعدی (سیم های کوانتومی)، دوبعدی (فیلم های نازک) و نانوذرات سه بعدی به عنوان بلوک های سازنده برای ساخت مواد نانوساختار تقسیم می شوند [۴۴]. در نانومواد با ابعاد صفر، حرکت الکترون در هر سه جهت متفاوت است؛ در یک بعد الکترون ها فقط می توانند در جهت X حرکت کنند؛ در دو بعد، آن ها فقط می توانند در صفحه X-Y حرکت کنند؛ و در سه بعد می توانند در جهت X، Y و Z حرکت کنند [۴۵].

جدول ۱-۲. مثال هایی از ابعاد مختلف نانوذرات [۴۲].

Elementary units	Examples
Units of 0D (In the monometric range, there are 3 dimensions)	Fullerenes, Clusters, powders, molecules, rings, grains, metal carbides
Units of 1D (In the monometric range, there are 2 dimensions)	Nanotubes, filaments, fibres, whiskers, belts, spirals, columns, springs
Units of 2D (In the monometric range, there are 1 dimension)	Layers

نانوذرات معدنی از رسوب نمک های معدنی که توسط برهم کنش های فلزی و کووالانسی به مولکول ها متصل می شوند، تولید می شوند [۴۶]. نانوذرات آلی خود را در یک ساختار سه بعدی مونتاژ می کنند. برای تهیه نانوذرات آلی از ترکیبات آلی مصنوعی و طبیعی مانند امولسیون شیر، تجمع پروتئینی، اجسام لیپیدی و سایر ساختارهای پیچیده برای ساخت نانوذرات آلی (ویروس ها و غیره) استفاده می شود [۴۷].

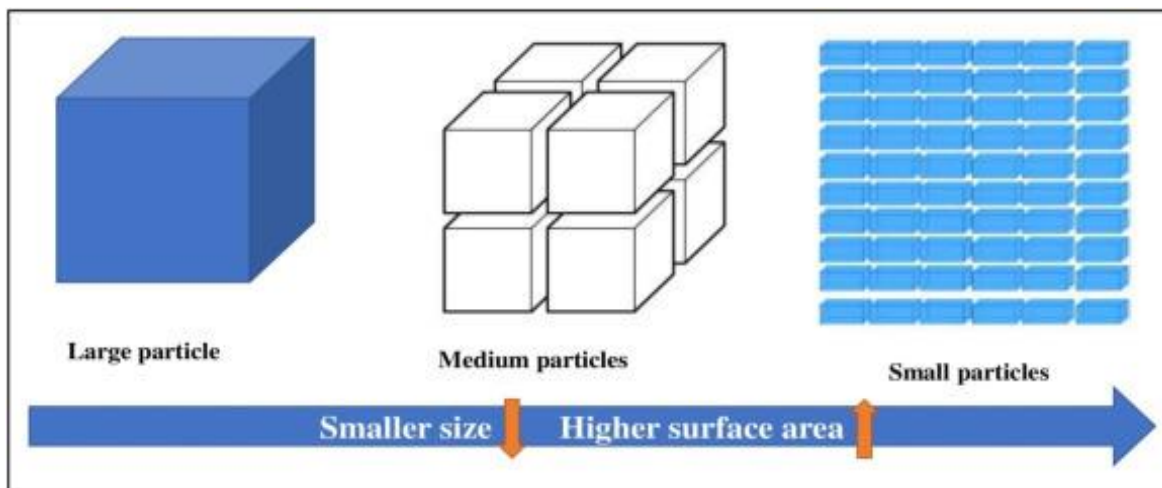
¹ Quantum Dots

۲-۳-۱ ویژگی نانوامولسیون‌ها

نانوامولسیون‌ها سیستم‌های کلوئیدی هستند که در آن‌ها اندازه زیر یک میکرون از ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر متغیر است. پلیمرها، قطرات و مواد جامد در یک مایع چسبناک پراکنده شده و منجر به جذب یک ماده نرم می‌شوند [۴۸]. فاز داخلی که فاز ناپیوسته نیز نامیده می‌شود، فاز پراکنده شده است، درحالی‌که محیط پراکندگی فاز خارجی می‌باشد. واسطه یا فاز داخلی نیز به‌عنوان عامل امولسیون‌کننده شناخته می‌شود. امولسیون‌سازی با انرژی بالا (همگن‌سازی با فشار بالا، التراسونیک، میکروسیال‌ساز) و امولسیون‌سازی کم انرژی (دمای وارونگی فاز، ترکیب وارونگی فاز و جابجایی حلال) دو راه برای ساخت نانوامولسیون‌ها هستند [۴۹].

۲-۳-۲ تعیین مشخصات نانوذرات

تعیین مشخصات یا اندازه‌گیری خواص فیزیکی و شیمیایی نانوذرات، شاخه‌ای از نانومتری‌شناسی است [۵۰]. بنابراین، شناسایی روش‌شناسی‌های تعیین مشخصات مناسب به تحقیق در مورد خواص نانوذرات کمک می‌کند [۵۱]. تعیین مشخصات نانوذرات و نانومواد را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف مانند میکروسکوپ نیروی اتمی، پراکندگی نور دینامیکی، میکروسکوپ الکترونی، طیف‌سنجی FTIR، طیف‌سنجی مادون‌قرمز، پراش اشعه ایکس و طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس انجام داد [۵۲]. مشخصات نانوذرات عبارت‌اند از: مساحت سطح بزرگ، سطوح فعال و پاسخ‌های نوری و شیمیایی منحصربه‌فرد. مواد حاوی نانوذرات دارای مساحت سطح بسیار زیادی هستند که با کاهش قطر ذرات به سرعت افزایش می‌یابند [۵۰]. انرژی سطحی با افزایش نسبت ذرات روی سطح ماده با مساحت مواد افزایش می‌یابد، همان‌طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. علاوه بر این، در دماها و فشارهای زیاد، این نسبت بسیار زیاد سطح به حجم، به‌عنوان یک نیروی محرک برای انتشار عمل می‌کند [۵۳].



شکل ۲-۶. نانوذرات با نسبت مساحت سطح به حجم زیاد [۵۳]

۳-۳-۲ کاربرد نانوذرات در بهبود بازیابی نفت

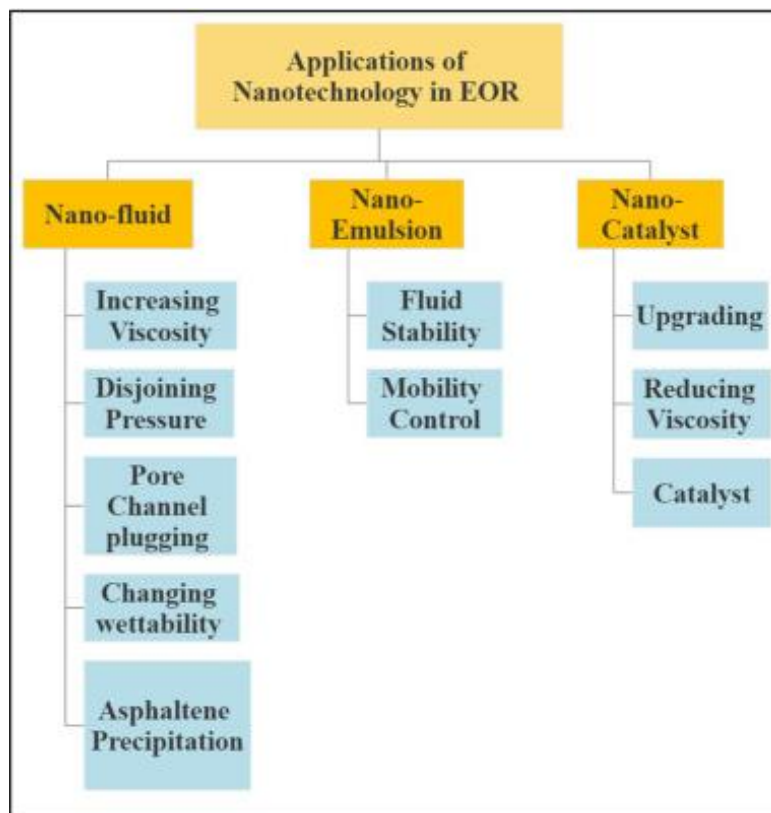
صنعت بالادستی نفت و گاز از پیشرفتهایی که در زمینه نانو فناوری بدست می‌آید، سود زیادی می‌برد [۵۴]. یکی از مهم‌ترین بخش‌های کاربرد نانوذرات در صنعت نفت و گاز، EOR است که مقادیر بیشتری از نفت را در طول استخراج تولید می‌کند و بنابراین بازگشت سریع‌تر سرمایه‌گذاری را تضمین می‌کند [۵۵]. فرآیندهایی که در مقیاس نانو به EOR مربوط هستند شامل ترشوندگی^۱، تجمع^۲، پدیده‌های گذار و اثرات انتقال جرم است [۵۶، ۵۷]. بنابراین درک پراکندگی فاز نفتی در این مقیاس برای استفاده از پدیده نانوذرات در فرایند EOR ضروری است [۵۸].

نانوتکنولوژی در طیف وسیعی از روش‌ها در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است که شامل عملیات حفاری، اطمینان از جریان، سیمان‌سازی، شکست هیدرولیکی و EOR می‌باشند. نانوذرات مهندسی شده با سیالات تزریق شده به مخزن برای بهبود تولید نفت در فرایند EOR ترکیب می‌شوند [۵۹]. بنابراین کاربرد نانوذرات در روش‌های مختلف EOR، چالش‌های زیادی را برای مکانیسم‌های مختلف به همراه دارد. نانوذرات به دلیل ویژگی‌ها و رفتار انتقالی

^۱ Wettability

^۲ Coalescence

بسیار جذاب هستند که این ویژگی‌ها بسیار مورد علاقه EOR است [۶۰]. در نتیجه نانوفناوری راه حل احتمالی بسیاری از مسائل مربوط به صنعت نفت و گاز است.



شکل ۲-۷. کاربرد نانوفناوری در EOR [۶۱]

۲-۳-۱ نانوذرات در سیلاب‌زنی شیمیایی

سیلاب‌زنی شیمیایی یک روش بازیابی نفت است که با افزودن مواد شیمیایی مختلف به آب تزریقی انجام می‌شود. روش‌های شیمیایی EOR عبارت‌اند از سیلاب‌زنی پلیمر، قلیایی، سورفکتانت، فوم و ترکیبی (قلیایی/سورفکتانت/پلیمر). بهبود بازیابی نفت شیمیایی به دلیل افزایش کارایی، فناوری، قابلیت اقتصادی و هزینه پایین روش امیدوارکننده‌ای است [۶۲].

۲-۳-۳-۲ نانوسیالات سورفکتانت

نانوسیال سورفکتانت که نانوذرات و سورفکتانت‌ها را ترکیب می‌کند، با کاهش کشش بین سطحی^۱ و تغییر ترشوندگی، کارایی جابجایی میکروسکوپی را بهبود می‌بخشد [۶۳]. در مخزن، این نانوسیال ممکن است برای ایجاد فوم‌های پایدار و امولسیون استفاده شود [۶۴]. امولسیون‌ها کارایی تزریق را تضمین می‌کنند، درحالی‌که فوم‌های پایدار اجازه می‌دهند سیال در سراسر مخزن از مناطق با نفوذپذیری بالا به مناطق با نفوذپذیری کم منحرف شود [۶۵، ۶۶]. کشش بین سطحی و قابلیت ترشوندگی در مخزن، معیارهای کلیدی هستند که هنگام ارزیابی توزیع و جریان آن‌ها باید در نظر گرفته شود [۶۷]. پس از بازیابی مرحله دوم نفت، بخشی از نفت در اثر نیروهای موئینگی^۲ در مخزن به دام می‌افتد. بنابراین یکی دیگر از معیارهای مهم در فرآیند ازدیاد برداشت نفت عدد موئینگی می‌باشد [۶۸].

۲-۳-۳-۱ عدد موئینگی

عدد موئینگی یک عدد بدون بعد است که نشان‌دهنده نیروی موئینگی است که در رابطه ۲-۲ دیده می‌شود [۶۹]:

$$Nc = \mu * V / \sigma * \cos \theta \quad (2-2)$$

که در آن Nc عدد موئینگی است، μ ویسکوزیته سیال جابجایی (پاسکال-ثانیه)، V سرعت جابجایی داری (متر/ثانیه)، θ زاویه تماس و σ کشش بین سطحی بین سیال جابجایی و سیال جابجا شده (آب و نفت) است.

بازیابی نفت و اشباع نفت باقی‌مانده مربوط به Nc است. Nc با کاهش اشباع نفت باقی‌مانده، افزایش می‌یابد. در نتیجه، Nc بزرگ‌تر منجر به افزایش نرخ بازیابی نفت می‌شود.

¹ Interfacial Tention (IFT)

² Capillary Forces

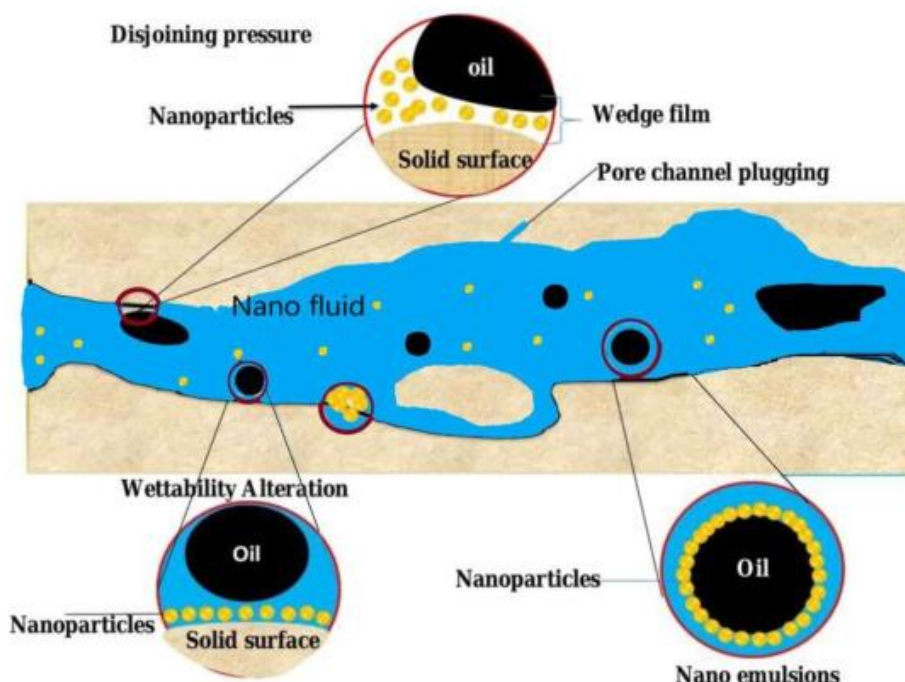
۲-۳-۲-۲ کاهش کشش بین سطحی

لیو^۱ و همکاران [۷۰] با استفاده از کشش سنج قطره آویزان، تأثیر سورفکتانت آنیونی و نانوذرات سیلیکا را برای کاهش IFT در رابط نفت-آب بررسی کردند تا عملکرد نانوسیال سورفکتانت را اندازه‌گیری کند. نانوسیال سورفکتانت باعث کاهش چهار برابری IFT در غلظت کلی ۱۰۰۰ Ppm و نسبت سورفکتانت به سیلیکا ۸:۲ شد. بنابراین، توصیه می‌شود که در شرایط دمای بالا و شوری زیاد، نانوسیال سورفکتانت برای روش‌های EOR استفاده شود [۷۱، ۷۲].

شکل ۲-۸ مکانیسم‌های تعامل سورفکتانت و نانوذرات را در محیط متخلخل نشان می‌دهد. نانوذرات بسیار مؤثر هستند و با تقویت مکانیسم حاکم، عملکرد سورفکتانت‌ها را افزایش می‌دهند. علاوه بر این، تحقیقات در مورد سیلاب‌زنی نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات به محلول سورفکتانت، بازیابی نفت را افزایش می‌دهد [۷۳]. مکانیسم‌های نانوسورفکتانت برای کاهش IFT در رابط آب-نفت مورد بررسی قرار گرفته است. تحقیقات نشان می‌دهد که این ترکیب باعث جذب سورفکتانت روی سطح نانوذرات می‌شود و در نتیجه سطح نانوذرات، آگریز می‌شود [۷۴]. مولکول‌های سورفکتانت از طریق حرکت براونی^۲ نانوذرات از توده سیال به رابط منتقل می‌شوند [۷۵]. نانوسورفکتانت با به حداقل رساندن انرژی بین سطحی در رابط، IFT را کاهش می‌دهد [۷۶]. سورفکتانت‌های مرسوم پس از مدتی از رابط خارج می‌شوند. نانوذرات مانع از دفع مولکول‌های سورفکتانت از رابط می‌شوند و در نتیجه کاهش IFT را بهبود می‌بخشند [۷۵].

¹ Liu

² Brownian Motion



شکل ۲-۸. سورفکتانت‌ها و نانوذرات در محیط متخلخل [۷۷]

۲-۳-۳-۳-۲ تغییر ترشوندگی

نانوسورفکتانت باعث کاهش کشش بین سطحی در تماس سنگ/نفت/آب‌نمک می‌شود و در نتیجه باعث افزایش تغییر ترشوندگی می‌شود [۷۸]. وقتی نفت و آب با نانوسیال سورفکتانت تعامل می‌کنند، منحنی‌های نفوذپذیری نسبی آن‌ها تغییر می‌کند. علاوه بر این، استفاده از نانو سورفکتانت‌ها به عنوان اصلاح‌کننده‌های تغییر ترشوندگی نشان می‌دهد که مقدار نفت بازیابی شده از مخازن کربناته افزایش می‌یابد که بازیابی کم نفت به دلیل شکاف‌های طبیعی ذاتی و آگریزی است [۷۹]. در نتیجه، نشان می‌دهد که آشام^۱ آب به درون ماتریس سنگ به دلیل اثرات فشار موئینگی چالش‌برانگیز است. نودی^۲ و همکاران [۸۰] غلظت نانوسورفکتانت را روی سنگ آهک نفت‌دوست در محدوده دمای ۰ تا ۷۰ درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. نانوذرات مورد استفاده ZrO_2 و NiO با سورفکتانت Triton X-100 و CTAB در فرمولاسیون بودند. ZrO_2/CTAB و NiO/CTAB به دلیل تماس الکترواستاتیک قوی، تمایل

¹ Imbibition

² Nwidee

قوی‌تری نسبت به جذب روی سطح سنگ دارند و بازده تغییرات ترشوندگی را در همه شرایط دمایی بهبود بخشیده‌اند.

۲-۳-۳-۴ کاهش جذب

از بین رفتن مولکول‌های سورفکتانت، به دلیل جذب روی سنگ سازند زیر سطحی در طی فاز سیلاب‌زنی است. این یکی از مشکلات اساسی در روش بهبود بازیابی نفت با سورفکتانت است [۷۵, ۷۶, ۸۱]. به دلیل جذب سطحی، فرآیند شیمیایی EOR ممکن است از نظر تجاری غیرقابل اجرا باشد. در نتیجه، کاهش جذب سورفکتانت بازیابی نفت را بهبود می‌بخشد [۸۲]. یکین^۱ و همکاران [۸۳]، گزارش دادند که افزودن نانوذرات مانند SiO_2 و Al_2O_3 از جذب سورفکتانت کاتولینیت جلوگیری می‌کند. با استفاده از نانوذرات Al_2O_3 ، جذب SDS روی کاتولینیت ۳۸ درصد کاهش می‌یابد. با استفاده از نانوذرات SiO_2 ، جذب SDS تا ۷۵ درصد کاهش می‌یابد [۸۴].

۲-۳-۴ نقاط کوانتومی

در سال ۱۹۷۰ مطالعه روی نقاط کوانتومی آغاز شد و ساخت این نانوذرات در سال ۱۹۸۰ توسط محققى به نام الکسی اکیمو به وسیله ماتریس و توسط لوئیس بروس در محلول کلونیدی انجام شد. با وجود کشف این نقاط کوانتومی، استفاده و کاربرد این ذرات از سال ۲۰۰۲ آغاز شد [۸۵, ۸۶].

۲-۳-۴-۱ مفهوم نقاط کوانتومی

با کاهش پیوسته ابعاد یک ماده به مقیاس کوچک، در ابتدا خواص ماده ثابت است؛ اما با رسیدن به مقیاس نانو (۱ تا ۱۰۰ نانومتر)، تغییرات چشمگیری در خواص ماده اتفاق می‌افتد. همه‌ی مواد دارای

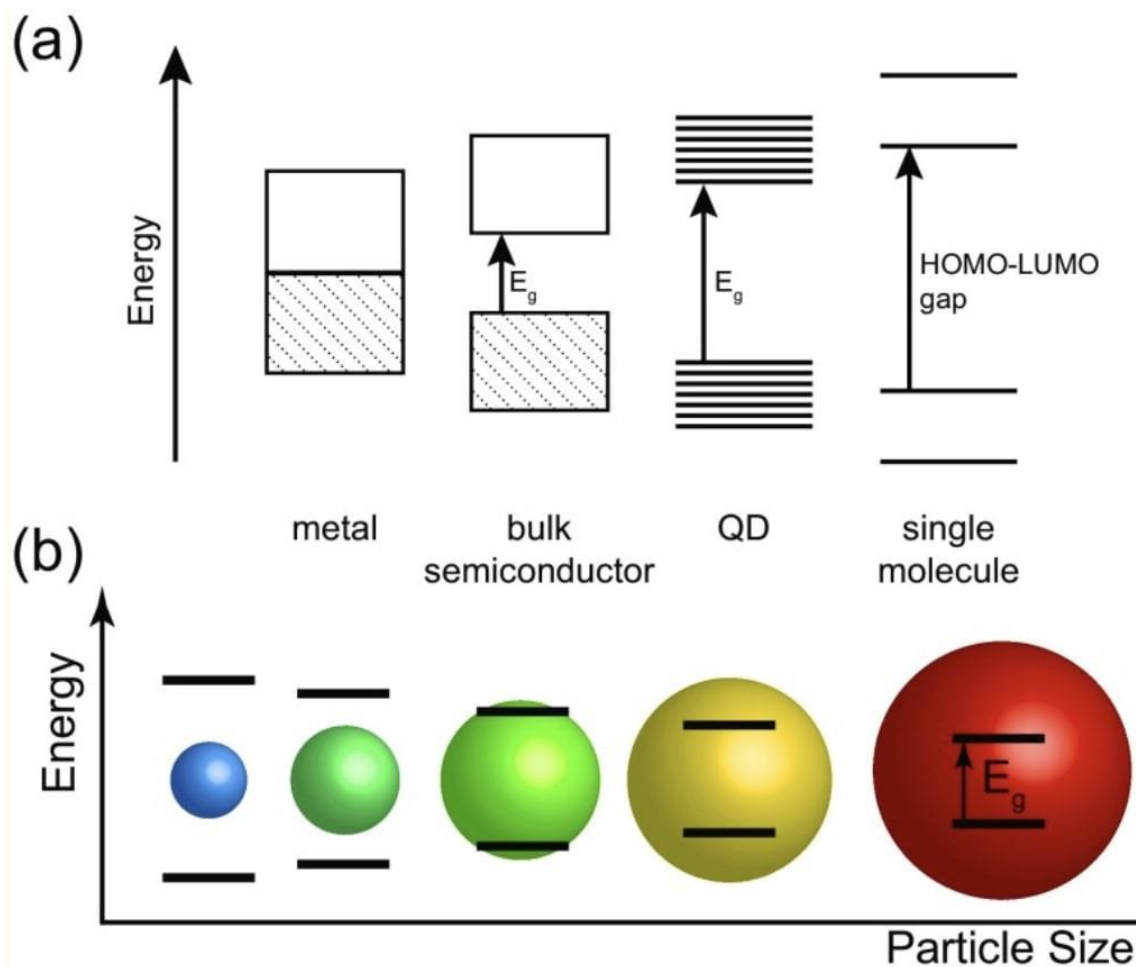
¹ Yekeen

سه بعد هستند و زمانی که فقط یک بعد ماده به محدوده نانو برسد ساختار ماده را چاه کوانتومی می‌نامند. به همین ترتیب اگر دو بعد از ماده در مقیاس نانو باشد، ساختار آن را سیم کوانتومی و اگر هر سه بعد در مقیاس نانو باشند، آن را نقطه کوانتومی می‌نامند. این نکته حائز اهمیت است که تنها دارا بودن ابعاد با اندازه‌ی نانو نمی‌تواند موجب کوانتومی شدن مواد بشود؛ بلکه باید ابعاد آن‌ها به اندازه‌ای کوچک شوند که دیگر نتوان خواص ماده را به وسیله‌ی فیزیک کلاسیک توجیه کرد و ماده مطابق قوانین فیزیک کوانتوم رفتار کند [۸۵].

۲-۳-۴-۲ تعریف نقاط کوانتومی

نقاط کوانتومی، نانو کریستال‌های نیمه هادی با قطر ۲ تا ۱۰ نانومتر هستند و تعداد اتم‌های تشکیل دهنده آن‌ها بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰۰ است. این ذرات به دلیل دارا بودن ابعاد بسیار کوچک، قابلیت انطباق بالایی دارند و می‌توان مطابق با نیاز مورد نظر، ساختار آن‌ها را تغییر داد. از مورد توجه‌ترین خواص نقاط کوانتومی، خواص نوری است که برای کاربردهای تشخیصی و ردیابی آن‌ها را متمایز می‌کند. همچنین تفاوت اصلی آن‌ها با سایر نیمه هادی‌ها، وابستگی شدید طول موج نور ساطع شده از نقاط کوانتومی به اندازه، شکل و ساختار آن‌ها است [۸۵].

وابستگی طول موج نور ساطع شده از نقاط کوانتومی به ابعاد آن، بدان معنا است که هرچقدر ابعاد نقاط کوانتومی کوچک‌تر باشد، نور آن‌ها دارای انرژی بیشتر و به رنگ آبی متمایل است و هرچقدر ابعاد نقاط کوانتومی بزرگ‌تر باشد، نوری با انرژی کمتر و به رنگ قرمز از خود ساطع می‌کنند [۸۶]. شماتیکی از نوار انرژی در مواد مختلف و همچنین وابستگی انتشار طول موج نقاط کوانتومی به اندازه آن‌ها در شکل ۲-۹ آورده شده است.



شکل ۲-۹. طرح شماتیک: الف) نوار انرژی مواد مختلف، ب) طول موج انتشار نقاط کوانتومی [۸۷]

۳-۴-۳-۲ روش‌های ساخت نقاط کوانتومی

ساخت نقاط کوانتومی از دو طریق بالا به پایین و پایین به بالا انجام می‌شود. روش‌های پایین به بالا، امکان تولید انبوه و ارزان نقاط کوانتومی را فراهم می‌کند و مزیت استفاده از روش‌های بالا به پایین، امکان کنترل بیشتر محل این نانوذرات و قرارگیری آن‌ها می‌باشد. یکی از روش‌های ساخت پایین به بالا، روش سنتز کلوئیدی است. به‌طور کلی روش‌های سنتز نقاط کوانتومی شامل سنتز کلوئیدی، فراوری، خودآرایی ویروسی و خودآرایی الکتروشیمیایی می‌باشد [۸۸، ۸۹].

۲-۴ مروری بر مطالعات پیشین

نانوذرات بر اساس اندازه، مورفولوژی (ریخت‌شناسی)، خواص فیزیکی و شیمیایی طبقه‌بندی می‌شوند. برخی از آن‌ها نانوذرات مبتنی بر کربن، نانوذرات فلزی، مبتنی بر چربی، سرامیکی، پلیمری و نیمه هادی هستند. مکانیسم بازیابی نانوذرات مختلف یک ابزار ضروری در افزایش تولید نفت در فرآیند EOR است [۹۰]. این مطالعه تحقیقاتی نشان می‌دهد که استفاده از انواع مختلف نانوذرات بازیابی نفت را بهبود می‌بخشد. نانوذرات مبتنی بر کربن مانند نانولوله‌های کربنی و گرافن و نانوذرات مبتنی بر چربی مانند حامل‌های چربی نانوساختار به کاهش IFT و بهبود بازیابی نفت کمک می‌کنند. مطالعات تحقیقاتی روی نانوذرات فلزی مانند SiO_2 ، TiO_2 و غیره در برنامه‌های EOR امیدوارکننده است [۹۱-۹۳]. این نانوذرات IFT و ویسکوزیته نفت را کاهش می‌دهند، قابلیت ترشوندگی را تغییر می‌دهند، به عنوان یک پایدارکننده امولسیون نفت - آب عمل می‌کنند و عوامل بازیابی بالایی را تولید می‌کنند. نانوذرات سرامیکی، نانوذرات اکسید فلزی مانند اکسید روی (ZnO)، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید منیزیم (MgO) و اکسید مس (CuO) و غیره هستند که به کاهش ویسکوزیته نفت و کشش بین سطحی کمک می‌کنند. نانوذرات مبتنی بر پلیمر به کاهش IFT، تغییر ترشوندگی و کنترل نسبت تحرک‌پذیری کمک می‌کنند. نانوذرات نیمه‌هادی به کاهش IFT کمک می‌کنند و قابلیت ترشوندگی را تغییر می‌دهند. بنابراین، هر نانوذره نقش مهمی در افزایش تولید نفت ایفا می‌کند؛ اما طبق مطالعات، SiO_2 و TiO_2 پرکاربردترین نانوذرات در صنعت نفت و گاز هستند [۴۲، ۹۴، ۹۵].

نانوذرات به عنوان ابزاری برای پایداری فوم‌های مورد استفاده در عملیات تولید نفت، از جمله در محیط‌های با شوری بالا و دمای بالا، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این رفتار به دلیل جذب نانوذرات به رابط بین فازهای گاز و مایع است و سطح تماس بین آن‌ها را به حداقل می‌رساند؛ در نتیجه، آن‌ها می‌توانند یک مانع قوی ایجاد کنند که از تجمع حباب جلوگیری می‌کند. از این رو، انتظار می‌رود که

فوم‌های پایدار شده با نانوذرات بادوام و در برابر شرایط نامساعد مخزن از جمله شوری زیاد، دمای بالا و وجود نفت خام مقاوم باشند [۹۶، ۲۲].

فردریکسن^۱ و همکاران [۹۷]، از پیش‌سیلاب‌زنی سورفکتانت قبل از تزریق فوم کربن دی اکسید برای بهبود بازیابی نفت در مخازن کربناته شکافدار استفاده کردند. اثر این پیش‌سیلاب‌زنی شامل تغییر ترشوندگی به سمت شرایط خنثی/ضعیف - آب‌دوست، کاهش کشش بین سطحی و فشار آستانه موئینگی برای تولید فوم است. آن‌ها با این کار توانستند میزان بازیابی نفت را ۴ تا ۱۱ درصد بهتر از حالت تزریق فوم بدون پیش‌سیلاب‌زنی افزایش دهند که نتیجه مثبت این فرآیند را نشان می‌دهد.

هاهن^۲ و همکاران [۹۸]، از روش فوم با کشش کم برای بررسی عملکرد فوم در بهبود بازیابی نفت استفاده کردند. آن‌ها یک سورفکتانت پایه را برای مقایسه و ارزیابی فرمولاسیون با کشش کم در نظر گرفتند، سپس با آزمون‌های رفتار فازی نسبت حلالیت نفت در هر فرمولاسیون را تعیین کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که بازیابی نفت باقی‌مانده توسط فرمولاسیون فوم با سورفکتانت پایه ۴۰ درصد و با فرمولاسیون با کشش کم بیش از ۷۰ درصد است. همچنین فرمولاسیون فوم با کشش کم این قابلیت را دارد که از مناطق با نفوذپذیری بالا به مناطق با نفوذپذیری کم منحرف شود.

ایده^۳ و همکاران [۹۹]، فوم کربن دی اکسید پایدار شده با نانوذرات سیلیکا را در مخازن کربناته در شرایط سخت دمای بالا و شوری زیاد بررسی کردند. آن‌ها از آزمون‌هایی که برای بررسی تأثیر تغییر pH، دمای بالا (۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) و شوری بالا بر پایداری نانوذرات با غلظت ۱۵۰۰ Ppm و فوم حاصل از آن‌ها انجام دادند، نتیجه گرفتند که محلول نانوذرات پایداری زیادی حتی در حضور شوری بالای ۲۳ درصد وزنی سدیم کلرید^۴ در pH کم دارد. همچنین، پایداری آن با افزایش دما کاهش و با کاهش pH افزایش یافت. علاوه بر این، آن‌ها دریافتند که ویسکوزیته ظاهری فوم نانوذره در مقایسه با

¹ Fredriksen

² Hahn

³ Eide

⁴ NaCl

تزریق هم‌زمان گاز کربن دی اکسید و آب بالاتر است.

گلند^۱ و همکاران [۱۰۰]، فرمولاسیون کاتیونی مناسب فرآیند تولید فوم در مخازن کربناته را توسعه دادند. طراحی این فرمولاسیون توسط روش غربالگری توان بالا انجام شد که محلول موردنظر در دمای بالا (۸۰ درجه سانتی‌گراد)، شوری زیاد (۱۶۰ گرم در لیتر) و سختی بالا بتواند زمان نیمه‌عمر را افزایش دهد. نتایج نشان داد که این فرمولاسیون جذب سورفکتانت را روی سطح کربناته کاهش داده است و نیمه‌عمر را به بیش از ۲۴ ساعت رسانده است. نتایج ویسکوزیته ظاهری نیز مطلوب گزارش شدند.

قوش^۲ و همکاران [۱۰۱]، کاربرد جدید سورفکتانت‌های کاتیونی و چندین ترکیب از سورفکتانت غیریونی و زوئیترونیک را در تغییر ترشوندگی فوم‌های حاصل از آن‌ها در سنگ‌های کربناته با نفوذپذیری کم و نفت‌دوست بررسی کردند. سورفکتانت‌های کاتیونی GC850 قادر است تا ترشوندگی را از حالت نفت‌دوست به حالت آب‌دوست تبدیل کند. همچنین از دیگر نتایج استفاده از این سورفکتانت کاتیونی، تشکیل فوم قوی است. نتایج آزمون‌های استاتیک نشان داد که افزودن سورفکتانت زوئیترونیک به GC850 باعث افزایش پایداری فوم حاصل از آن‌ها شده است. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سیلاب‌زنی فوم در مرحله سوم، میزان بازیابی را تقریباً ۲۵ درصد تا ۵۲ درصد نفت باقی‌مانده در محل بیشتر از سیلاب‌زنی گاز افزایش می‌دهد.

امرانی^۳ و همکاران [۱۰۲]، تحرک‌پذیری فوم کربن دی اکسید را با نانوذرات به‌عنوان عوامل پایدارکننده فوم بررسی کرده‌اند. در این مطالعه آن‌ها تأثیر نانوذرات سیلیکا (۱۴۰ نانومتر) را روی پایداری فوم آلفا اولفین سولفونات ارزیابی کردند و فاکتور کاهش تحرک‌پذیری را بررسی کردند که نشان‌دهنده ویسکوزیته ظاهری سیالات در دمای بالا و شوری بالا است. آزمون‌های پایداری فوم در دستگاه محفظه دید فشار بالا در دماهای ۷۷ و ۱۵۰ درجه فارنهایت انجام شدند. همچنین برای سیلاب‌زنی فوم روی مغزه ماسه‌سنگ در هر دو دما فوم با کیفیت ۸۰ درصد تزریق کردند. افت فشار در

¹ Gland

² Ghosh

³ Emrani

سراسر مغزه برای تخمین فاکتور کاهش تحرک پذیری اندازه گیری شد. نتایج کار آن ها نشان داد که با افزایش دما، نیمه عمر فوم کاهش می یابد. همچنین افزایش پایداری فوم با نانوذرات نسبت به سورفکتانت تنها به دست آمد. سورفکتانت AOS در مقایسه با آب نمک تنها، فاکتور کاهش تحرک پذیری را ۳۰۰ درصد بهبود بخشید؛ درحالی که افزودن نانوذرات سیلیکا علاوه بر بهبود پایداری فوم، فاکتور کاهش تحرک پذیری را نیز ۸ برابر افزایش داد. در دمای ۲۵۰ درجه فارنهایت، پایداری محلول AOS همچنان حفظ شد؛ درحالی که فاکتور کاهش تحرک پذیری به ۲۸ برابر در مقایسه با فوم در دمای محیط رسید. خواجه پور و همکاران [۲۲]، پایداری فوم نیتروژن - بخار را به واسطه ی نانوذرات سیلیکای اصلاح شده سطحی مورد بررسی قرار دادند. آن ها همچنین تحلیل های پایداری حرارتی برای اندازه گیری توزیع اندازه نانوذرات در آب نمک، قابلیت فوم کنندگی و پایداری حرارتی محلول های افزودنی را انجام دادند. سپس آزمون های سیلاب زنی فوم را برای ارزیابی اثر همکاری نانوذرات و سورفکتانت روی کیفیت فوم و بازیابی نفت انجام دادند. بر اساس حداکثر ارتفاع فوم، به نرخ بهینه ای از نانوذرات و سورفکتانت رسیدند. علاوه بر این، با توجه به اثر همکاری بین نانوذرات در غلظت بهینه ۰/۱ درصد وزنی و محلول سورفکتانت ۰/۵ درصد وزنی در pH خنثی (تقریباً ۷)، بهبود ارتفاع فوم به میزان ۶۷٪ و ۵۰٪ برای سورفکتانت های A و B مشاهده شد. همچنین، میزان فاکتور کاهش تحرک پذیری و کنترل بخار را به طور قابل توجهی در مقایسه با تزریق هم زمان بخار و آب های حاوی سورفکتانت تنها بهبود داد.

امرانی و همکاران [۱۰۳]، پایداری سازی فوم کربن دی اکسید را با استفاده از نانوذرات سیلیکا بررسی کردند. در ابتدا با تعیین غلظت CMC محلول سورفکتانت AOS در تماس با گاز کربن دی اکسید، به غلظت بهینه برای سورفکتانت رسیدند. همچنین اثر پارامترهای دما، فشار، شوری و غلظت سورفکتانت را روی کشش سطحی و مقدار غلظت CMC ارزیابی کردند. برای این آزمون ها، محدوده دما از ۷۷ درجه تا ۳۲۰ درجه فارنهایت، فشار از اتمسفر تا ۴۳۵ psi و محدوده غلظت شوری از ۱ تا ۱۰ درصد وزنی NaCl و همچنین غلظت سورفکتانت از ۰/۰۰۵ تا ۱ درصد وزنی بود. نتایج نشان داد که مقدار CMC با افزایش دما افزایش یافت و با افزایش غلظت نمک کاهش یافت. همچنین از نتیجه آزمون ها مشاهده

کردند که افزایش فشار تأثیری روی CMC نداشت و نانوذرات باعث کاهش مقدار CMC شدند.

سینگ^۱ و همکاران [۱۰۴]، پایداری فوم نیتروژن را با استفاده از مخلوط نانوذرات و سورفکتانت مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در این کار از نانوذرات سیلیکا آب‌دوست و سورفکتانت‌های آنیونی AS-40 و AOS استفاده کردند. فوم‌ها در حضور و عدم حضور نفت تولید شدند و نیمه‌عمر آن‌ها محاسبه و ریزش ارتفاع فوم با زمان مطالعه شد. رفتار تخلیه فوم و ضخامت لاملا فوم ارزیابی شد. افت فشار در سراسر مغزه برای تعیین فاکتور کاهش تحرک‌پذیری اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل نشان داد که حضور نانوذرات حتی در غلظت‌های کم (۰/۳ درصد وزنی) می‌تواند تأثیر بسزایی در پایداری و کاهش تحرک‌پذیری فوم‌ها بگذارد. بازیابی نفت توسط این فوم‌ها، ۱۰ درصد OOIP بالاتر از سیلاب‌زنی آب بود.

سینگ و همکاران [۱۰۵]، فوم‌های نیتروژن پایدار شده با نانوذرات فعال‌شده سطحی را در محیط انباشته و متخلخل بررسی کردند. آن‌ها در کار خود از دو سورفکتانت آنیونی AS-40 و AOS و یک سورفکتانت غیر یونی استفاده کردند. همچنین نانوذرات مورد بررسی آن‌ها سیلیکا پوشیده شده با آلومینا بود. نتایج نشان داد که با اصلاح سطحی نانوذرات حتی در غلظت‌های بسیار کم (۰/۰۵ درصد وزنی) نسبت به نانوذرات آب‌دوست تنها، که نمی‌تواند فوم پایدار تولید کند، فوم بسیار قوی و مستحکمی ایجاد می‌کند. همچنین بافت حباب‌های تشکیل شده در این حالت نازک‌تر از حباب‌های فوم سورفکتانت به‌تنهایی بود که نشان‌دهنده فوم قوی‌تر است. هرچه درجه پوشش سطحی افزایش یافت، میزان فاکتور کاهش تحرک‌پذیری نیز افزایش یافت. میزان بازیابی فوم حاصل از نانوذرات پوشش داده شده سطحی بسیار بیشتر از سیلاب‌زنی آب بود.

امرانی و نصرالدین [۱۰۶]، در کار خود از دو نوع نانوذره SiO_2 (در دو اندازه ۱۰۰ و ۱۴۰ نانومتر) و Fe_2O_3 (با اندازه کمتر از ۵۰ نانومتر) استفاده کردند. آن‌ها پایداری فوم را در حضور نانوذرات ارزیابی کردند، همچنین فشار از ۸۰۰-۳۰۰ psi، دما از ۲۴ تا ۸۲ درجه سانتی‌گراد و غلظت NaCl از ۱ تا ۵ درصد وزنی متغیر بود. در کار آن‌ها، نانوذرات نیمه‌عمر فوم را در شرایط ملایم‌تری مانند دمای ۲۴ درجه

¹ Singh

سانتی‌گراد، غلظت NaCl ۱ درصد وزنی یا فشار ۳۰۰-۴۰۰ psi بهبود بخشیدند.

امرانی و همکاران [۱۰۷]، کار دیگری را با استفاده از نانوذره سیلیکا (۱۴۰ نانومتر) انجام دادند که برای اهداف EOR نبود بلکه برای استفاده در شکست هیدرولیک برای بهبود کنترل تحرک‌پذیری سیال شکستگی بود. در این حالت، عملکرد کربن دی‌اکسید پایدار شده با نانوذرات تحت شرایط ۵ درصد وزنی NaCl و دمای ۲۵ و ۱۲۱ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. در نتیجه، پایداری فوم با افزودن نانوذره حتی در دمای بالا بهبود یافت.

چهار نوع نانوذره SiO_2 آب‌دوست/آبگریز (۷ تا ۱۲ نانومتر)، ZnO (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) و TiO_2 (کمتر از ۲۵ نانومتر) توسط رضالی^۱ و همکاران [۱۰۸] برای مقایسه نیمه‌عمر فوم نیتروژن در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد ارزیابی شدند. در نتیجه، سه نوع نانوذره (دو نوع SiO_2 و TiO_2) افزایش نیمه‌عمر فوم را در مقایسه با فوم سورفکتانت تنها نشان دادند. این افزایش در نوع آب‌دوست از SiO_2 قابل‌توجه بود. آن‌ها مکانیسمی را برای اتصال مولکول‌های سورفکتانت روی سطح نانوذرات SiO_2 برای افزایش پایداری فوم ارائه دادند. رابط بین SiO_2 و سورفکتانت یک لایه استریک در ساختار لاملا تشکیل می‌دهد که می‌تواند از جمع شدن یا انبساط فوم جلوگیری کند.

در مطالعه ابراهیم^۲ و همکاران [۱۰۹]، از هر دو نانوذره SiO_2 و سورفکتانت ویسکوالاستیک برای پایداری فوم کربن دی‌اکسید استفاده شد. پایداری فوم از طریق آزمایش سیلاب‌زنی مغزه در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و غلظت NaCl ۵ درصد وزنی مورد بررسی قرار گرفت. افزودن نانوذرات باعث افزایش ۶/۵ درصد ضریب بازیابی از زمان شروع تزریق فوم کربن دی‌اکسید شد. علاوه بر این، افزودن نانوذرات و سورفکتانت ویسکوالاستیک، افزایش ۷/۷ درصد بیشتری را نسبت به نانوذرات نشان دادند (۱۴/۲ درصد افزایش از حالت پایه).

¹ Razali

² Ibrahim

یک مدل جریان فوم تقویت شده با پلیمر مبتنی بر خواص فیزیکی توسط لو^۱ و همکاران [۱۱۰]، ایجاد شد. آن‌ها در کار خود مشاهده کردند که افزودنی پلیمری با افزایش ویسکوزیته در فاز آبی و فشار جداسازی، پایداری فوم را بهبود می‌بخشد. پلیمرهای با اندازه کوچک موجود در فیلم فوم می‌توانند پایداری فوم را تقویت کنند زیرا اتصال بین برخی سرهای آبگریز از پلیمرها و مولکول‌های سورفکتانت می‌تواند خاصیت ارتجاعی سطح را افزایش دهد.

روگنمو^۲ و همکاران [۱۱۱]، از محلول نانوذرات SiO_2 کلئیدی اصلاح شده با سیلان (۲۳ نانومتر) برای اهداف فوم‌سازی کربن دی اکسید استفاده کردند. نانوسیال‌ها از طریق آزمون‌های پایداری استاتیک تا ۲۵ درصد وزنی TDS در حضور یون‌های تک ظرفیتی و دوظرفیتی و تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد پایدار مشاهده شدند. این نانوسیالات در مقایسه با سورفکتانت در آزمون‌های سیلاب‌زنی مغزه با استفاده از مغزه‌های ماسه‌سنگ بنتمایر همگن و آب‌دوست (۳-۱ داریسی، تخلخل ۲۵-۲۰ درصد)، میزان ماندگاری کمتری را نشان دادند.

نظری و همکاران [۱۱۲]، روی نانوذرات پیچیده پلی الکترولیت^۳ تمرکز کردند. آن‌ها پلیمرها و نوعی نمک را مخلوط کردند. پایداری مخلوط در آب‌نمک تا شوری با غلظت ۲۰۰۰۰۰ Ppm تأیید شد. سیلاب‌زنی مغزه با استفاده از فوم کربن دی اکسید، بیشترین افت فشار را در دو غلظت مختلف آب‌نمک ۳۴۰۰۰ Ppm و ۶۷۰۰۰ Ppm در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد نشان داد.

مفهوم فوم کربن دی اکسید بهبود یافته با پلیمر نیز توسط احمد و همکاران [۱۱۳]، استفاده شد. آن‌ها از یک پلیمر معمولی از پلی اکریل آمید هیدرولیز شده و پلیمر انجمنی استفاده کردند. این ترکیب با پلیمر انجمنی، افزایش ویسکوزیته قابل توجهی را نشان داد. غربالگری آن‌ها با فرض یک نفت خام سبک، شوری ۳ درصد وزنی NaCl و دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. بیشترین حالت نیمه‌عمر فوم بهبود یافته با پلیمر، دو برابر مورد بدون پلیمر است.

¹ Luo

² Rognmo

³ Polyelectrolyte

یک تلاش تحقیقاتی توسط دیکسون^۱ و همکاران [۱۱۴]، ورسن^۲ و همکاران [۱۱۵-۱۱۷] و سینگ و موهانتی [۱۰۵] برای ایجاد پوشش‌های مناسب سطحی برای نانوذرات سیلیکا که باعث ایجاد پایداری در فوم‌های کربن دی اکسید - آب در شرایط مختلف شوری، سختی و دما می‌شوند، انجام شدند. به منظور آزمایش اثربخشی این نوع فوم‌ها در طی جریان آن‌ها در سنگ مخزن، اسپینوزا^۳ و همکاران [۱۱۸]، آرونسری^۴ و همکاران [۱۱۹] و یو^۵ و همکاران [۱۲۰، ۱۲۱] ویسکوزیته ظاهری فوم را از نظر نسبت کربن دی اکسید/آب، شوری، فشار و غلظت نانوذرات در بسته مهره‌های شیشه‌ای، بسته‌های ماسه، مغزه‌های ماسه‌سنگ و سنگ کربناته اندازه‌گیری کردند. شکل ۲-۱۰ ویسکوزیته ظاهری فوم را به‌عنوان تابعی از غلظت نانوذره و نسبت کربن دی اکسید/آب نمک در یک بسته ماسه نشان داد، که نرخ برش مؤثر ۱۳۰۰ بر ثانیه (sec^{-1}) و فشار ۱۵۵۰ psi و دما ۲۲ درجه سانتی‌گراد بود. مرز تولید فوم در شکل نشان داد که می‌توان یک فوم پایدار با غلظت نانوذرات تا حد ۰/۰۵ درصد وزنی تولید کرد. انتقال فوم‌های کربن دی اکسید پایدار شده با نانوذرات سیلیکا در محیط متخلخل از نظر بافت فوم، اشباع آب و فشار شبیه‌سازی شد [۱۲۲]. تجمع نانوذرات سیلیکا در محیط‌های با شوری بالا می‌تواند بر تولید و تحرک‌پذیری فوم به دلیل کشش فیزیکی نانوذرات سیلیکا تأثیر بگذارد که با افزایش نرخ جریان نانوذرات سیلیکا و جلوگیری از تجمع آن‌ها، می‌توان از این امر جلوگیری کرد [۱۲۳، ۱۲۴]. پس از تشکیل فوم، فوم مراحل گذار از فوم درشت تا متراکم را طی کرد و فوم قوی با نرخ تزریق کربن دی اکسید پایین‌تر حفظ شد [۱۲۵].

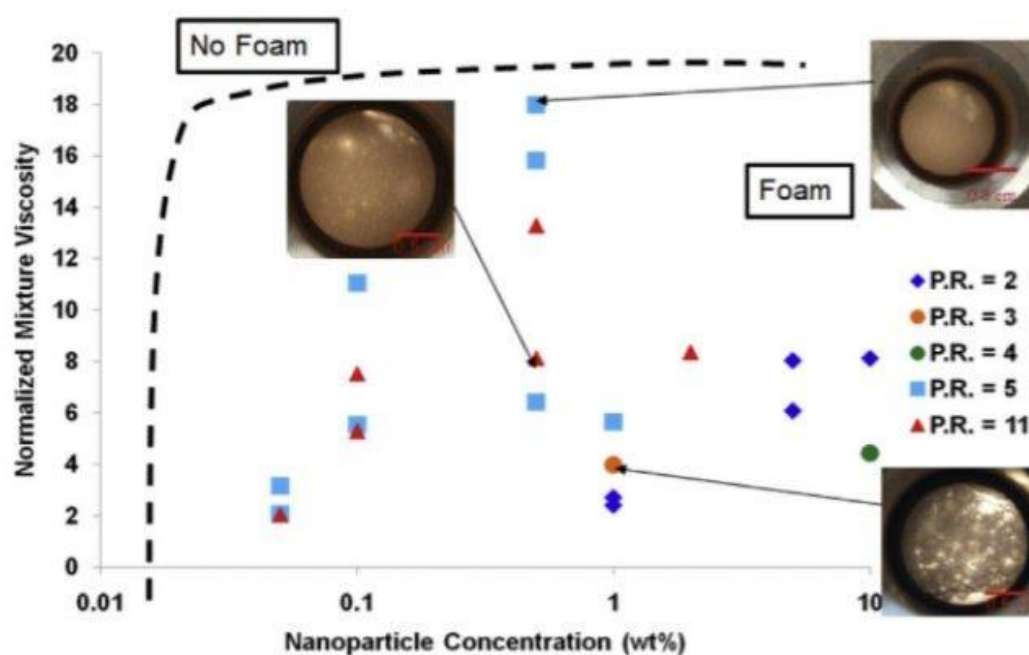
¹ Dickson

² Worthen

³ Espinosa

⁴ Aroonsri

⁵ Yu



شکل ۲-۱۰. ویسکوزیته ظاهری فوم در برابر غلظت‌های مختلف نانوذرات [۱۱۸]

روش ابتکاری دیگر برای تولید فوم کربن دی اکسید پایدار شده با نانوذرات برای کاربرد EOR با استفاده از خاکستر بادی نانو آسیاب به‌عنوان پایدارکننده فوم ارائه شد [۱۰۵، ۱۲۶]. از آنجا که خاکستر بادی یک ماده زائد با ارزش کم از نیروگاه‌های سوخت زغال‌سنگ است، این روش دارای مزیت دوگانه‌ای بود که نه تنها کربن دی اکسید بلکه خاکستر بادی را نیز تفکیک کرد. اخیراً یک برنامه مشابه توسط افتخاری و همکاران گزارش شد [۱۲۷] که به جای استفاده از نانو فرز کاری که توسط لی^۱ و همکاران [۱۲۶] انجام شد، ذرات خاکستر بادی در اندازه نانو را از فراصوت با توان بالا تولید کرد.

اسپینوزا و همکاران [۱۱۸] اثرات نانوذرات را بر کنترل تحرک‌پذیری فوم‌های کربن دی اکسید فوق گرم بررسی کردند. بر اساس نتایج، نانوذرات با ۰/۰۵ درصد وزنی می‌توانند فوم‌های پایدار ایجاد کنند. آن‌ها گزارش دادند که شوری، تأثیر زیادی بر پایداری فوم دارد. آن‌ها همچنین با استفاده از نانوذرات موفق به ایجاد فوم در دمای بالا مانند ۹۵ درجه سانتی‌گراد شدند.

¹ Lee

امین‌زاده-گوهرریزی و همکاران [۱۲۸]، پایداری فوم‌های کربن دی اکسید را در آب تحت تأثیر نانوذرات اصلاح‌شده سطحی مطالعه کردند. ادعا شد که این نانوذرات باعث تغییر الگوی حرکت و توزیع کربن دی اکسید در محیط می‌شوند، همچنین آن‌ها توانایی‌های کاهش تحرک‌پذیری کربن دی اکسید را نشان دادند.

مو^۱ و همکاران [۱۲۹]، همچنین آزمون‌هایی را برای تعیین عوامل مؤثر بر پایداری فوم در حضور نانوذرات انجام دادند. آن‌ها غلظت نانوذرات بهینه را تحت شرایط آزمایشگاهی اندازه‌گیری کردند تا در محدوده ۲۰۰۰ تا ۳۵۰۰ میکرولیتر بر طول ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$) باشد.

عملکرد فوم‌های پایدار شده با نانوذره در افزایش بازیابی نفت توسط یو و همکاران بررسی شد [۱۳۰]. آن‌ها ادعا کردند که چنین فوم‌هایی می‌توانند باعث بهبود بازیابی نفت در مغزه‌هایی با نفوذپذیری کم و زیاد شوند.

عملکرد نانوذرات اصلاح‌شده در ایجاد پایداری در فوم‌های کربن دی اکسید نیز توسط ژانگ^۲ و همکاران [۱۳۱] ارزیابی شد. آن‌ها تأثیر بالای نانوذرات سیلیکا اصلاح‌شده سطحی را در تشکیل امولسیون‌های پایدار نفت در آب و فوم‌های کربن دی اکسید در آب تأیید کردند. فوم‌هایی که از این طریق تولید شدند، توانستند در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد و تا ۱۰٪ شوری پایدار باشند.

لیو^۳ و همکاران [۱۳۲]، عملکرد فوم‌های کشش سطحی فوق‌العاده کم را به‌وسیله‌ی پلیمرها بررسی کردند. از آنجایی که فاز مایع فوم با کاهش ویسکوزیته‌ی نفت و جدا کردن نفت از سطوح سنگ، نقش بسیار مهمی در طی فرآیند سیلاب‌زنی فوم ایفا می‌کند، بنابراین کاهش کشش بین سطحی نفت - فاز مایع یک شاخص مهم در ارزیابی ظرفیت جابجایی نفت یک مایع است. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داد که افزودن پلیمر به فاز مایع فوم، امکان یک سیستم فوم با کشش بین سطحی فوق‌العاده کم با خواص فوم‌کنندگی بالا را فراهم می‌کند.

¹ Mo

² Zhang

³ Liu

راتانادوم^۱ و همکاران [۱۳۳]، عملکرد فوم کشش سطحی فوق‌العاده کم را به‌وسیله‌ی نانوذرات سیلیکا و ترکیب سه‌تایی از سورفکتانت‌ها با نسبت وزنی ۰/۴۸ : ۰/۴۸ : ۰/۴ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج قابل‌توجهی را در این سیستم انتخاب شده، از نظر توانایی تشکیل فوم و کشش سطحی فوق‌العاده کم (در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد)، مشاهده کردند. میزان شوری بهینه ۲/۵ درصد وزنی به دست آمد. میزان جذب سیستم سورفکتانت حاضر روی سطوح ماسه‌سنگی ۱۶/۲٪ کاهش یافت. نتایج سیلاب‌زنی مغزه نشان داد که بازیابی حاصل از سیستم سورفکتانت سه‌تایی ۴۳٪ نفت باقی‌مانده در محل بود که در حضور نانوذرات سیلیکا ۱۳٪ افزایش یافت.

سکتیوال^۲ و همکاران [۱۳۴]، کارایی نانونقاط کربنی را در غلظت‌های رقیق (یعنی ۲۰۰-۱۰ Ppm) برای استفاده مداوم در آب دریا تزریقی مورد بررسی قرار دادند. هم‌چنین عملکرد این نقاط را در برابر یک سورفکتانت داخلی Gemini، GS8 که به خوبی آزمایش شده بود، با خواص سورفکتانتی استثنایی که برای شرایط مخزن کربناته بسیار مناسب است، محک زدند. با مقایسه عملکرد نقاط کربنی و سورفکتانت در غلظت‌های رقیق برابر در آب دریا، GS8 باعث شروع سریع‌تر بازیابی و دسترسی کوتاه‌تر یا نرخ بازیابی بالاتر نسبت به نقاط کربنی شد. باین‌حال، نقاط کربنی علیرغم تأثیر مثبت اولیه سریع GS8 به یک فلات بالاتر کمک کردند. بازیابی نفت اضافه شده با نقاط کربن و GS8 در آب دریا به ترتیب از ۲۳-۳ درصد و ۲۲-۶ درصد متغیر بود.

افضلی‌تبار و همکاران [۱۳۵]، با استفاده از نوعی نانوهیبرید سنتز شده با نقاط کوانتومی گرافن، به این نتایج رسیدند: نانوهیبریدهای ۵۰٪ و ۱۰٪ پایداری بسیار خوبی در هر دو شرایط محیطی و در pH، شوری و دماهای مختلف دارند. نتایج IFT نشان داد که نانوهیبریدهای ۱۰٪ دارای حداقل مقدار IFT هستند. هم‌چنین، نتایج زاویه تماس نشان داد که این نانوهیبرید می‌تواند ترشوندگی سنگ مخزن را بهتر از سایر نانوهیبریدها از حالت نفت‌دوست به آب‌دوست تغییر دهد؛ اندازه‌گیری سیلاب‌زنی مغزه

¹ Rattanaudom

² Sakthivel

نشان داد که بهبود راندمان نفت از تزریق نانوهیبرید ۱۰٪، ۲۲ درصد در غلظت نانو سیال بسیار کم است. بر این اساس، کاندیدای مناسبی برای برنامه EOR شیمیایی خواهد بود.

ژو^۱ و همکاران [۱۳۶]، با استفاده از نقاط کوانتومی سیلیکون به نتایجی اعم از بازیابی ۲۵/۷۲ درصد نفت باقی مانده در محل که ۷/۴۹ درصد بیشتر از محلول سورفکتانت بتائین بود، بازیابی کل ۴۱/۹۸ درصد در آزمایش سیلابزنی مغزه (نتیجه به ترتیب ۹/۱۳٪ و ۲/۲۹٪ بالاتر از سورفکتانت در مراحل سیلابزنی شیمیایی و آب نمک) و پایداری خوب در دمای بالا و شوری بالا، دست یافتند.

ران^۲ و همکاران [۱۳۷]، نقاط کوانتومی گرافن را سنتز کردند و نتایج زیر را مشاهده نمودند: بازیابی افزایشی ۱۱ درصدی پس از تزریق PV ۲۰ به دست آمد. این نتیجه قابل توجه است زیرا آزمایش ها با نفت سنگین در دمای محیط انجام شده است. عملکرد نانوسیال های مبتنی بر نقاط کوانتومی گرافن این پتانسیل را دارد که به طور قابل توجهی در مخازن نفتی عمیق که در آن دماهای بالا به دلیل کاهش چگالی و ویسکوزیته نفت، حرکت سیال را افزایش می دهد، افزایش یابد.

۲-۵ تعریف مسئله

با توجه به گستردگی مطالعات انجام شده در حوزه استفاده از سورفکتانت به عنوان عامل فوم کننده، باوجود اقسام گوناگون این ماده شیمیایی و ویژگی های آن و همچنین شرایط محیطی هر آزمایش و مخزن، گزارشی مبنی بر اعلام یک سورفکتانت به عنوان بهترین ماده فوم کننده برای تولید فوم وجود ندارد. بنابراین، سورفکتانت مورد استفاده با توجه به گزارش های اعلام شده از سورفکتانت های گوناگون و با توجه به شرایط محیطی قابل اجرا، انتخاب می شود.

همچنین با وجود مطالعاتی که در مورد حضور نانوذرات به عنوان عامل پایدارکننده فوم انجام شده است، اما هنوز به طور کامل وجوه مختلف اثرگذاری نانوذرات که شامل شکل و اندازه و خواص ساختاری

¹ Zhou

² Rane

آن‌هاست، بررسی نشده است. در این مطالعات همچنین از نانوذرات در غلظت‌های بسیار بالا بیش از ۱۰۰۰ Ppm و معمولاً در مرتبه ۱۰۰۰۰ Ppm استفاده کرده‌اند. این مورد، استفاده از نانوذرات را در عملیات میدانی ممنوع می‌کند.

ضرورت انجام این تحقیق، بررسی اثر نقاط کوانتومی اکسید روی در فرآیند ازدیاد برداشت نفت توسط فوم، به دلیل عدم ارزیابی تأثیر خواص فیزیکی نانوذرات به ویژه در ابعاد زیر ۱۰ نانومتر در این زمینه است. این نانو نقطه‌ها دارای اندازه ۷ نانومتر هستند که ساختار آن‌ها باعث می‌شود که ذاتاً فلئورسنت باشد و در مقادیر کم قابل تشخیص باشند. نقاط کوانتومی اکسید روی همچنین با سمیت کمتر نسبت به سایر اکسیدهای فلزی، نیمه هادی بودن، پایداری کلئیدی بهتر، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا مشخص می‌شوند.

هدف از این مطالعه، بررسی اثرات هم‌افزایی ناشی از غلظت‌های مختلف عامل فوم‌کننده (سورفکتانت آنیونی) و پایدارکننده فوم (نقطه‌های کوانتومی اکسید روی) بر پایداری استاتیکی و دینامیکی فوم‌ها می‌باشد. ابتدا با آزمایش CMC غلظت بهینه سورفکتانت بدست آمد. سپس، آزمایش‌های متعدد تولید فوم در مقیاس انباشته (فوم‌کنندگی استاتیک) با استفاده از گاز کربن دی اکسید، نقاط کوانتومی و سورفکتانت انجام شد. مکانیسم‌ها و عوامل مؤثر بر پایداری فوم از نظر غلظت سورفکتانت، حضور شوری، نفت و نانوذره بررسی شدند. درنهایت، آزمایش‌های تزریق فوم دینامیک از طریق میکرومدل برای بررسی میزان بازیابی نفت توسط این ذرات انجام شدند.

نواوری در این تحقیق، نانوذرات با خواص کوانتومی است که می‌تواند اثرگذاری بالایی در پایداری فوم داشته باشد. نکته حائز اهمیت در استفاده از این نوع نانوذرات این است که تاکنون از این نوع نقاط کوانتومی اکسیدی در فرآیند ازدیاد برداشت نفت به‌ویژه تولید فوم استفاده نشده است و در کار ما اولین بار است که مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجایی که این نقاط کوانتومی برای اولین بار استفاده می‌شوند، ارزیابی‌های زیادی را می‌طلبند تا تمام خواص این نقاط کوانتومی در فرآیند تولید فوم و به‌طور کلی ازدیاد برداشت نفت مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه این نقاط دارای ابعاد بسیار کوچکی در مقایسه با

سایر نانوذرات است، بنابراین احتمال مسدودسازی مسیرها و حفره‌ها توسط آن‌ها وجود ندارد. همچنین از خواص فلئورسنسی این نقاط کوانتومی می‌توان برای بررسی بصری جریان نانوذرات درون میکرومدل یا نحوه قرارگیری آن‌ها در لامل‌ها و بررسی پایداری فوم‌ها استفاده کرد.

فصل ۳: دستگاه‌ها و روش‌های آزمایش

۳-۱ بسترهای آزمایشگاهی

جهت انجام آزمایش‌های مختلف از بسترهای آزمایشگاهی مناسب استفاده شده است که در ادامه به تشریح آن پرداخته شده است.

۳-۱-۱ بستر آزمایشگاهی پایداری و فوم‌کنندگی فوم در مقیاس

انباشته

این بستر برای بررسی پایداری و فوم‌کنندگی فوم‌های مختلف در مقیاس انباشته استفاده شده است. این بستر شامل یک استوانه شیشه‌ای مدرج، پایه فلزی دارای دیسک متخلخل ۵/۰ میکرون و شیر ورودی سیال می‌باشد که استوانه شیشه‌ای روی این پایه قرار می‌گیرد. جهت انجام آزمایش‌های مورد نیاز در این بستر، محلول فوم‌ساز درون این استوانه ریخته می‌شود. سپس سیال ورودی (گاز) توسط شیر ورودی متصل به پایه نگهدارنده از طریق دیسک متخلخل تعبیه شده روی این پایه، وارد استوانه شده و فوم درون این استوانه ساخته می‌شود. سایر تجهیزات جانبی عبارت‌اند از: جریان‌سنج گاز (کنترل دبی ورودی به صفحه متخلخل)، کپسول گاز کربن دی اکسید، دوربین، جعبه نورانی و کامپیوتر (برای ثبت تصاویر و داده). در این آزمایش، قابلیت فوم‌کنندگی و پایداری فوم ساخته شده اندازه‌گیری می‌شود.

۳-۱-۱-۱ ستون فوم

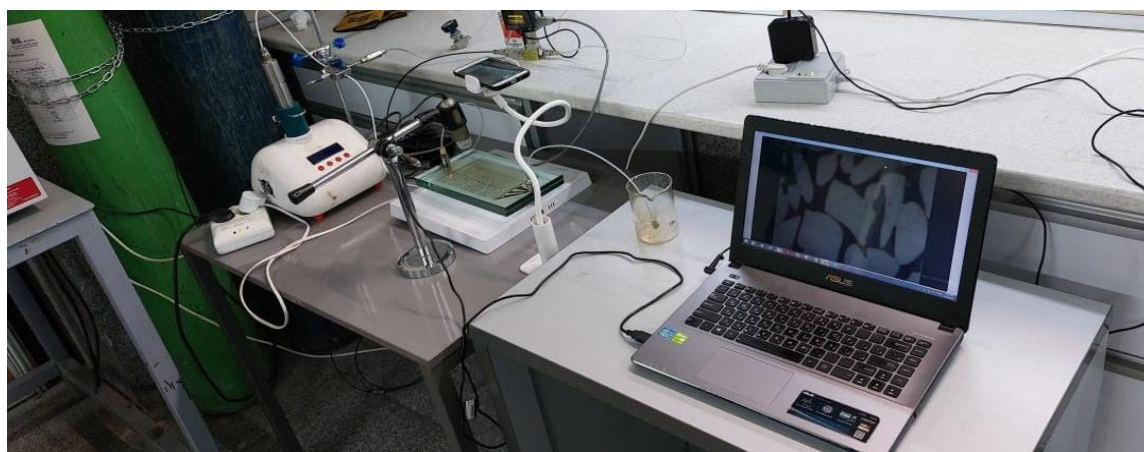
دستگاه ستون فوم در این مطالعه، شامل یک شیشه استوانه‌ای مدرج (محل قرارگیری سیال و تشکیل فوم)، صفحه متخلخل (محل عبور گاز کربن دی اکسید برای ایجاد فوم)، پورت ورود گاز و درپوش می‌باشد (شکل ۳-۱).



شکل ۳-۱. ستاپ آزمون استاتیک

۳-۱-۲ بستر آزمایشگاهی آزمون دینامیک و بازیابی نفت

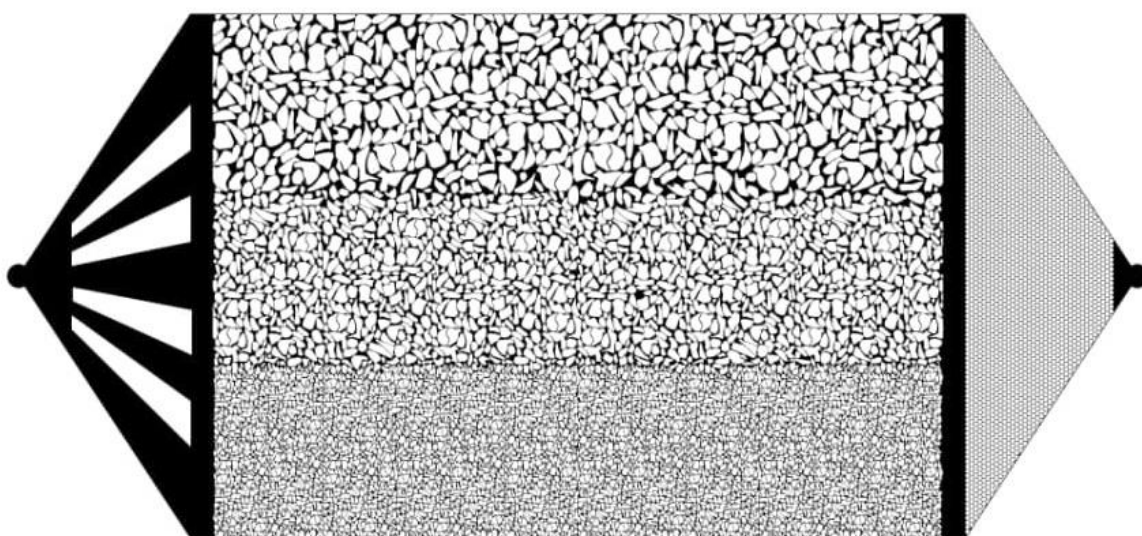
یکی از آزمون‌های مهم در پژوهش‌های ازدیاد برداشت نفت در صنعت نفت و گاز که جزو آزمون‌های دینامیک محسوب می‌شود، آزمون دینامیک و بازیابی نفت است. از این آزمون برای بررسی حرکت سیال در محیط متخلخل، به منظور مشاهده حرکت سیال و مکانسیم‌های اثرگذار بر سیال تزریقی به صورت بصری و ثبت آن توسط دوربین استفاده می‌شود تا رفتار سیال تزریقی به درون مخزن و چاه‌های تولید نمایان شود. به عبارت دیگر انجام آزمایش میکرومدل اصطلاحاً پدیده‌شناسی یا مشاهده پدیده‌ها و رفتارهای سیال تزریقی می‌باشد (شکل ۳-۲).



شکل ۳-۲. ستاپ آزمون دینامیک

۳-۱-۲-۱ میکرومدل

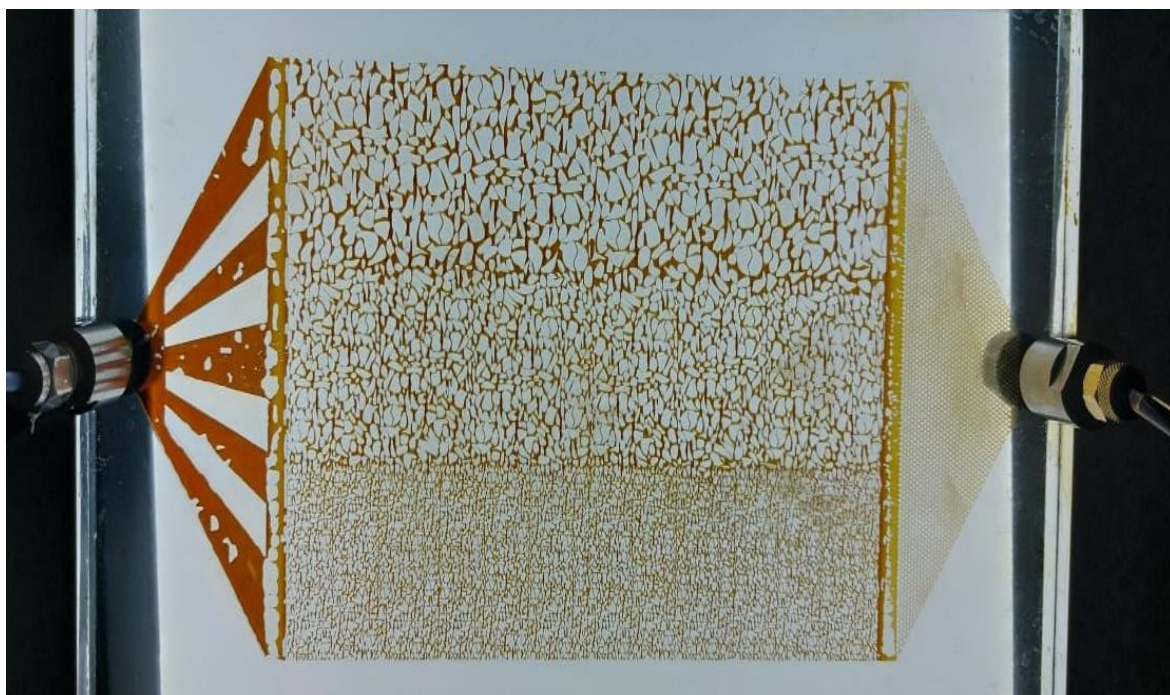
جهت ساخت میکرومدل ابتدا نیاز به طراحی الگو است. این الگو می‌تواند از تزریق اسکن مغزه و یا طراحی یک الگوی منظم یا نامنظم صورت پذیرد. با توجه به پرهزینه بودن اسکن مغزه و همچنین عدم نیاز به اعمال شرایط مغزه درون آزمون میکرومدل، غالباً از اسکن مغزه برای الگوی میکرومدل استفاده نمی‌شود. در این پژوهش از یک الگوی نامنظم استفاده شده است (شکل ۳-۳). جهت رسم الگو از نرم‌افزار corel draw x7 استفاده شد. سپس این الگو با دستگاه لیزر روی شیشه به ابعاد ۲۶*۱۵*۱ سانتی‌متر مکعب حکاکی شد. همچنین یک شیشه‌ی دیگر به همان ابعاد اما حکاکی نشده، روی شیشه حکاکی شده قرار داده شد. پس از آن روی شیشه‌ها عمل سوراخ‌کاری برای ایجاد ورودی و خروجی میکرومدل انجام شد. درنهایت شیشه‌ها روی هم قرار داده شده و درون کوره قرار داده شدند تا صفحات شیشه‌ای به یکدیگر بچسبند. دمای کوره روی ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد. زمان رسیدن کوره به این دما ۱۶ ساعت به طول انجامید. پس از رسیدن دمای کوره به دمای ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد، صفحات ۳۰ دقیقه در این دما باقی‌ماندند. پس از آن با خاموش شدن کوره، به مدت ۲۴ ساعت میکرومدل به آرامی سرد شد. درنهایت میکرومدل آماده تزریق شد.



شکل ۳-۳. الگوی میکرومدل

۳-۲-۱ ویژگی میکرومدل

در طراحی الگوی میکرومدل از یک ویژگی خاص استفاده شده است. این میکرومدل دارای سه ناحیه با نفوذپذیری متفاوت می‌باشد. همان طور که در شکل ۳-۴ مشخص است، ناحیه اول با نفوذپذیری کم، ناحیه دوم با نفوذپذیری متوسط و ناحیه سوم با نفوذپذیری بالا می‌باشد. منظور از ناحیه با نفوذپذیری کم، نسبت به دو ناحیه دیگر می‌باشد که به صورت بصری قابل مشاهده است. ناحیه با نفوذپذیری متوسط و بالا به ترتیب از دو و سه برابر کردن ناحیه با نفوذپذیری کم به دست آمده‌اند. علت استفاده از این الگو با این ویژگی، به این دلیل است که مشاهده شود آیا سیال فوم تزریقی می‌تواند از ناحیه با نفوذپذیری بالاتر به ناحیه با نفوذپذیری پایین‌تر منحرف شود یا خیر. همچنین با ایجاد سه ناحیه با نفوذپذیری متفاوت اثر افزایش نفوذپذیری نیز دیده شود. همچنین الگوی نامنظم رسم شده در این میکرومدل به دلیل دارا بودن حفره‌های ته بسته و بررسی عملکرد فوم در این حفره‌ها، دارای پیچیدگی و برتری نسبت به الگوی منظم می‌باشد.



شکل ۳-۴. میکرومدل

۲-۳ تجهیزات آزمایشگاهی

۱-۲-۳ ترازو

جهت اندازه‌گیری مقدار ماده مورد نیاز در هر محلولی از ترازو با دقت 0.01 گرم استفاده شده است. همچنین از یک ترازو دیگر با دقت بالاتر (0.0001 گرم) استفاده شده است (شکل ۳-۵). علت استفاده از این ترازو با این دقت بالا، برای اندازه‌گیری جرم نانوذرات در مقادیر بسیار کم می‌باشد.



شکل ۳-۵. ترازو با دقت بالا

۲-۲-۳ همزن مغناطیسی

جهت همگن سازی محلول های مورد نیاز از یک همزن مغناطیسی استفاده شده است (شکل ۳-۶). این دستگاه یک میدان مغناطیسی دوار ایجاد می کند و آهنربای درون ظرف حاوی محلول را به چرخش درمی آورد و در نتیجه محلول شروع به همگن شدن می کند. این دستگاه به وسیله صفحه ای که ظرف محلول روی آن قرار می گیرد، می تواند عمل گرم کردن محلول را نیز انجام دهد. در تحقیق حاضر، تمامی محلول های استفاده شده در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی گراد) همگن شده اند.



شکل ۳-۶. همزن مغناطیسی

۳-۲-۳ دستگاه التراسونیک پروبی

از این دستگاه جهت تولید امولسیون‌های پایدار از مایعات نامحلول در یکدیگر، پخش و پراکنده نمودن ذرات ریز و نانومتری در مایعات، همگن‌سازی مخلوط‌ها و محلول‌ها، تسریع واکنش‌های شیمیایی و غیره استفاده می‌شود (شکل ۷-۳). این دستگاه دارای توان ۴۰۰ وات در فرکانس کاری ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد. در این تحقیق، جهت پایدارسازی محلول نانوذرات، سورفکتانت و آب‌نمک از این دستگاه به مدت ۱ ساعت (جهت اطمینان از پایدار شدن مواد) با توان ۴۰۰ وات استفاده شد.



شکل ۷-۳. دستگاه التراسونیک پروبی

۳-۲-۴ کنترل کننده جریان جرمی

از این دستگاه جهت کنترل و اندازه گیری میزان جریان گاز در آزمون های ستون فوم و میکرومدل استفاده شده است (شکل ۳-۸). این دستگاه دارای یک حسگر فشار بوده و پس از اندازه گیری فشار عبوری مقدار دبی گاز (در اینجا کربن دی اکسید) را که توسط کاربر تنظیم شده است، ثابت نگه می دارد. محدوده کاری این دستگاه از ۰ تا ۳۰ ml/min با دقت ۰/۱ ml/min می باشد. شکل ۳-۸ دستگاه کنترل کننده جریان جرمی استفاده شده را نشان می دهد.



شکل ۳-۸. کنترل کننده جریان

۳-۲-۵ دوربین

دوربین های استفاده شده در این تحقیق شامل دوربین جهت تهیه عکس و فیلم از حباب های موجود در ستون فوم، دوربین جهت تهیه عکس و فیلم از کل فوم تشکیل شده درون ستون فوم و همچنین در آزمون میکرومدل جهت نشان دادن حرکت سیال تزریقی می باشد (شکل ۳-۹). لازم به ذکر است از تجهیزات جانبی و مکمل دیگر نیز مانند پایه دوربین، مقیاس طولی، جعبه نور و همچنین نرم افزار جهت ثبت بهتر تصاویر استفاده شده است.



شکل ۳-۹. دوربین

۳-۲-۶ کوره

برای ساخت میکرومدل از یک کوره آزمایشگاهی جهت چسباندن دو شیشه‌ی میکرومدل که از قبل طرح میکرومدل روی آن‌ها توسط لیزر حک شده است، استفاده شده است (شکل ۳-۱۰). این کوره دارای حداکثر دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. گرمادهی این کوره از چهار جهت (دو دیواره جانبی - کف و سقف) صورت می‌پذیرد. همچنین دارای سیستم کنترل دما تماماً الکترونیک دیجیتال خارجی است.



شکل ۳-۱۰. کوره آزمایشگاهی

۳-۲-۷ پمپ سرنگی

از این پمپ جهت تزریق سیال با دقت بالا و دبی بسیار پایین استفاده می‌شود (شکل ۳-۱۱). محلول درون یک سرنگ ریخته می‌شود سپس محرک پمپ، سرنگ را با سرعت مشخص و تنظیم شده به آرامی جلو می‌برد. در این تحقیق از پمپ سرنگی جهت تزریق سیال درون میکرومدل استفاده شده است.



شکل ۳-۱۱. پمپ سرنگی

۳-۲-۸ کمپرسور هوا

برای تأمین هوای فشرده از کمپرسور پیستونی که نیروی محرک خود را از الکتروموتور می‌گیرد استفاده شد (شکل ۳-۱۲). این کمپرسور دارای حداکثر فشار خروجی ۱۰ بار می‌باشد. در این تحقیق جهت خشک کردن ظروف آزمایشگاه، پاک‌سازی خطوط اتصال میکرومدل و غیره از کمپرسور استفاده شد.



شکل ۳-۱۲. کمپرسور هوا

۳-۳ مواد مورد نیاز برای انجام آزمایش

۳-۳-۱ سورفکتانت

سورفکتانت استفاده شده در این مطالعه، سورفکتانت آنیونی آلفا اولفین سولفونات می باشد که به عنوان عامل فوم کننده در آزمون ها استفاده شده است. سورفکتانت AOS خاصیت پاک کنندگی فوق العاده، جذب کمتر روی سنگ های متخلخل، سازگاری بالا با آب سخت و خواص مرطوب کنندگی و فوم کنندگی خوبی را از خود نشان داده است. به دلیل همین ویژگی ها AOS یک کاندید عالی برای کاربردهای فوم در بهبود بازیابی نفت به شمار می رود [۱۳۸]. خواص سورفکتانت آنیونی استفاده شده در این پژوهش در جدول ۳-۱ آورده شده است:

جدول ۳-۱. ویژگی سورفکتانت استفاده شده

نام تجاری	نام	کشش سطحی ($mN \cdot m^{-1}$)	ویسکوزیته (mPa.s)	ترکیب یونی	شرکت سازنده
آاواس	Alpha Olefin Sulfonate	36.26	1.244	Anionic	PSG

۳-۳-۲ نانوذره

نانوذره مورد نیاز در آزمون ها، پودر نقاط کوانتومی اکسید روی با ابعاد ۷ نانومتر، خریداری شده از شرکت آرمینانو می باشد.

۳-۳-۳ نفت

نفت مورد استفاده در این پژوهش، نفت سبک میدان کوشک ایران است. ویسکوزیته این نفت برابر با 0.89 cp می‌باشد.

۳-۳-۴ نمک

برای تهیه آب دریا مصنوعی و همچنین آب سازند و آب‌نمک با شوری‌های مختلف، از چند نوع نمک استفاده شده است. ترکیبات آب دریا خلیج فارس استفاده شده در این کار در جدول ۲-۳ مشخص است:

جدول ۲-۳. ترکیبات آب دریا خلیج فارس

نمک	مقدار (g/l)
NaCl	۳۰/۷۴
Na_2SO_4	۴/۶۱
$NaHCO_3$	۰/۲۳
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	۱۱/۹۱
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	۱/۴۰

۳-۳-۵ سایر سیالات

از آب دیونیزه شده سه بار تقطیر، به‌عنوان سیال پایه محلول‌ها و آزمون‌ها استفاده شده است. گاز تزریقی مورد استفاده در تمام آزمون‌های پایداری فوم در ستون فوم و آزمون‌های میکرومدل، گاز کربن دی اکسید با خلوص ۹۹ درصد می‌باشد.

۳-۴ روند انجام آزمایش‌ها

۳-۴-۱ آماده‌سازی محلول‌ها

۳-۴-۱-۱ تهیه آب‌نمک

برای آماده‌سازی محلول‌های آب‌نمک، در ابتدا میزان نمک‌های موردنظر را به‌صورت جرمی توسط ترازو وزن کرده و سپس درون بشر ریخته و تا رسیدن به حجم معین، آب مقطر ریخته می‌شود. سپس به مدت ۳۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی گذاشته می‌شود. شفافیت و انحلال کامل محلول آب‌نمک به‌صورت چشمی قابل مشاهده خواهد بود.

۳-۴-۱-۲ تهیه محلول سورفکتانت

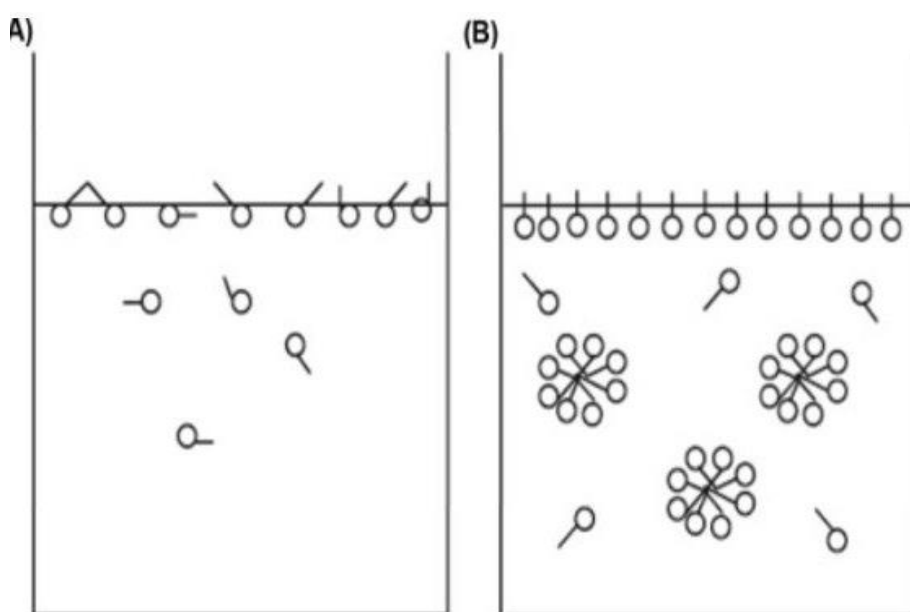
برای تهیه محلول‌های سورفکتانت، ابتدا مقدار ماده موردنظر را برای رسیدن به غلظت دلخواه به‌صورت جرمی توسط ترازو وزن کرده، سپس با آب مقطر یا آب‌نمک به حجم معین رسانده و تا رسیدن به محلول شفاف روی همزن مغناطیسی قرار می‌گیرد.

۳-۴-۱-۳ تهیه نانوسیال

همانند مرحله قبل، ابتدا نانوذره با ترازوی دقت بالا در غلظت‌های معین وزن می‌شود، سپس با آب مقطر یا آب‌نمک یا محلول سورفکتانت (بنا بر آزمایش مورد نظر) به حجم موردنظر می‌رسد. سپس به مدت ۱۲ ساعت روی همزن مغناطیسی قرار داده می‌شود و پس از آن به مدت یک ساعت درون دستگاه التراسونیک با توان ۴۰۰ وات قرار می‌گیرد.

۳-۴-۲ تعیین غلظت بحرانی میسل

یکی دیگر از ویژگی‌های مهم، غلظت بحرانی میسل است که به عنوان غلظت سورفکتانت‌ها هنگام تشکیل خود به خودی میسل‌ها تعریف می‌شود. افزودن سورفکتانت باعث کاهش انرژی رابط و حذف گروه‌های آبگریز سورفکتانت از تماس با آب می‌شود. در نتیجه، انرژی آزاد سیستم کاهش می‌یابد. هنگامی که غلظت سورفکتانت پس از آن در سیستم افزایش می‌یابد، مولکول‌های سورفکتانت شروع به جمع شدن با سایر مولکول‌ها و تشکیل میسل‌ها می‌کنند. تشکیل میسل با کاهش تماس بین گروه‌های آبگریز سورفکتانت و آب، تا زمانی که غلظت سورفکتانت به CMC برسد، به شدت انرژی آزاد سیستم را کاهش می‌دهد. افزایش غلظت سورفکتانت در بالای CMC منجر به تشکیل بیشتر میسل‌ها می‌شود اما به سختی انرژی آزاد سیستم را کاهش می‌دهد (شکل ۳-۱۳) [۱۳۹].



شکل ۳-۱۳. توزیع مولکول‌های سورفکتانت (a) زیر غلظت CMC (b) بالای غلظت CMC [۱۳۹]

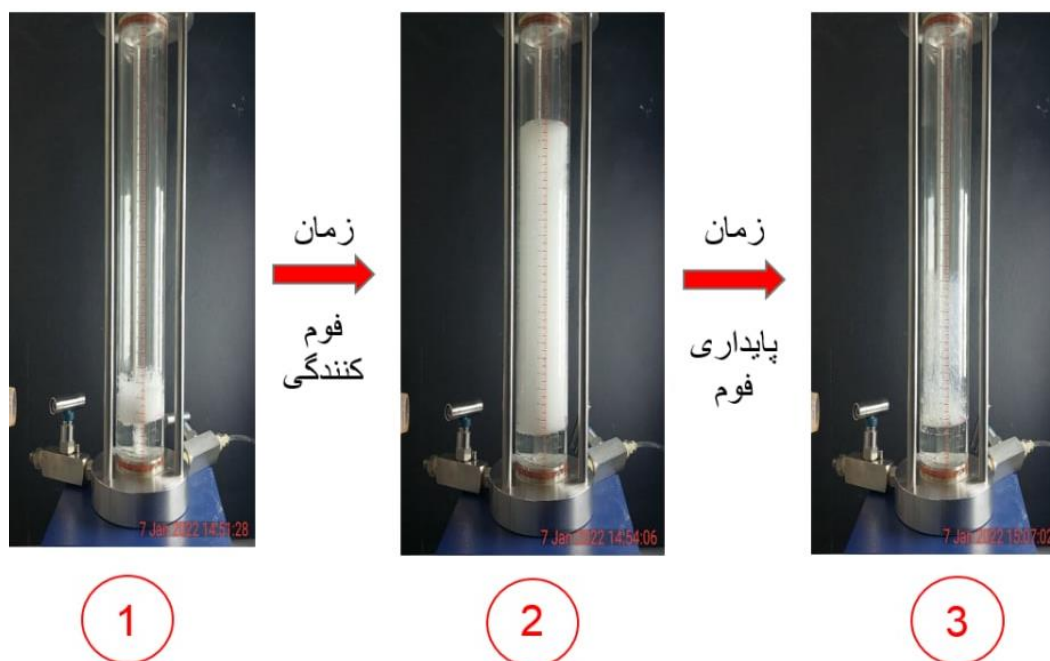
برای تعیین غلظت بحرانی میسل سورفکتانت AOS، از دستگاه هدایت‌سنجی استفاده می‌شود. ابتدا محلول سورفکتانت در غلظت‌های از ۱-۰/۰۰۲ wt%، در آب دیونیزه شده به حجم ۵۰ ml آماده شد. سپس با استفاده از دستگاه هدایت‌سنجی، مقدار هدایت الکتریکی هر غلظت از محلول ثبت شد.

۳-۴-۳ روند انجام آزمون پایداری در مقیاس انباشته

در این آزمایش دو پارامتر قابلیت فوم‌کنندگی و پایداری فوم محلول‌های آماده شده در شرایط مختلف اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۳-۱۴).

برای اندازه‌گیری قابلیت فوم‌کنندگی محلول، مدت زمانی که محلول پس از ورود گاز به درون ستون فوم تا رسیدن به ارتفاع مورد نظر طی می‌کند را اندازه‌گیری کرده که این زمان، معیاری برای قابلیت فوم‌کنندگی در نظر گرفته می‌شود. هرچه این زمان بیشتر باشد، قابلیت فوم‌کنندگی محلول کمتر خواهد بود. ارتفاع در نظر گرفته شده برای تمامی آزمایش‌ها ۲۰ سانتی‌متر نسبت به ارتفاع اولیه محلول قبل از ورود گاز می‌باشد.

پس از اینکه فوم تشکیل شده درون ستون فوم به ارتفاع مشخص شده رسید، جریان گاز ورودی قطع می‌شود. سپس مدت زمانی که فوم به نصف ارتفاع خود یعنی ۱۰ سانتی‌متر می‌رسد را اندازه‌گیری کرده که این زمان، زمان نیمه‌عمر فوم در نظر گرفته می‌شود. زمان نیمه‌عمر فوم، بیانگر پایداری فوم می‌باشد که هرچه این زمان بیشتر باشد، فوم پایدارتر است.



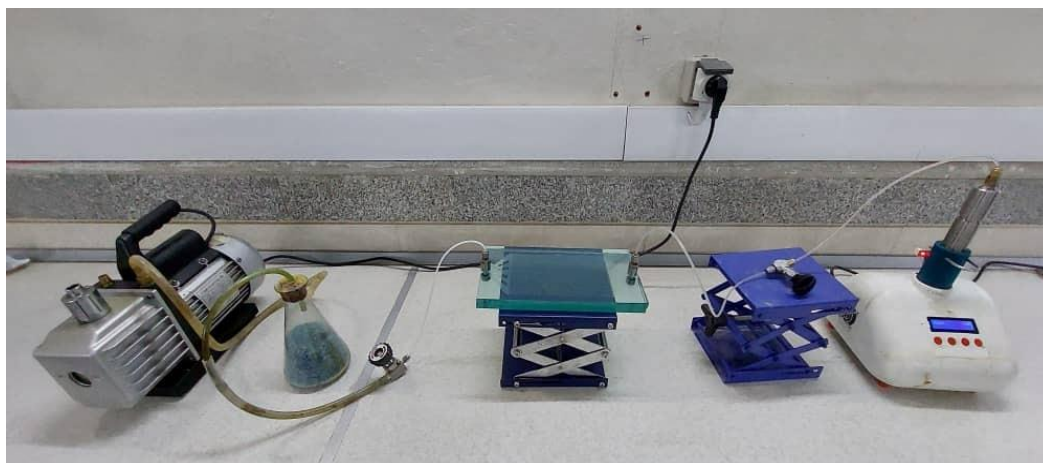
شکل ۳-۱۴. فوم‌کنندگی و پایداری محلول فوم

۳-۴-۴ روند انجام آزمون دینامیکی

در این مرحله فرآیند آماده‌سازی میکرومدل جهت انجام آزمون‌های دینامیک به شرح زیر بیان می‌شود.

۳-۴-۴-۱ خلأسازی میکرومدل

جهت انجام آزمایش‌های دینامیک، ابتدا به یک فرآیند آزمایشگاهی برای خلأ کردن میکرومدل از هوا مورد نیاز است تا میکرومدل آماده اشباع شدن از نفت و آزمون تزریق شود. زیرا وجود حباب‌های هوا درون میکرومدل باعث عدم اشباع کامل آن و همچنین به دام افتادن هوا درون منافذ شده که عملیات اشباع میکرومدل با نفت و همچنین محاسبه میزان بازیابی و تخلخل را با خطا مواجه می‌کند. به همین منظور در خروجی پمپ تزریق سیال (آب‌نمک)، یک شیر یک‌طرفه قرار داده تا در ادامه به ورودی میکرومدل متصل شود. در مقابل نیز، خروجی میکرومدل به یک شیر یک‌طرفه و به دنبال آن به یک پمپ مکش متصل می‌شود. سیال از طریق پمپ تزریق تا رسیدن به شیر یک‌طرفه حرکت کرده سپس شیر یک‌طرفه بسته می‌شود (شکل ۳-۱۵). با این کار هیچ هوایی بین پمپ تزریق تا شیر یک‌طرفه باقی نمی‌ماند. سپس با روشن کردن پمپ مکش، هوای درون میکرومدل خارج می‌گردد. پس از گذشت حدود ۲ دقیقه از مکش، شیر سمت خروجی میکرومدل را بسته سپس عملیات مکش متوقف می‌گردد. اکنون میکرومدل عاری از هوا می‌باشد و با باز کردن شیر ورودی به میکرومدل، عملیات تزریق آغاز می‌گردد.



شکل ۳-۱۵. خلأسازی میکرومدل

۳-۴-۴-۲ تعیین تخلخل میکرومدل

برای بدست آوردن درصد تخلخل، ابتدا عکس باکیفیت و دقیقی از اشباع میکرومدل با نفت گرفته شده که پس از آن، عکس به شکل باینری تبدیل می‌گردد. سپس با استفاده از کد نوشته شده در نرم‌افزار متلب، تعداد پیکسل‌های سیاه (نفت) و سفید (دانه و قسمت‌های اشباع‌نشده) به‌صورت تفکیک‌شده محاسبه می‌گردد که میزان درصد اشباع از نفت و درصد تخلخل میکرومدل بدست می‌آید. برای محاسبه درصد بازیابی نفت در هر مرحله نیز به همین ترتیب عمل می‌شود و تعداد پیکسل‌های سیاه (نشان‌دهنده وجود نفت) نسبت به تعداد پیکسل‌های سیاه اولیه (حالت اشباع کامل میکرومدل با نفت) محاسبه شده و میزان کاهش تعداد پیکسل‌ها، درصد اشباع نفت در آن مرحله را نشان خواهد داد. درصد تخلخل میکرومدل استفاده شده در این پژوهش $30/72$ درصد بدست آمد.

۳-۴-۴-۳ تزریق میکرومدل

در آزمون میکرومدل، پس از اینکه ستاپ به‌طور کامل آماده شد، از یک اختلاط‌کننده جریان استفاده می‌شود. سپس خروجی پمپ تزریق محلول سورفکتانت و نانوذره و همچنین خروجی کنترل‌کننده جریان گاز، به اختلاط‌کننده جریان به‌عنوان عوامل ورودی متصل می‌گردند. در ادامه از خروجی اختلاط‌کننده جریان به ورودی میکرومدل وصل می‌شود. پس از این کار، دبی ورودی جریان گاز روی $0/5$ میلی‌لیتر بر دقیقه و دبی محلول سورفکتانت روی $0/125$ میلی‌لیتر بر دقیقه تنظیم می‌گردد تا برای تزریق فوم درون میکرومدل، فوم با کیفیت 80 درصد تشکیل شود که کیفیت فوم مطلوبی برای بررسی جریان دینامیکی فوم درون محیط متخلخل است.

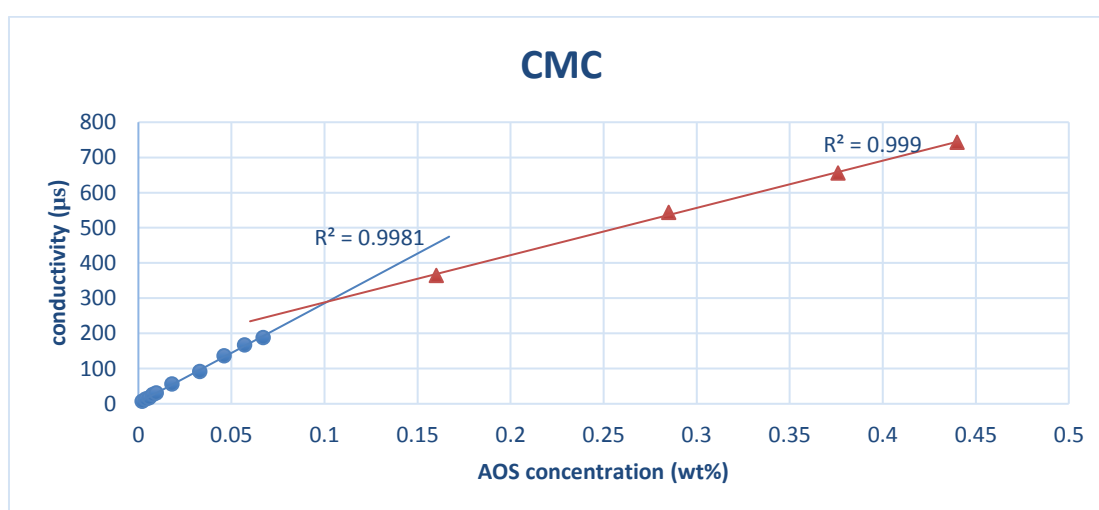
فصل ۴: نتایج

۴-۱ مقدمه

پس از آماده‌سازی محلول‌های مورد نیاز و ستاپ‌های آزمایشگاهی، آزمون‌های قابلیت فوم‌کنندگی و پایداری فوم در ستاپ ستون فوم انجام شدند. پس از انتخاب فرمولاسیون نهایی تحت شرایط شوری و حضور نفت، آزمون‌های تزریق فوم در میکرومدل برای ارزیابی میزان برداشت نفت، قبل و بعد از استفاده از نانوذره انجام پذیرفت. در این فصل به‌طور کامل نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده به تفصیل بیان می‌شود.

۴-۲ آزمون تعیین غلظت بحرانی میسل

پس از آماده‌سازی محلول‌های سورفکتانت، مطابق آنچه در فصل گذشته گفته شد، آزمون هدایت‌سنجی بر حسب افزایش غلظت سورفکتانت انجام شد و نتیجه آن در شکل ۴-۱ آورده شده است. نتایج حاصل از هدایت‌سنجی این آزمون برای سورفکتانت AOS بدون شوری و سایر افزودنی‌ها و در دما و فشار محیط، با نتیجه CMC این سورفکتانت در سایر مطالعات انطباق داشت [۱۳].



شکل ۴-۱. هدایت الکتریکی بر حسب غلظت سورفکتانت

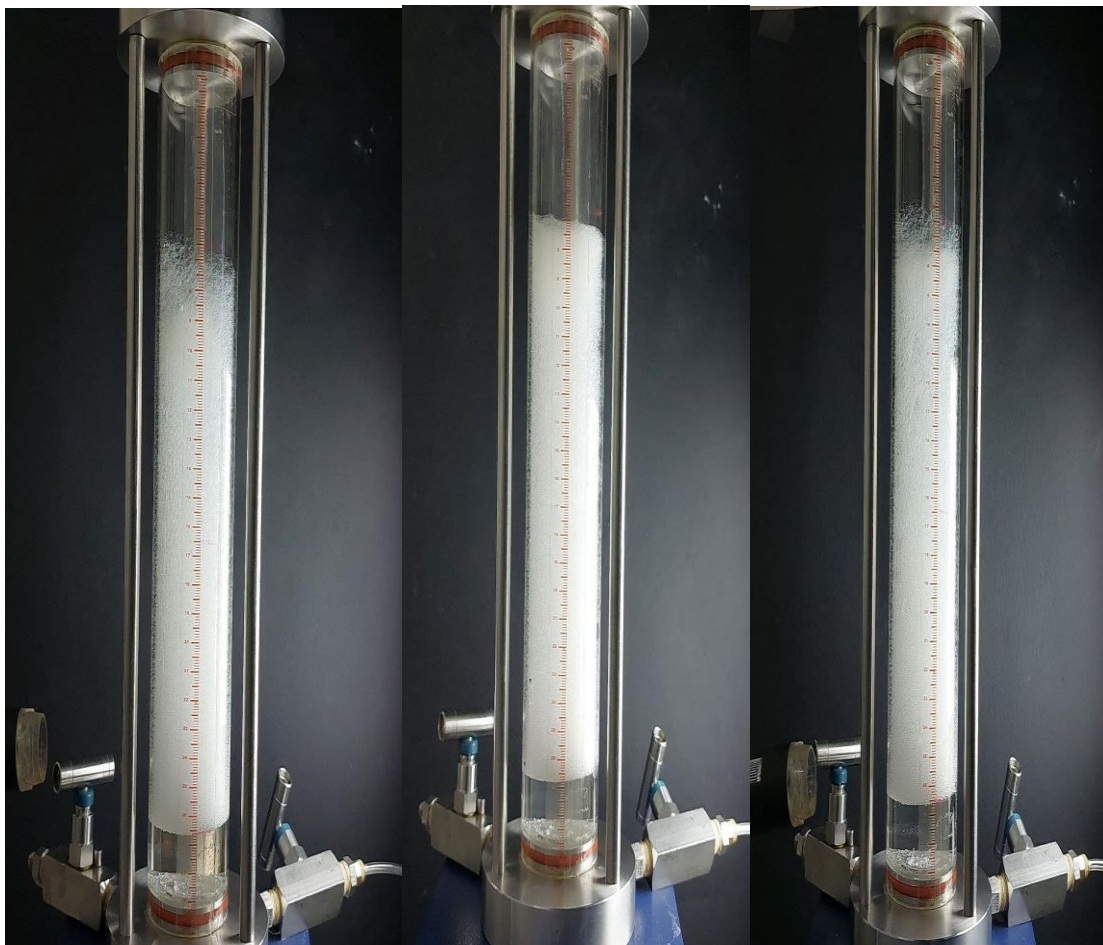
همان طور که در شکل ۴-۱ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت سورفکتانت، میزان هدایت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. از یک غلظتی به بعد، شیب افزایش هدایت تغییر می‌کند. با ترسیم خطوط مرتبط با هر شیب افزایشی و امتداد آن‌ها، محل تقاطعی رخ می‌دهد که در این نقطه درواقع غلظت بحرانی میسل به دست می‌آید. همان طور که ملاحظه می‌شود، نتیجه حاصل شده از این آزمون، CMC سورفکتانت AOS، غلظت ۰/۱ wt% بدست آمد.

۴-۳ آزمون تعیین قابلیت فوم‌کنندگی

برای ارزیابی قابلیت فوم‌کنندگی یک عامل فوم‌کننده در شرایط مختلف، پس از آماده‌سازی محلول موردنظر، زمان رسیدن ارتفاع آن به مقدار مشخصی (در اینجا ۲۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری می‌شود. پس از تعیین مقدار غلظت بحرانی میسل سورفکتانت AOS، محلول سورفکتانت برای این آزمون در شرایط مختلف، شامل: الف) تغییر غلظت سورفکتانت، ب) حضور شوری، پ) حضور نانوذره، ت) حضور نفت، به میزان ۵۰ ml آماده شد و نتایج زیر بدست آمد.

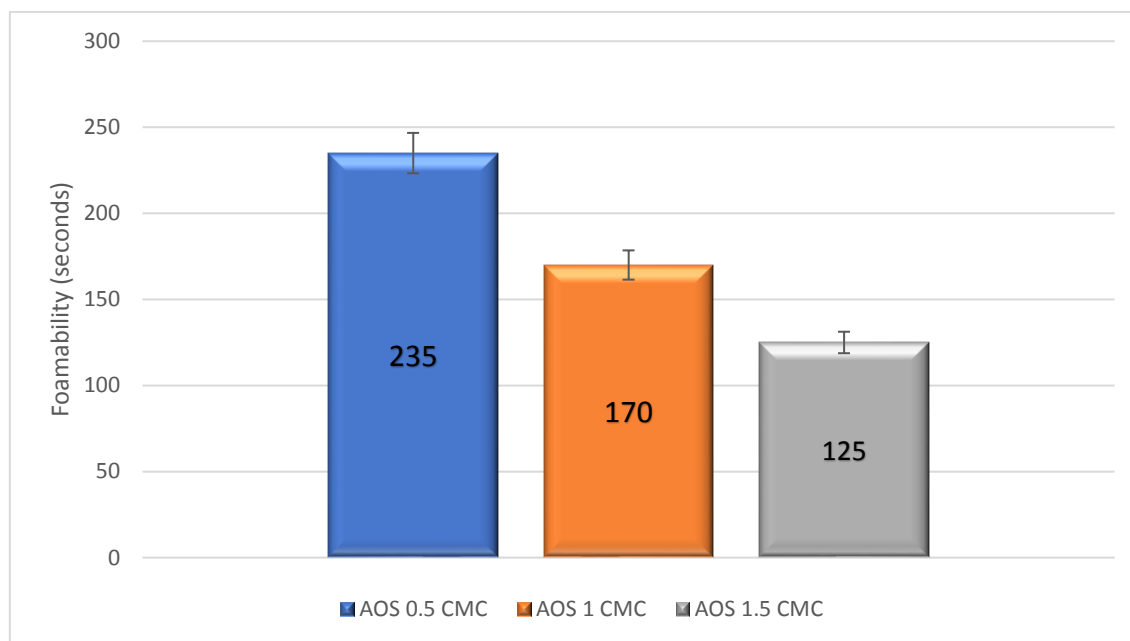
۴-۳-۱ تأثیر غلظت سورفکتانت بر قابلیت فوم‌کنندگی

برای بررسی قابلیت فوم‌کنندگی سورفکتانت AOS، ابتدا ۵۰ ml محلول در سه غلظت CMC ۰/۵، CMC ۱ (۰/۱ wt%) و CMC ۱/۵ (۰/۱۵ wt%) با توجه به روند آماده‌سازی محلول که در بخش قبلی گفته شد، آماده گردید. سپس درون ستاپ ستون فوم ریخته شد و پس از علامت‌گذاری به فاصله‌ی ۲۰ سانتی‌متری از ارتفاع محلول درون ستون فوم، گاز کربن دی‌اکسید با نرخ ۳۰ ml/min که توسط دستگاه تنظیم‌کننده نرخ جریان گاز ثابت می‌شود، از طریق دیسک متخلخل به درون محلول تزریق شد. زمان رسیدن ارتفاع فوم به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری از سطح محلول درون ستون فوم ثبت گردید و به‌عنوان قابلیت فوم‌کنندگی محلول‌های سورفکتانت در نظر گرفته شد (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: ۱/۵ CMC (راست)، ۱ CMC (وسط)، ۰/۵ CMC (چپ)

شکل ۴-۲ لحظه اولیه تشکیل فوم‌های سورفکتانت AOS را در سه غلظت بیان شده نشان می‌دهد. همان طور که در تصاویر هم مشخص است، فوم تشکیل شده در غلظت میسل بحرانی فوم منسجم‌تری را تشکیل داده است. اختلاف زمانی رسیدن فوم‌های حاصل از سه غلظت مذکور به ارتفاع مشخص شده (۲۰ سانتی‌متر)، در شکل ۴-۳ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۳. اثر افزایش غلظت سورفکتانت بر قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS

همان طور که در شکل ۴-۳ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت سورفکتانت از ۰/۵ CMC به ۱ CMC، میزان قابلیت فوم‌کنندگی ۶۵ ثانیه کاهش می‌یابد (فوم سریع‌تر تولید می‌شود)، اما وقتی غلظت سورفکتانت به ۱/۵ CMC افزایش می‌یابد، ۴۵ ثانیه از مدت فوم‌کنندگی کاسته می‌شود. در نتیجه افزایش اولیه غلظت سورفکتانت نتیجه بهتری به همراه دارد و افزایش بیشتر غلظت ماده شیمیایی تأثیر زیادی روی فوم‌کنندگی ندارد. پس می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌ترین غلظت سورفکتانت برای داشتن فوم‌کنندگی مناسب، در غلظت میسل بحرانی اتفاق می‌افتد. همچنین، برای اینکه ماده شیمیایی کمتری استفاده شود که هم از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر باشد و هم نتیجه منطقی‌تر و مطلوب‌تری بدهد، غلظت بهینه سورفکتانت AOS در این پژوهش، همان غلظت بحرانی میسل است که از طریق هدایت‌سنجی به دست آمد و توسط آزمون‌های قابلیت فوم‌کنندگی تأیید شد.

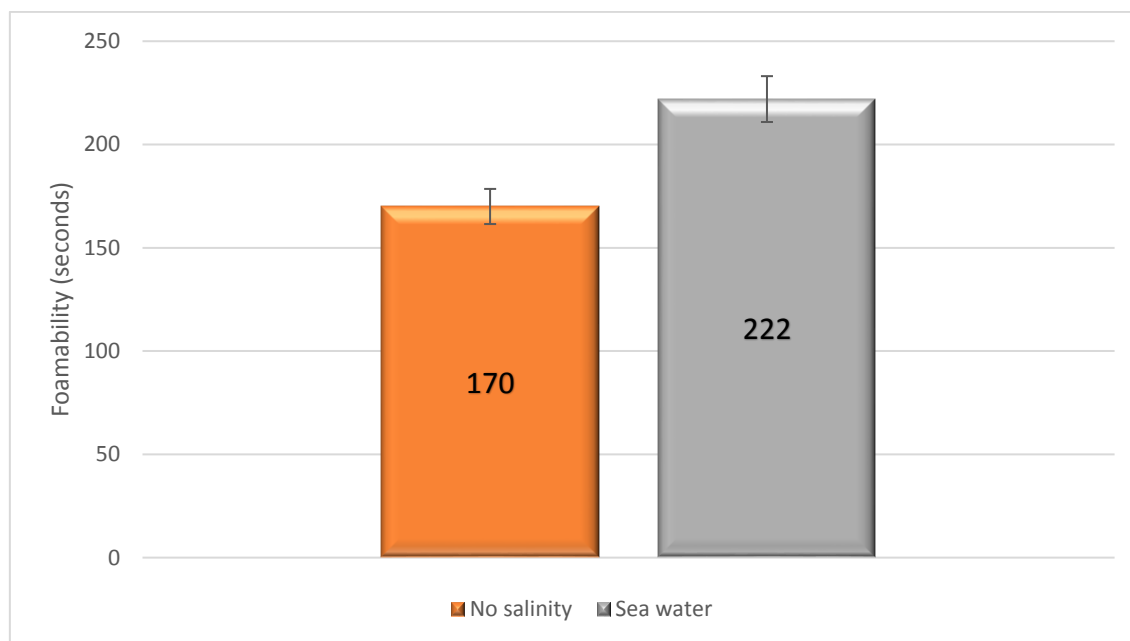
۴-۳-۲ تأثیر شوری بر قابلیت فوم‌کنندگی

با توجه به نتایج بخش قبل که بهترین فوم‌کنندگی در غلظت ۱ CMC اتفاق افتاد، تأثیر حضور شوری روی قابلیت فوم‌کنندگی محلول سورفکتانت در این غلظت از AOS ارزیابی شد. تصاویر بررسی قابلیت فوم‌کنندگی با و بدون شوری در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۴. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: بدون شوری (راست)، با شوری (چپ)

شکل ۴-۴، فوم‌کنندگی سورفکتانت AOS در غلظت ۱ CMC با و بدون شوری آب دریا را نشان می‌دهد. همان طور که انتظار می‌رفت، شوری باعث کاهش قابلیت فوم‌کنندگی سورفکتانت می‌شود و در اینجا زمان رسیدن به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر را افزایش می‌دهد. تأثیر زمانی حضور شوری در شکل ۴-۵ آورده شده است.



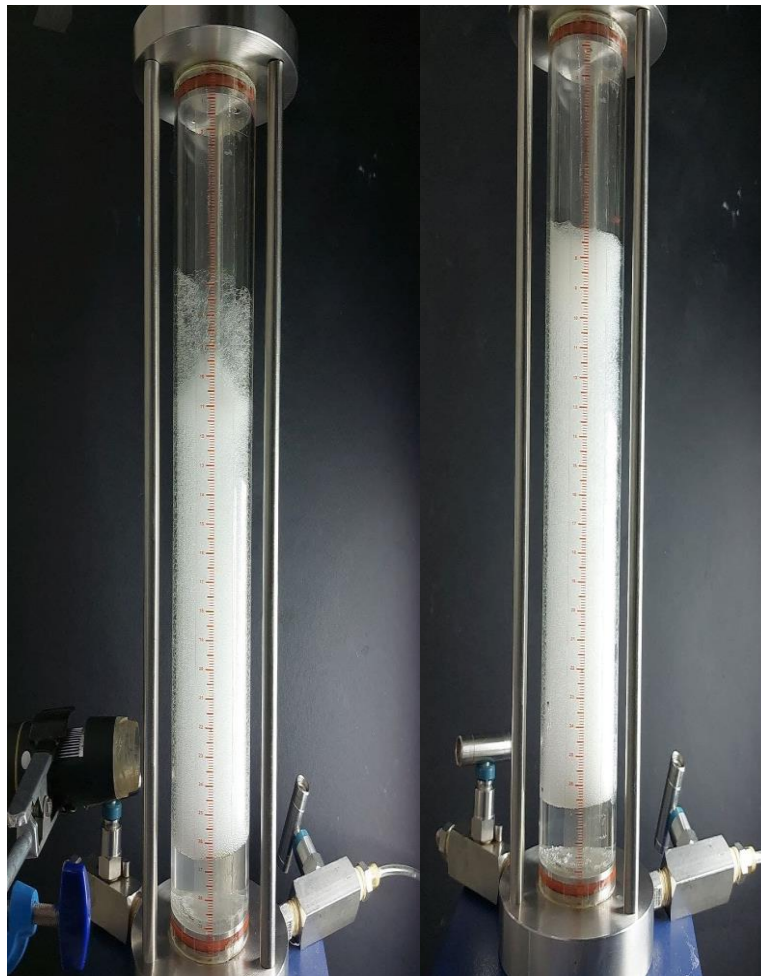
شکل ۴-۵. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS در حضور شوری

همان طور که در شکل ۴-۵ مشهود است، وجود شوری نسبت به زمانی که محلول سورفکتانت در آب دیونیزه آماده می‌شود، از قابلیت فوم‌کنندگی پایین‌تری برخوردار است، یعنی زمان رسیدن فوم را به اندازه ۵۲ ثانیه طولانی‌تر می‌کند، به همین دلیل یک عامل مخرب برای قابلیت فوم‌کنندگی محلول سورفکتانت AOS محسوب می‌شود. همان طور که قبلاً نیز گفته شده است، سورفکتانت آنیونی AOS تعامل خوبی با یون‌های دوظرفیتی نمک‌های موجود در آب‌نمک دارد و تحمل به شوری بالایی دارد، اما آزمون‌های قابلیت فوم‌کنندگی نشان داد که با وجود این ویژگی‌های خوب سورفکتانت AOS (برخلاف سایر سورفکتانت‌ها)، همچنان نمک‌ها برای عملکرد این سورفکتانت مخرب بودند.

۴-۳-۳ تأثیر حضور نانوذره بر قابلیت فوم‌کنندگی

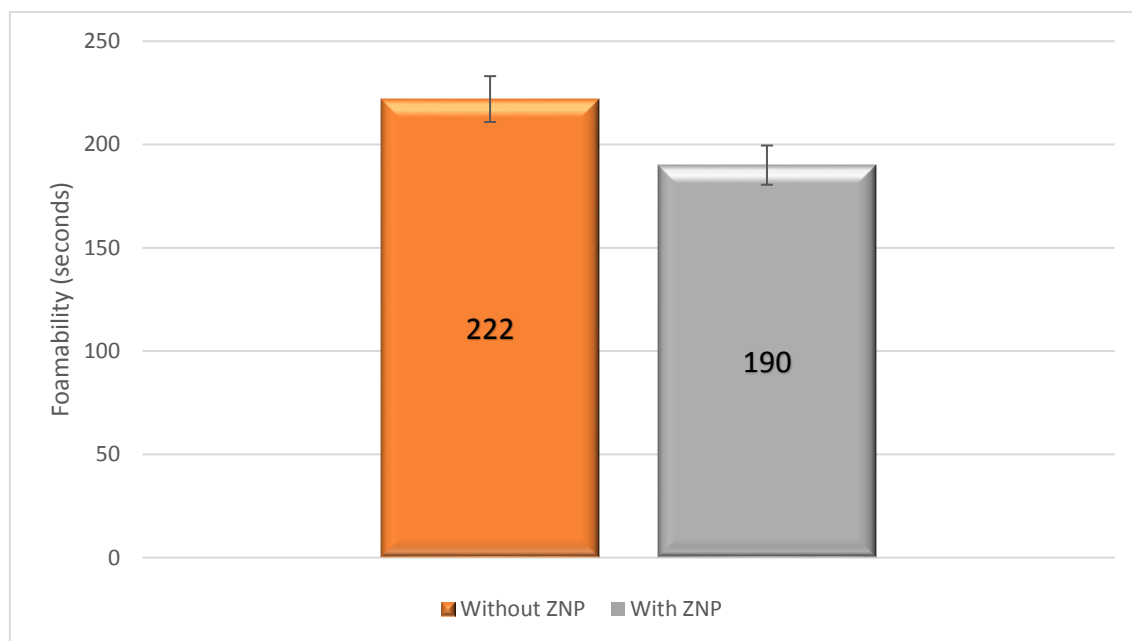
برای بررسی قابلیت فوم‌کنندگی سورفکتانت AOS در حضور نانوذره، با توجه به نتایج بخش‌های قبلی، از غلظت CMC ۱ سورفکتانت و آب‌نمک با شوری دریا استفاده شد. سپس محلول‌های حاوی سورفکتانت و آب دریا با غلظت ۱۰۰ Ppm نقاط کوانتومی اکسید روی آماده شدند و تأثیر غلظت نانوذره نیز بر

قابلیت فوم‌کنندگی سورفکتانت AOS بررسی شد (شکل ۴-۶).



شکل ۴-۶. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: با نانوذره (راست)، بدون نانوذره (چپ)

با توجه به شکل ۴-۷، مشاهده می‌شود که افزودن نقاط کوانتومی اکسید روی در غلظت‌های پایین ۱۰۰ Ppm به محلول سورفکتانت AOS و آب دریا، خاصیت فوم‌کنندگی این محلول را بهبود بخشیده است. درواقع این ذرات باعث شده‌اند که زمان رسیدن به ارتفاع موردنظر در ستون فوم نسبت به زمان عدم حضورشان، کاهش یابد. این نتیجه نشان‌دهنده‌ی عملکرد مثبت و مؤثر نقاط کوانتومی اکسید روی در فرآیند تولید فوم برای بهبود بازیابی نفت است.



شکل ۴-۷. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS با و بدون نانوذره

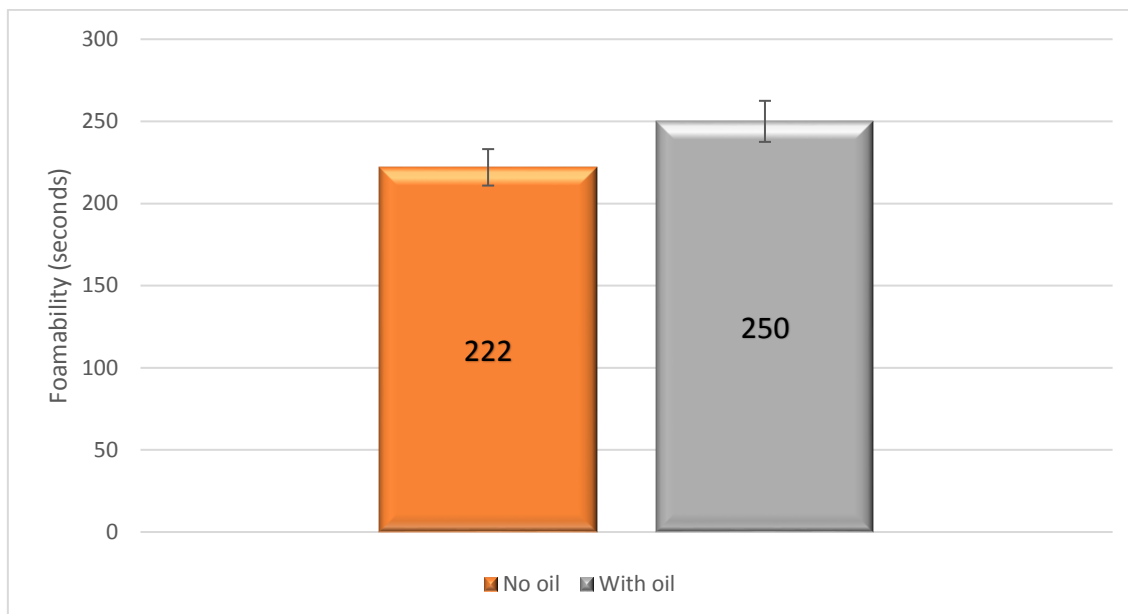
۴-۳-۴ تأثیر نفت بر قابلیت فوم‌کنندگی

برای بررسی قابلیت فوم‌کنندگی سورفکتانت AOS در حضور نفت، طبق نتایج گرفته‌شده، اثر حضور نفت بر قابلیت فوم‌کنندگی سورفکتانت، در شرایط مختلف در حضور نقاط کوانتومی و شوری آب دریا در شکل ۴-۸ بررسی شد.



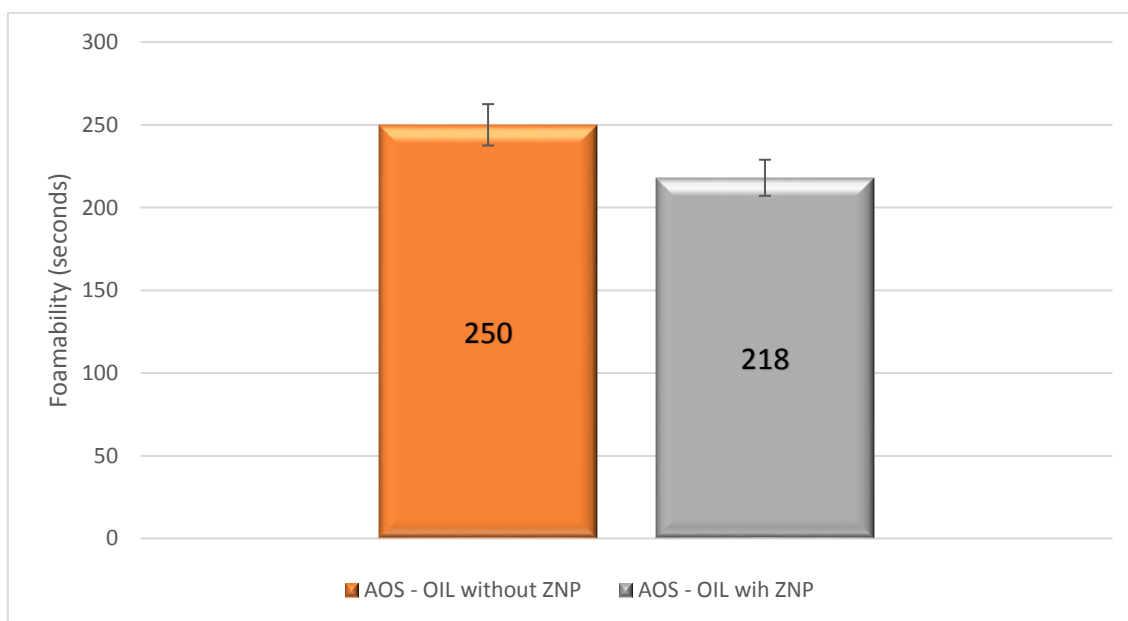
شکل ۴-۸. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS: بدون نفت (راست)، با نفت (وسط)، با نفت و نانوذره (چپ)

از آنجا که نفت یک عامل مخرب برای فوم می‌باشد، بنابراین بررسی میزان اثرگذاری این عامل مخرب بر قابلیت فوم‌کنندگی محلول‌ها اهمیت بسزایی دارد. همان‌طور که از نمودار رسم شده در شکل ۴-۹ مشخص است، حضور نفت بر قابلیت فوم‌کنندگی محلول سورفکتانت AOS و شوری آب دریا اثر مخربی دارد و باعث کاهش قابلیت فوم‌کنندگی محلول AOS می‌شود. بدین ترتیب زمان رسیدن به ارتفاع موردنظر را نسبت به عدم حضور نفت بیشتر می‌کند.



شکل ۴-۹. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS با و بدون نفت

هم‌چنین قابلیت فوم‌کنندگی محلول سورفکتانت AOS در شوری آب دریا در حضور نفت، با افزودن نقاط کوانتومی اکسید روی نیز ارزیابی شد (شکل ۴-۱۰). این نتایج نشان‌دهنده‌ی تأثیر مطلوب این نقاط کوانتومی بر خواص فوم‌کنندگی محلول سورفکتانت است که در حضور نفت، دچار چالش می‌شود و از قابلیت فوم‌کنندگی آن کاسته می‌شود. درواقع با استفاده از این نقاط کوانتومی، می‌توان اثر مخرب حضور نفت را خنثی کرد و بهبود بخشید.



شکل ۴-۱۰. قابلیت فوم‌کنندگی فوم AOS در حضور نفت با و بدون نانوذره

۴-۴ آزمون تعیین پایداری استاتیکی فوم

برای ارزیابی پایداری فوم یک عامل فوم‌کننده در شرایط مختلف، پس از تشکیل فوم و قطع تزریق گاز کربن دی اکسید، زمان رسیدن ارتفاع فوم به نصف ارتفاع اولیه اندازه‌گیری می‌شود و به‌عنوان نیمه‌عمر و معیاری برای پایداری فوم ثبت می‌گردد. همان طور که در فصل‌های قبل بیان شد، فوم تولید شده تحت تأثیر عواملی مانند تخلیه مایع درون لاملا به واسطه اثرگذاری نیروهای گرانشی و هم‌چنین ادغام و انعقاد حباب‌ها، در طی زمان از بین می‌رود و ارتفاع آن کاهش می‌یابد. از آنجایی که کاهش ارتفاع فوم با زمان معیار پایداری آن است، هرچه ارتفاع فوم با سرعت کمتری کاهش یابد، آن فوم پایدارتر است. پس از تعیین مقدار غلظت بحرانی میسل سورفکتانت AOS، محلول سورفکتانت برای آزمایش تعیین پایداری استاتیکی فوم AOS در شرایط مختلف، شامل: الف) تغییر غلظت سورفکتانت، ب) حضور شوری، پ) حضور نانوذره، ت) حضور نفت، به میزان ۵۰ ml آماده گردید و اثر عوامل بهبوددهنده پایداری فوم مانند نانوذره و اثر عوامل مخرب پایداری فوم مانند نفت و شوری ارزیابی شدند. نتایج زیر برای عوامل مختلف به دست آمد که در هر بخش به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

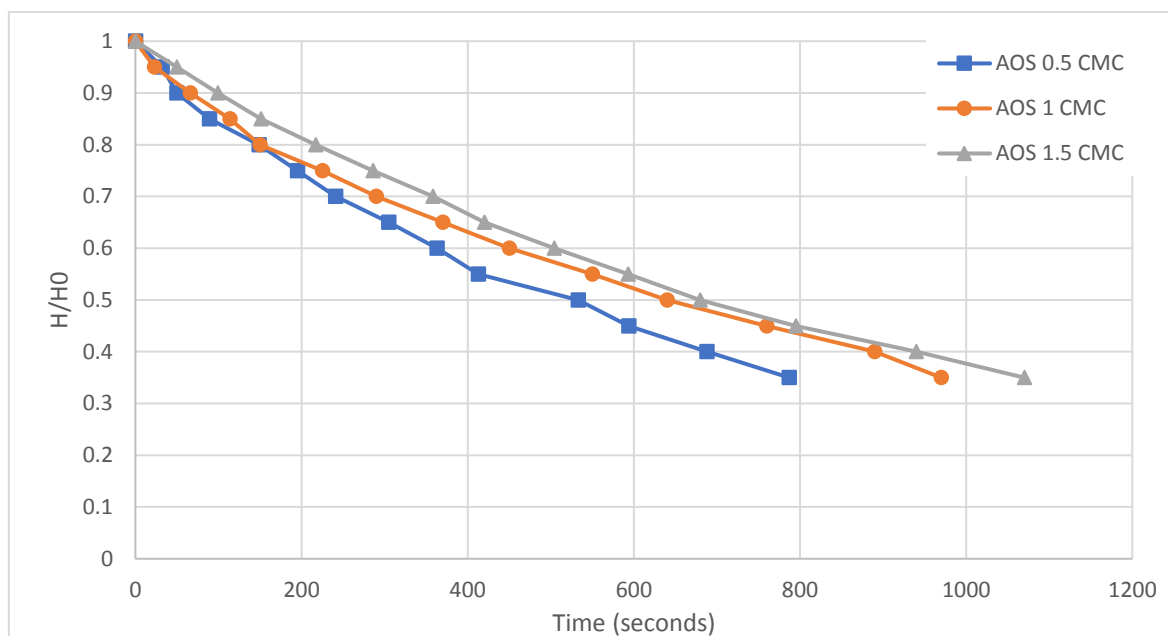
۴-۴-۱ تأثیر غلظت سورفکتانت بر پایداری استاتیکی فوم

برای بررسی پایداری فوم سورفکتانت AOS، ابتدا ۵۰ ml محلول در سه غلظت CMC ۰/۵ wt%)، CMC ۱ wt%) ۰/۱ wt%) و CMC ۱/۵ wt%) ۰/۱۵ wt%) آماده گردید. سپس درون ستاپ ستون فوم ریخته شد و پس از تشکیل فوم و رسیدن به ارتفاع اولیه فوم، زمان رسیدن به ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر (نیمه‌عمر) ثبت گردید (شکل ۴-۱۱).



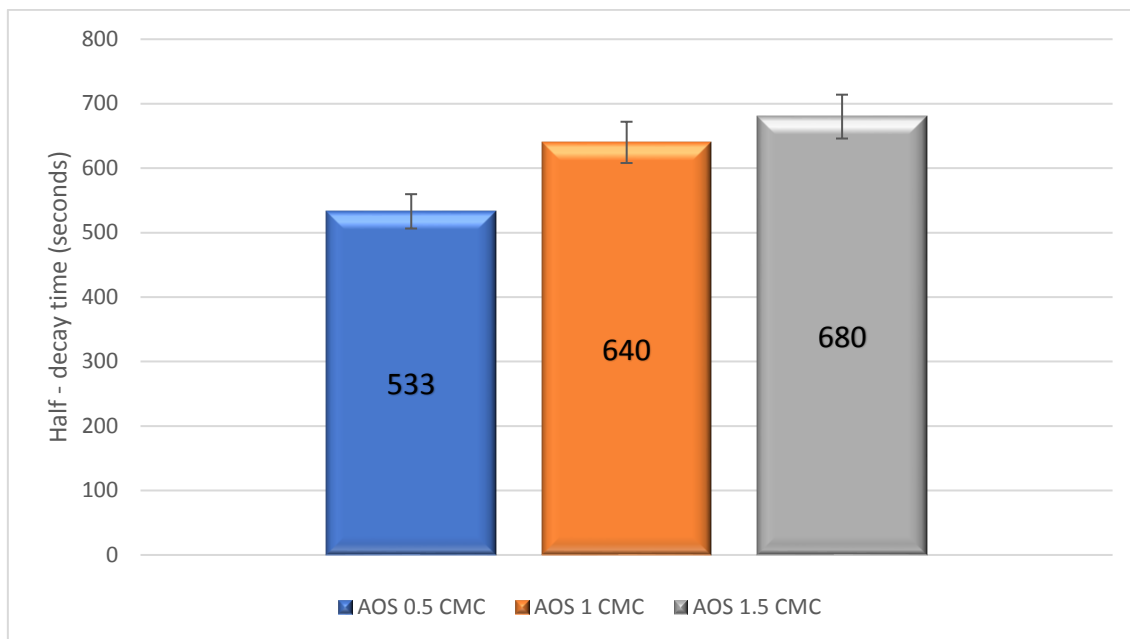
شکل ۴-۱۱. پایداری فوم AOS: ۱/۵ CMC (راست)، ۱ CMC (وسط)، ۰/۵ CMC (چپ)

از آنجایی که افزایش میزان پایداری فوم به دلیل کاهش سرعت تخلیه فوم است، بنابراین با افزایش غلظت سورفکتانت جذب آن روی لاملا که سطح مشترک بین دو فاز است بیشتر می‌شود و با کاهش سرعت نازک شدن فیلم لاملا، موجب پایداری بیشتر شدن لاملا فوم می‌شود. همان طور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت سورفکتانت زمان پایداری فوم نیز افزایش یافته است.



شکل ۴-۱۲. نمودار حاصل از بی بعد سازی اثر افزایش غلظت سورفکتانت بر پایداری فوم AOS

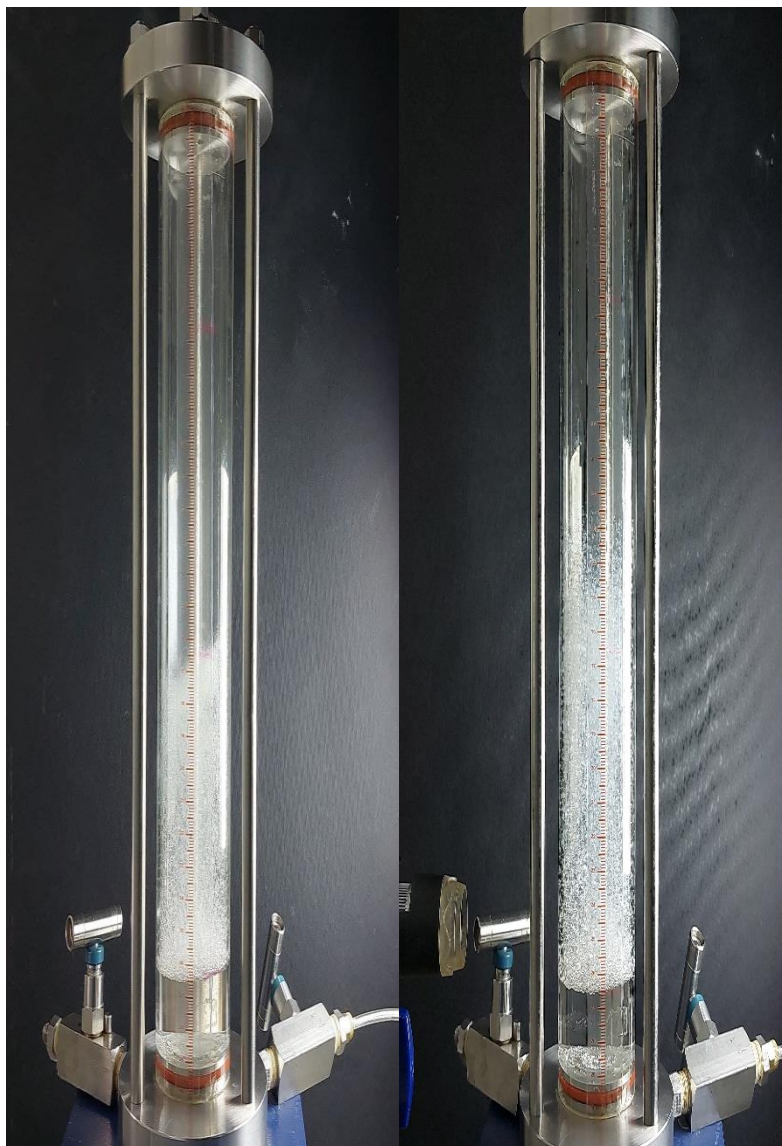
با بررسی نتایج حاصل از آزمون‌های پایداری فوم سورفکتانت در سه غلظت مورد نظر، این نتیجه بدست آمد که هرچه میزان غلظت سورفکتانت افزایش یابد میزان پایداری نیز بیشتر می‌شود (شکل ۴-۱۳). اما برای رسیدن به غلظت بهینه‌ای از سورفکتانت AOS، ذکر این نکته حائز اهمیت است که افزایش پایداری فوم با افزایش غلظت سورفکتانت بدان معنی نیست که هرچه غلظت افزایش داده شود، پایداری نیز به همان نسبت افزایش یابد؛ بلکه نکته مهم این است که همان طور که قبلاً گفته شد، با رسیدن غلظت سورفکتانت به غلظت بحرانی میسل، مولکول‌های سورفکتانت‌ها به هم می‌پیوندند و تشکیل میسل‌ها را می‌دهند. بنابراین افزایش میزان ماده شیمیایی تأثیر شگرفی بر عملکرد سورفکتانت ندارد و عملاً افزایش بیشتر مقدار سورفکتانت در محلول، باعث هدر رفتن آن می‌شود. این قضیه با نتایج حاصل از این پژوهش نیز ثابت می‌شود. زیرا شدت افزایش پایداری فوم با افزایش غلظت سورفکتانت AOS از ۰/۵ CMC به ۱ CMC، خیلی بیشتر از افزایش غلظت از ۱ CMC به ۱/۵ CMC می‌باشد. بنابراین غلظت بهینه سورفکتانت AOS همان غلظت ۱ CMC (۰/۱ wt%) است.



شکل ۴-۱۳. اثر افزایش غلظت سورفکتانت بر پایداری فوم AOS

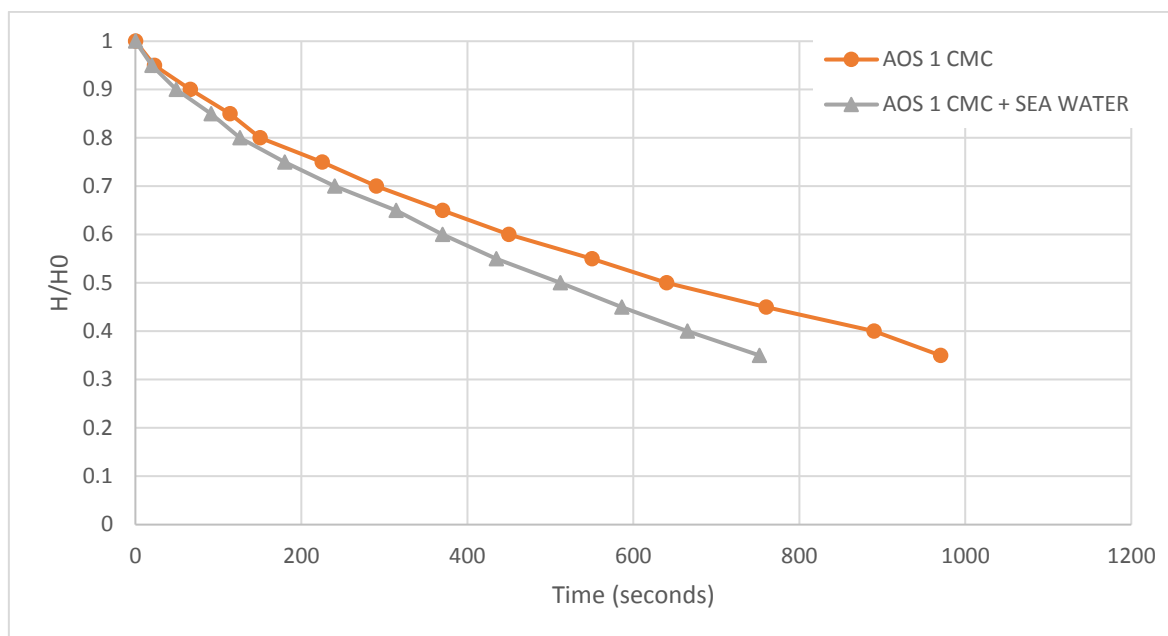
۴-۴-۲ تأثیر شوری بر پایداری استاتیکی فوم

برای بررسی پایداری فوم سورفکتانت AOS در حضور شوری، با توجه به نتایج بخش قبل که بهترین پایداری فوم در غلظت ۱ CMC اتفاق افتاد، تأثیر حضور شوری بر پایداری فوم محلول سورفکتانت در این غلظت از AOS ارزیابی شد (شکل ۴-۱۴).



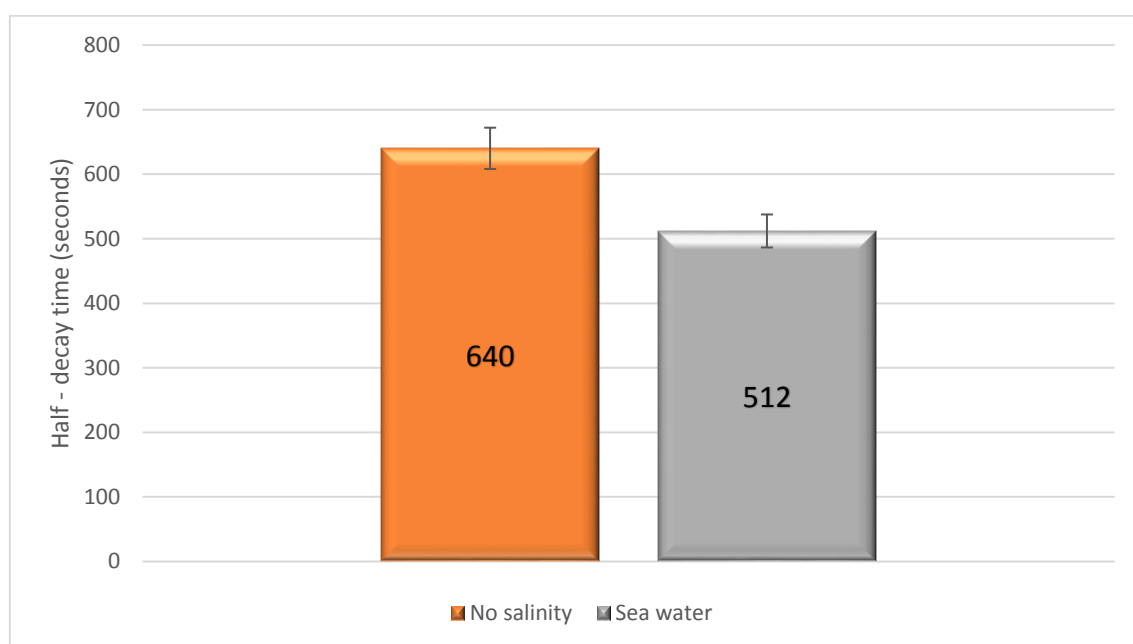
شکل ۴-۱۴. پایداری فوم AOS: بدون شوری (راست)، با شوری (چپ)

تأثیر مخرب شوری بر پایداری فوم حاصل از سورفکتانت AOS، به وضوح در شکل ۴-۱۵ قابل مشاهده می‌باشد. دلیل اینکه شوری باعث ریزش سریع‌تر فوم می‌شود، این است که جذب سورفکتانت در لاملا می‌شود. فوم به نیروی الکترواستاتیکی موجود در سیستم فوم بستگی دارد. بنابراین افزودن نمک‌ها به محلول فوم‌کننده، منجر به افزایش نیروی دافعه محیط می‌شود. این عمل باعث کاهش جذب سورفکتانت در لاملا می‌شود که پیامد آن فروریختن سریع‌تر لاملا و به طبع آن، کاهش پایداری فوم است.



شکل ۴-۱۵. نمودار حاصل از بی بعد سازی پایداری فوم AOS در حضور شوری

با توجه به شکل ۴-۱۶، با افزایش میزان شوری از پایداری فوم کاسته شده است. این کاهش میزان پایداری فوم برحسب شوری، با افزایش غلظت آن نیز افزایش می یابد. یعنی هرچقدر نمک بیشتری در تماس با محلول فوم کننده قرار بگیرد، طبق نکاتی که گفته شد، نیروی دافعه بزرگ تر و در نتیجه جذب سورفکتانت و پایداری فوم کمتری خواهد داشت.



شکل ۴-۱۶. پایداری فوم AOS در حضور شوری

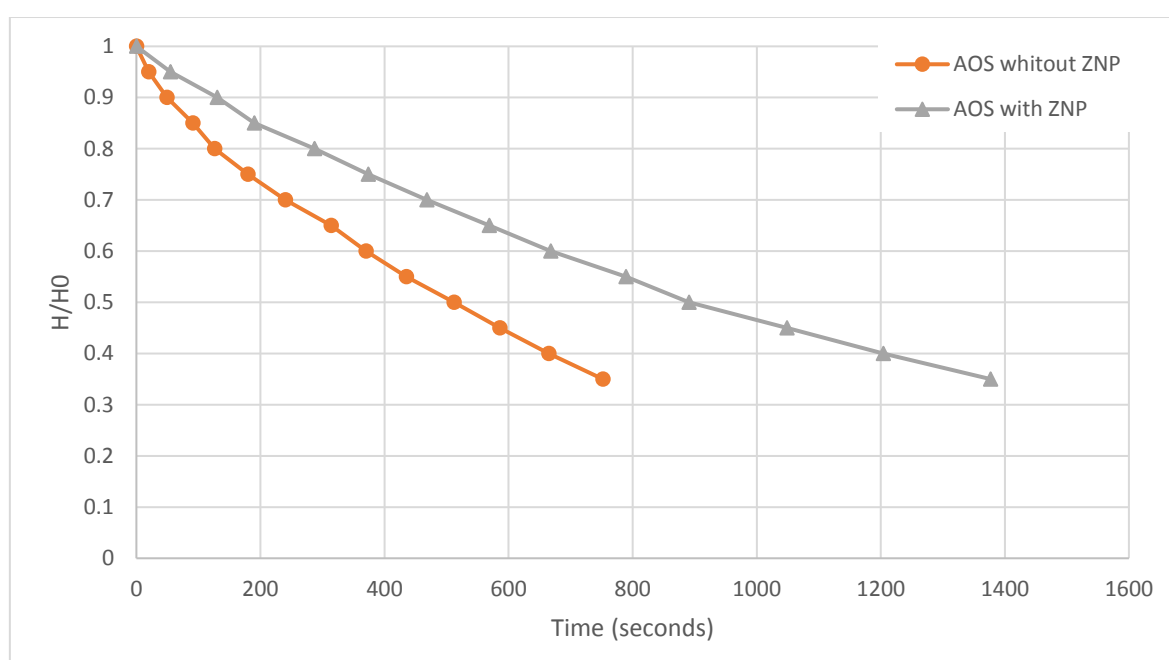
۳-۴-۴ تأثیر حضور نانوذره بر پایداری استاتیکی فوم

برای بررسی پایداری فوم سورفکتانت AOS در حضور نانوذره، با توجه به نتایج بخش‌های قبلی، از غلظت ۱ CMC سورفکتانت و آب‌نمک با شوری آب دریا استفاده گردید و تأثیر غلظت ۱۰۰ Ppm نقاط کوانتومی اکسید روی نیز بر پایداری فوم ارزیابی شد (شکل ۴-۱۷).



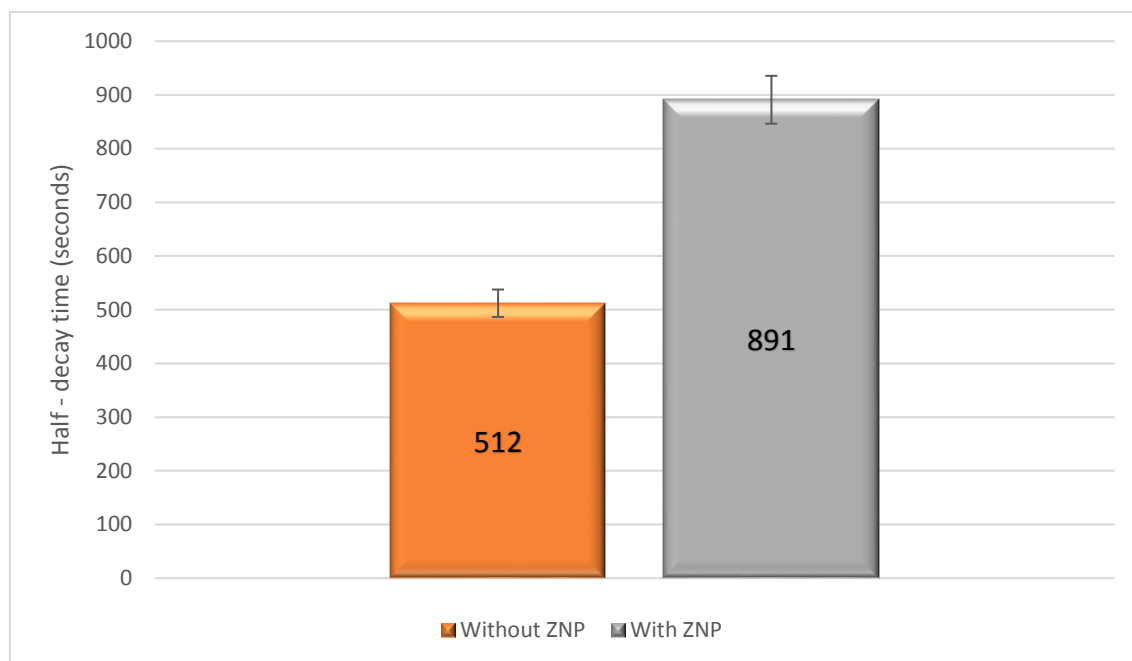
شکل ۴-۱۷. پایداری فوم AOS: بدون نانوذره (سمت راست)، با نانوذره (سمت چپ)

مطابق نتایج، حضور نقاط کوانتومی اکسید روی تأثیر بسیار قابل توجهی بر پایداری فوم گذاشته است که در شکل ۴-۱۸ آورده شده است. این ذرات با قرار گرفتن در لاملای فوم حاصل از سورفکتانت AOS، باعث افزایش قابل ملاحظه زمان پایداری فوم شده‌اند که نتیجه بسیار خوبی محسوب می‌شود. با توجه به اندازه کوچک‌تر این نقاط کوانتومی در مقایسه با اندازه بزرگ‌تر این ذرات و همچنین پایداری کلئیدی بالاتر، بدست آمدن این نتایج شگفت‌انگیز چندان دور از انتظار نبود.



شکل ۴-۱۸. نمودار حاصل از بی‌بعد سازی پایداری فوم در حضور نانوذره

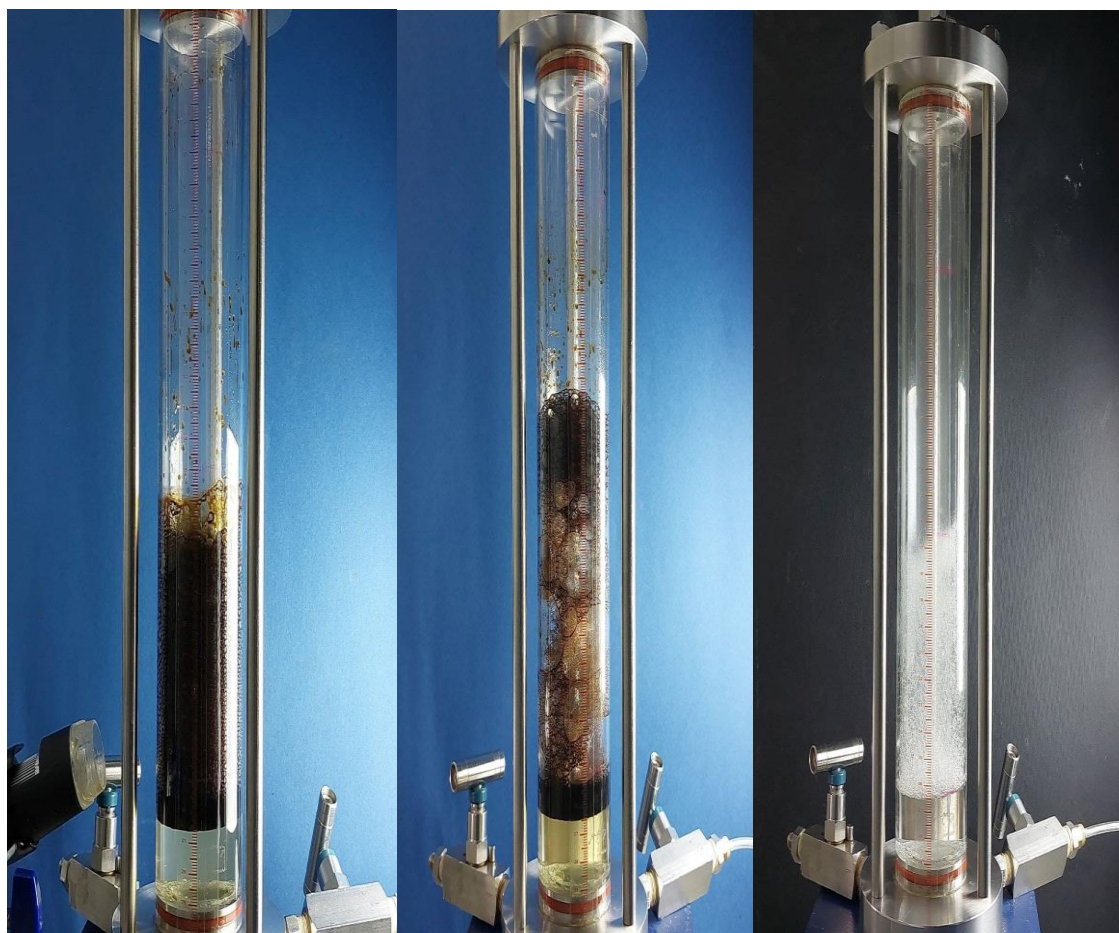
همان طور که در شکل ۴-۱۹ ملاحظه می‌شود، زمان تخریب فوم حاصل از سورفکتانت و نانوذره، نسبت به زمانی که نانوذره حضور نداشته است بسیار بیشتر است (۷۴ درصد). این بدان معنی است که حضور این نقاط کوانتومی، موجب افزایش پایداری لاملای فوم و کاهش زمان نازک شدن آن می‌شود که فوم پایداری را ایجاد می‌کند.



شکل ۴-۱۹. پایداری فوم AOS در حضور نانوذره

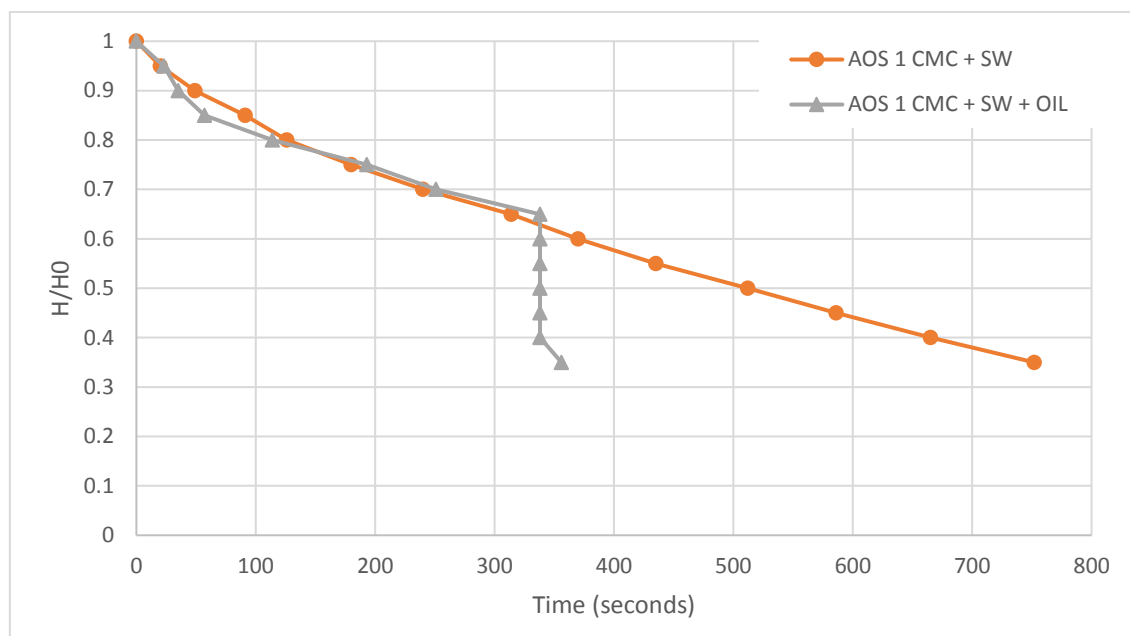
۴-۴-۴ تأثیر نفت بر پایداری استاتیکی فوم

برای بررسی پایداری فوم سورفکتانت AOS در حضور نفت، طبق نتایج بدست آمده، اثر حضور نفت بر پایداری فوم سورفکتانت، با و بدون حضور نانوذره بررسی شد (شکل ۴-۲۰).



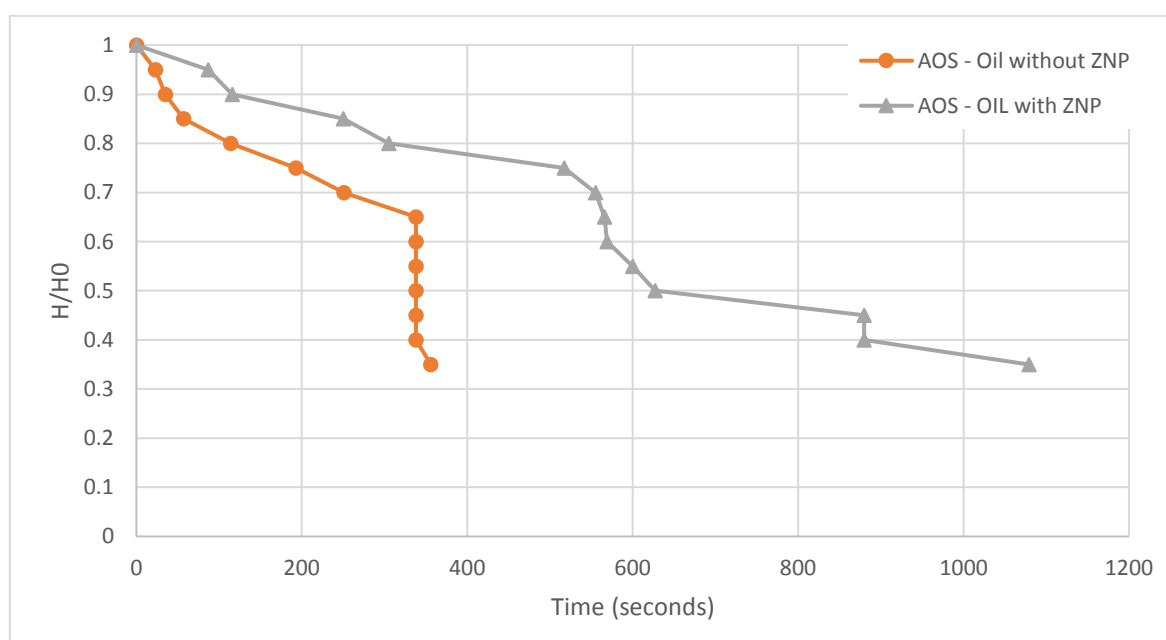
شکل ۴-۲۰. پایداری فوم AOS: بدون نفت (راست)، ب) با نفت (وسط)، پ) با نفت و نانوذره (چپ)

اثر مخرب نفت بر پایداری فوم در شکل ۴-۲۱ به وضوح مشاهده می‌شود. این اثر مخرب باعث افزایش شدید سرعت ریختن فوم می‌شود و فوم را به سرعت تخریب می‌کند. این امر سبب کاهش بسیار زیاد زمان نیمه‌عمر فوم می‌شود. همان طور که از شکل مشخص است، تأثیر شدید نفت بر پایداری فوم حاصل از محلول سورفکتانت، یک چالش بزرگ در زمینه ازدیاد برداشت نفت است که برای بهبود آن، نانوذرات مورد استفاده قرار می‌گیرند.



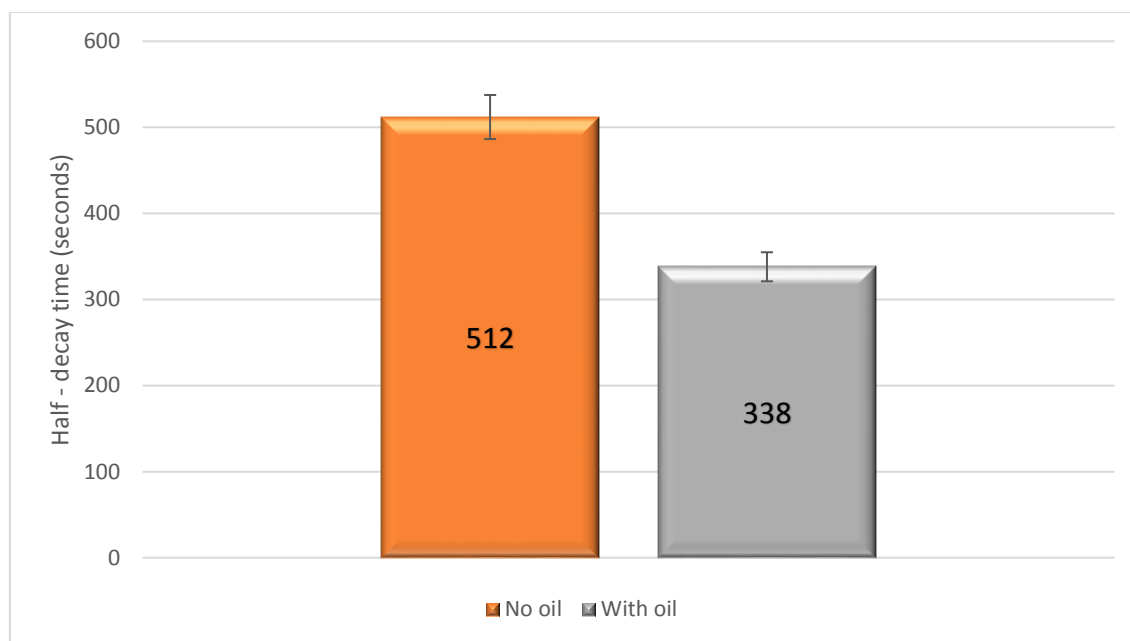
شکل ۴-۲۱. نمودار حاصل از بی بعد سازی پایداری فوم AOS در حضور نفت

همان طور که از نتایج سایر مقالات که حضور نانوذرات را بررسی کرده اند انتظار می رفت، نقاط کوانتومی اکسید روی نسبت به عدم حضور آن ها، باعث بهبود پایداری فوم در تماس با نفت شدند (شکل ۴-۲۲). با این حال ویژگی تخریب کنندگی نفت حتی در حضور نانوذره هم وجود دارد و باعث از بین رفتن فوم در مدت زمان کوتاهی نسبت به زمان عدم حضور نفت می شود.



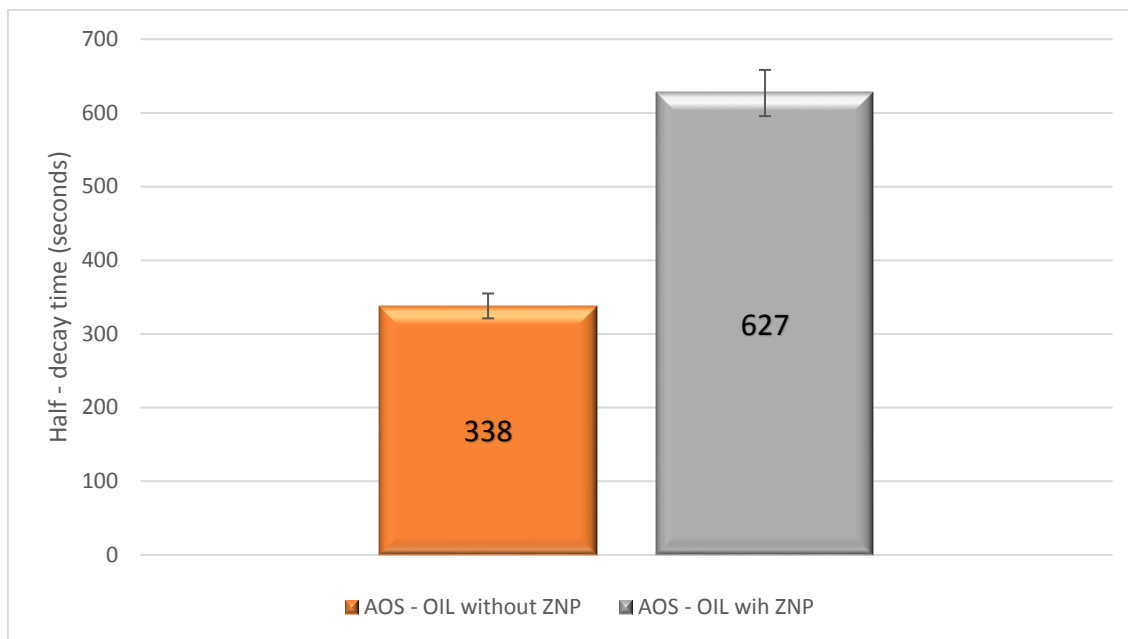
شکل ۴-۲۲. نمودار حاصل از بی بعد سازی پایداری فوم AOS در حضور نفت با و بدون نانوذره

مطابق شکل ۴-۲۳، تأثیر مخرب نفت بر زمان نیمه عمر فوم حاصل از سورفکتانت AOS به تنهایی با شوری آب دریا مشاهده می شود. به صورت تقریبی حضور نفت باعث کاهش ۳۴ درصدی زمان نیمه عمر شده است که نشان از قدرت تخریب کنندگی نفت دارد.



شکل ۴-۲۳. پایداری فوم AOS در حضور نفت

با وجود مخرب بودن نفت برای سیستم فوم، حضور نقاط کوانتومی اکسید روی موجب بهبود حدود ۸۶ درصدی نیمه عمر و افزایش زمان تخریب فوم شده است (شکل ۴-۲۴). این امر موجب می شود نتایج حاصل از این بخش برای کاربرد فوم های حاوی این نانوذره برای بهبود عملکرد فوم در هنگام تماس با نفت، امیدبخش باشد.



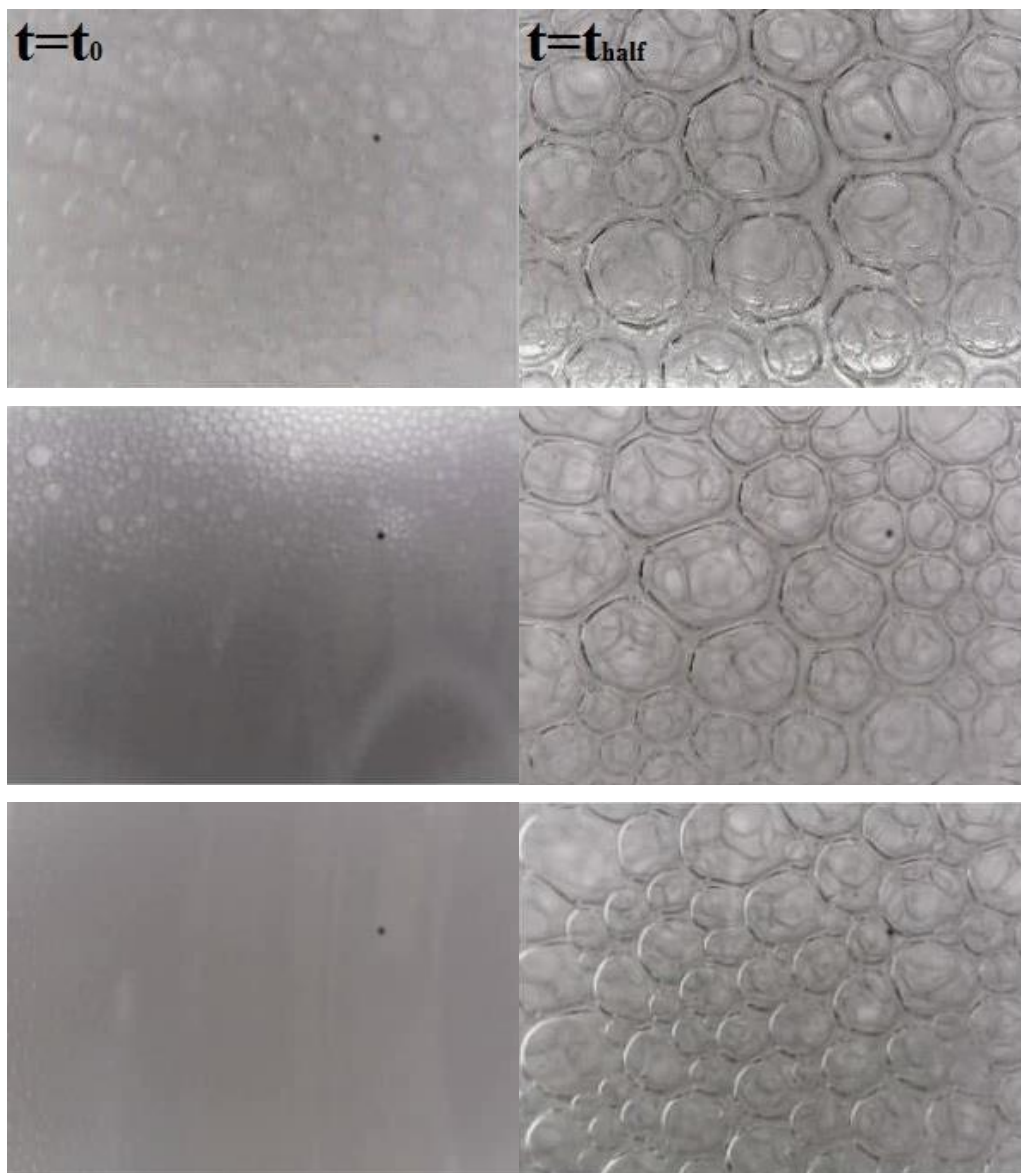
شکل ۴-۲۴. پایداری فوم AOS در حضور نفت با و بدون نانوذره

۴-۵ بررسی تأثیر عوامل مختلف بر شکل حبابها

عوامل مختلف مثل شوری، غلظت سورفکتانت و غیره همان طور که بر خاصیت فوم‌کنندگی و پایداری فوم تأثیر می‌گذارند، انتظار می‌رود که بر اندازه حبابها نیز اثر بگذارند.

۴-۵-۱ تأثیر غلظت سورفکتانت

شکل ۴-۲۵، تصاویر مربوط به شروع تشکیل فوم (چپ) و تصاویر مربوط به زمان رسیدن به نیمه‌عمر (راست) را نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر، افزایش غلظت سورفکتانت باعث ریزتر شدن حبابها و در نتیجه پایداری بیشتر فومها می‌شود. همان طور که در خصوص قابلیت فوم‌کنندگی و پایداری فوم در غلظت بهینه CMC ۱ نتایج مطلوب‌تری به دست آمد، در بررسی اندازه حبابها نیز افزایش غلظت از CMC ۰/۵ به CMC ۱ بیشتر از حالت بعدی، باعث ریزتر شدن حبابها شد.

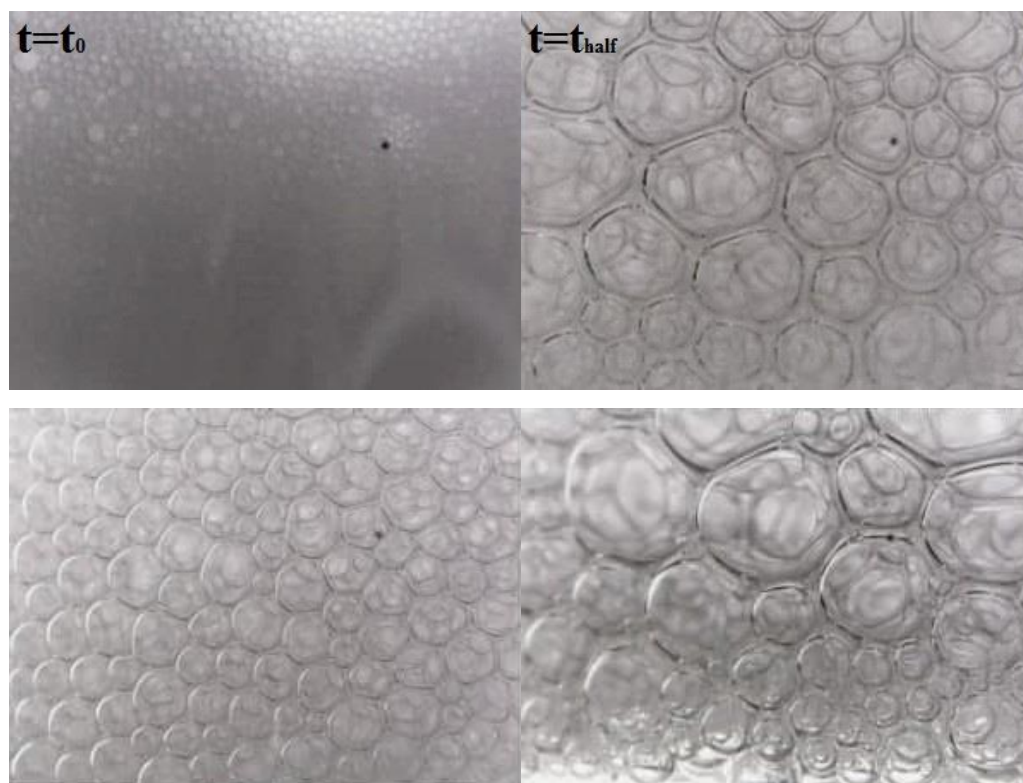


شکل ۴-۲۵. مقایسه بصری اندازه حباب‌ها: غلظت CMC ۱/۵ (بالا)، غلظت CMC ۱ (وسط)، غلظت CMC ۱/۵ (پایین)

۴-۵-۲ تأثیر حضور شوری

حضور شوری باعث ایجاد حباب‌های درشت‌تر طبق شکل ۴-۲۶ شده است. این درشت‌شدگی حباب‌ها باعث ایجاد پایداری کمتر فوم می‌شود. این مشاهده با نتایج به دست آمده در بخش پایداری فوم‌ها تأیید می‌شود. هم‌چنین این درشت‌تر شدن حباب‌ها بر قابلیت فوم‌کنندگی نیز تأثیر منفی می‌گذارد. بنابراین

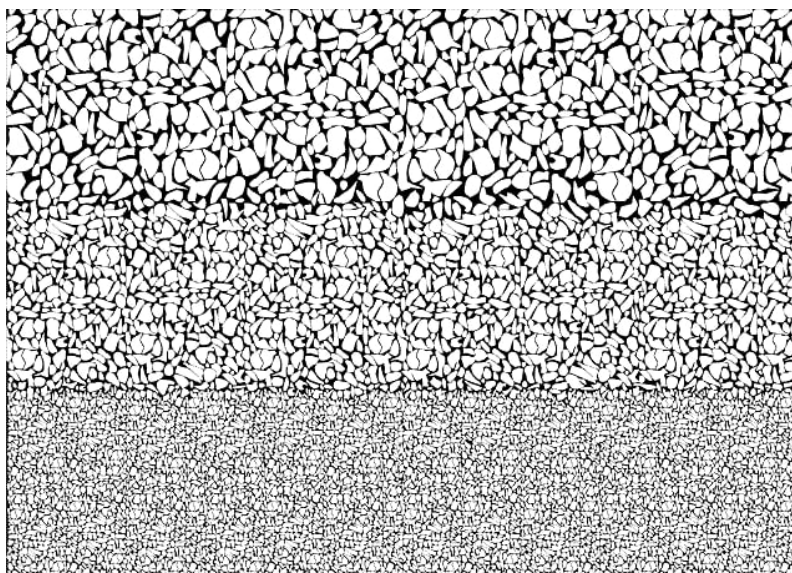
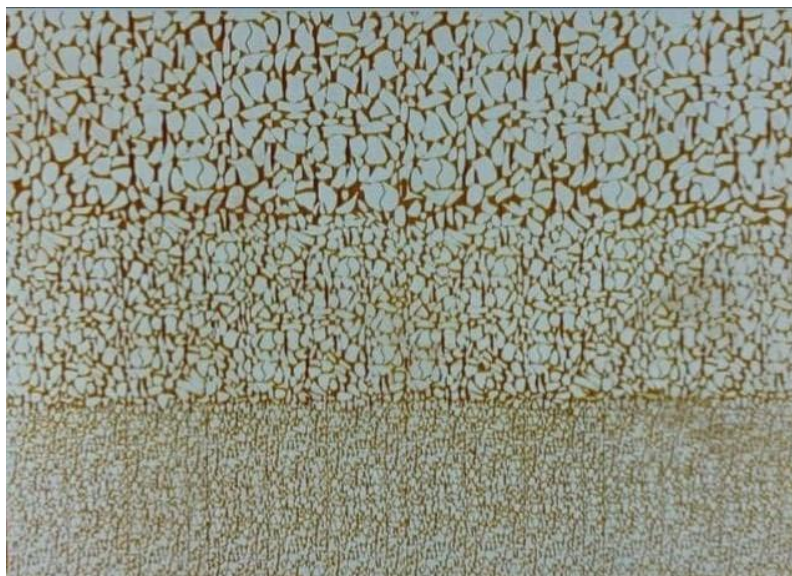
علت تأثیر منفی شوری بر پایداری و قابلیت فوم‌کنندگی، می‌تواند درشت‌تر کردن حباب‌ها نسبت به زمان عدم حضورش باشد.



شکل ۴-۲۶. مقایسه بصری اندازه حباب‌ها در غلظت CMC ۱: بدون شوری (بالا)، (ب) با شوری (پایین)

۴-۶ آزمون دینامیکی و بازیابی نفت توسط میکرومدل

بعد از بررسی‌های انجام شده در آزمون‌های استاتیکی برای پایداری فوم در شرایط مختلف و تعیین غلظت بهینه از سورفکتانت، عملکرد فوم در محیط متخلخل ارزیابی شد. برای این کار دو آزمون تزریق فوم AOS و فوم AOS - نقاط کوانتومی اکسید روی انجام شد. در ابتدا میکرومدل اشباع از نفت شد که تصویر آن به همراه تصویر باینری شده در شکل ۴-۲۷ آورده شده است.



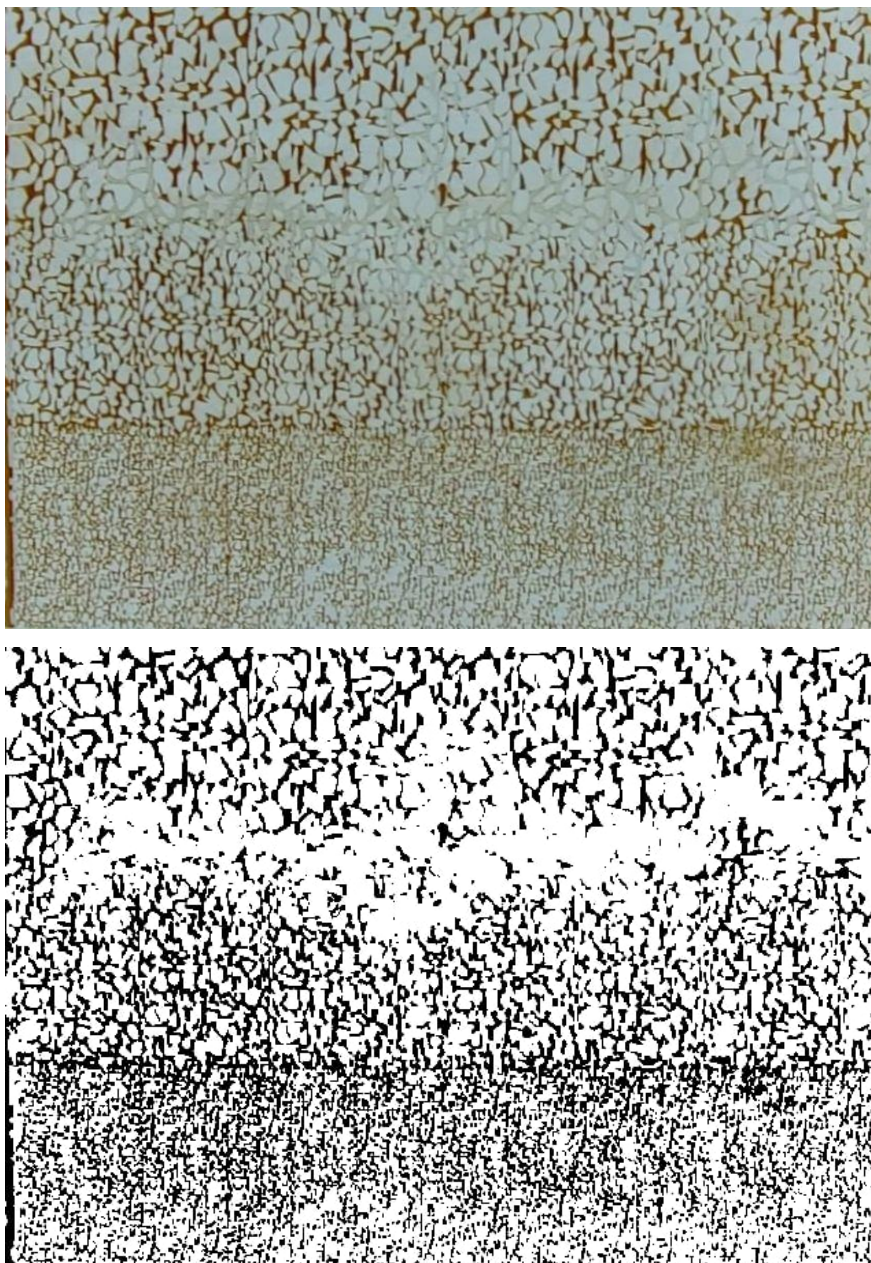
شکل ۴-۲۷. میکرومدل اشباع شده از نفت (بالا) و تصویر باینری آن (پایین)

همان طور که قبلاً بیان شد و در اینجا نیز قابل مشاهده است، میکرومدل از سه ناحیه با نفوذپذیری کم تا زیاد تشکیل شده است تا روند انحراف سیال از ناحیه با نفوذپذیری بالا به سمت ناحیه با نفوذپذیری کم بررسی شود.

در این مرحله تزریق فوم تا جایی ادامه پیدا می‌کند که دیگر بازیابی نفتی مشاهده نشود. پس از آن تزریق را متوقف کرده و همانند محاسبه اشباع اولیه نفت، میزان نفت باقی‌مانده در میکرومدل اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین میزان بازیابی که توسط تزریق فوم انجام شده است به دست می‌آید. با محاسبه بازیابی نهایی، اثرگذاری نقاط کوانتومی در فرآیند ازدیاد برداشت نفت و اثر هم‌افزایی آن با سورفکتانت AOS مشخص می‌شود.

۴-۶-۱ آزمون تزریق فوم AOS بدون نانوذره

اولین آزمونی که با استفاده از میکرومدل انجام شد، بازیابی نفت توسط فوم حاصل از سورفکتانت AOS با غلظت بهینه ۰/۱ درصد وزنی به دست آمده از بخش استاتیک بود. پس از اینکه میکرومدل به‌طور کامل از نفت اشباع شد، تزریق فوم آغاز می‌شود. تزریق فوم درون میکرومدل تا زمانی که هیچ‌گونه بازیابی نفت بیشتری انجام نشود، ادامه می‌یابد. آزمون تزریق فوم به مدت یک ساعت به طول انجامید. شکل ۴-۲۸ لحظاتی پس از ورود فوم به میکرومدل را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۸. پانزده دقیقه پس از تزریق فوم AOS در میکرومدل

همان طور که در شکل ۴-۲۸ مشاهده می‌شود، پس از تزریق و ورود فوم به منافذ، فوم به سرعت از طریق مسیر بین دو ناحیه با نفوذپذیری زیاد و متوسط، به درون منافذ نفوذ می‌کند و نفت را جاروب می‌کند. با این حال، هنوز هیچ نفوذی در ناحیه با نفوذپذیری کم رخ نداده است. در این حالت $3/54\%$ بازیابی انجام شده است.

پس از گذشت ۳۰ دقیقه از زمان تزریق، مشاهده شد که فوم AOS با جاروب بخش اعظمی از نواحی با نفوذپذیری بالا و متوسط، از طریق مسیر بین دو ناحیه‌ی با نفوذپذیری متوسط و کم به درون ناحیه با نفوذپذیری کم نفوذ می‌کند و شروع به جاروب و بازیابی نفت در این ناحیه می‌کند. در این حالت ۳۲/۷۱ درصد بازیابی اتفاق افتاده است (شکل ۴-۲۹).



شکل ۴-۲۹. ۳۰ دقیقه پس از تزریق فوم AOS در میکرومدل

در شکل ۴-۳۰، تصویر نهایی از بازیابی نفت توسط فوم AOS در میکرومدل مشاهده می‌شود. همان طور که گفته شد، تزریق تا جایی ادامه پیدا می‌کند که هیچ بازیابی بیشتری حاصل نشود. پس از قطع تزریق، مقدار نفت باقی‌مانده در میکرومدل محاسبه می‌شود تا میزان بازیابی به دست آید. میزان بازیابی نهایی انجام شده توسط فوم AOS در این قسمت پس از حدود یک ساعت تزریق ۳۷/۶٪ به دست آمد.



شکل ۴-۳۰. اتمام بازیابی پس از یک ساعت تزریق فوم AOS در میکرومدل

۴-۶-۲ آزمون تزریق فوم AOS با نانوذرات کوانتومی اکسید روی

پس از تزریق فوم AOS، فوم تولیدشده با محلول سورفکتانت - نقاط کوانتومی اکسید روی در میکرومدل تزریق شد. شرایط به طور دقیق مانند مرحله ی قبل است. این تزریق نیز تا زمانی ادامه یافت که دیگر هیچ بازیابی نفت بیشتری مشاهده نشد. طول مدت این آزمایش حدود ۴۰ دقیقه بود. شکل ۴-۳۱ ده دقیقه بعد از ورود فوم است.



شکل ۴-۳۱. ده دقیقه پس از تزریق فوم AOS - نانوذره در میکرومدل

مطابق شکل ۴-۳۱، همانند تزریق فوم AOS به تنهایی سیال پس از ورود به میکرومدل به ناحیه با نفوذپذیری بالا نفوذ می کند و نفت را جاروب می کند. پس از آنکه بخش زیادی از دو ناحیه بالایی جاروب شدند، فوم به ناحیه با نفوذپذیری پایین نفوذ می کند و بازیابی از این ناحیه را آغاز می کند.

همان طور که در شکل ۴-۳۲ مشخص است، همانند حالت قبلی تزریق فوم تا جایی ادامه یافت که هیچ نفت اضافه ای بازیابی نشد. در این مرحله، فوم حاصل از هم افزایی سورفکتانت و نانوذره در میکرومدل اشباع شده از نفت، توانسته است حدود ۹۷/۵۵٪ نفت را جاروب کند.



شکل ۴-۳۲. پایان تزریق فوم AOS - نانوذره در میکرومدل

۴-۶-۳ آنالیز نتایج حاصل از آزمون‌های دینامیکی میکرومدل

با توجه به نتایج به دست آمده با آزمون بازیابی نفت، مشخص شد که میزان بازیابی انجام شده توسط فوم حاصل از هم‌افزایی نقاط کوانتومی و سورفکتانت، حدود ۶۰ درصد بالاتر از بازیابی فوم سورفکتانت تنها است (شکل ۴-۳۳). این امر نشان‌دهنده‌ی مطلوب بودن استفاده از نقاط کوانتومی در فرآیند تولید فوم و بازیابی نفت است.



شکل ۴-۳۳. مقایسه میزان بازیابی انجام شده توسط فوم حاصل از سورفکتانت AOS (بالا، ۳۷/۶٪ بازیابی)

و فوم حاصل از سورفکتانت و نقاط کوانتومی اکسید روی (پایین، ۹۷/۵۵٪ بازیابی)

از شروع ورود جریان فوم به ناحیه با نفوذپذیری بالا و انحراف فوم از ناحیه با نفوذپذیری بالا به ناحیه با نفوذپذیری کم در طول جریان درون محیط متخلخل، می‌توان نتیجه گرفت که حباب‌های فوم در مسیرهایی که نفوذپذیری بالاتری دارند و جاروب شده‌اند، به هم می‌پیوندند و مسیرها را مسدود می‌کنند و جریان فوم را به سمت نواحی جاروب نشده منحرف می‌کنند. بدین ترتیب اکثر مناطق اشباع شده با نفت در تماس با فوم قرار می‌گیرند و بازیابی می‌شوند. اما در فرآیند بازیابی نفت توسط فوم حاوی نانوذره، انحراف چندانی در جریان حباب‌های فوم به سمت ناحیه با نفوذپذیری کم اتفاق نیفتاد و پس از جاروب مناطق با نفوذپذیری بالا و متوسط، جریان از سمت ورودی میکرومدل وارد ناحیه با نفوذپذیری کم شد.

این میزان بازیابی نشان از عملکرد بسیار بهتر فوم حاوی نانوذره نسبت به فوم با سورفکتانت به تنهایی می‌دهد. اما درصد بالای این بازیابی و جاروب تقریباً کامل به این دلیل است که با اضافه کردن نانوذره به محلول، حباب‌های فوم کوچک‌تری تشکیل می‌شود. در نتیجه فوم در مسیر حرکت خود از ناحیه‌های با نفوذپذیری بالا و متوسط بدون مانع و توقف عبور می‌کند.

فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در این پایان نامه سعی شده است که پس از اینکه غلظت بهینه سورفکتانت AOS توسط آزمون هدایت سنجی که غلظت بحرانی میسل را تعیین می کند، مشخص شد، پایداری فوم سورفکتانت در حضور نقاط کوانتومی اکسید روی در شرایط مختلف و در تماس با عوامل مخرب بررسی شود. عواملی که در آزمون های استاتیکی پایداری فوم مورد بررسی قرار گرفتند، شامل تأثیر افزایش غلظت سورفکتانت، حضور شوری، نانوذره و نفت می باشد. علاوه بر این با انجام آزمون دینامیکی میکرومدل، نحوه ی عملکرد فوم ها در محیط متخلخل نیز بررسی شد. نتایج زیر حاصل از نتیجه آزمون ها می باشد.

۵-۲ نتایج

- انتخاب نوع سورفکتانتی که در تولید فوم استفاده می شود از اهمیت بالایی برخوردار است. از آنجایی که سورفکتانت AOS، تعامل خوبی با یون های دوظرفیتی نمک ها دارد و در آب سخت عملکرد خود را حفظ می کند، در آزمون های پایداری استاتیکی در ستون فوم هم مشاهده شد که با وجود تأثیر شوری بر زمان نیمه عمر، در حالت کلی پایداری خوبی از خود نشان می دهد.
- تعیین غلظت بهینه سورفکتانت، یکی دیگر از معیارهای مهم در تولید فوم است. زیرا مطابق با نتایج آزمون ها، پس از تعیین غلظت CMC و تولید فوم با غلظت های کم تر و فراتر از آن، با افزایش غلظت سورفکتانت به بیش از ۱ CMC افزایش چشم گیری در پایداری فوم ثبت نشد. بنابراین بهترین پایداری در همان غلظت ۱ CMC اتفاق افتاد که به عنوان غلظت بهینه در نظر گرفته شد.
- نانوذرات مورد استفاده در این مقاله نقاط کوانتومی اکسید روی هستند که در غلظت بسیار کم Ppm ۱۰۰، باعث افزایش نیمه عمر فوم به میزان ۷۴٪ شدند.
- نتایج حاصل از آزمون های پایداری استاتیک در تماس با نفت نشان داد هنگامی که نانوذره درون محلول فوم کننده قرار دارد، فوم حدود ۸۶ درصد پایداری بیشتر نسبت به زمان عدم حضور نانوذره دارد.

- درصد تخلخل میکرومدل در این پژوهش ۳۰/۷۲ درصد بود و کیفیت فوم برای آزمون دینامیک ۸۰ درصد بود.
- آزمون دینامیکی تزریق فوم درون میکرومدل برای فوم AOS به تنهایی میزان بازیابی ۳۷/۶ درصد را نتیجه داد.
- میزان بازیابی نفت در حضور نقاط کوانتومی اکسید روی به همراه سورفکتانت AOS از ۳۷/۶ درصد بازیابی به میزان ۹۷/۵۵ درصد افزایش یافت.

۳-۵ پیشنهادها

موارد پیشنهاد شده در زیر، می‌تواند برای درک بهتر کار انجام شده در آینده مورد استفاده قرار بگیرد:

- بررسی عواملی مانند فشار و دما بر پایداری استاتیک و دینامیک فوم‌ها
- بررسی عملکرد انواع سورفکتانت‌ها و ترکیب آن‌ها در حضور نقاط کوانتومی اکسید روی
- بررسی عملکرد سایر نقاط کوانتومی در تولید و پایداری فوم
- بررسی عملکرد فوم‌های تولید شده در این پژوهش در فرآیند سیلاب‌زنی مغزه
- بررسی رئولوژی جریان فوم و خواص سیالاتی آن نظیر ویسکوزیته ظاهری
- بررسی مورفولوژی فوم برحسب ضخامت لاملا، سائز حباب‌ها و غیره
- بررسی عملکرد نقاط کوانتومی در فرآیند پوشش‌دهی با سایر نانوذرات یا سورفکتانت‌ها

مرجع

1. Aljabri, N.M., N. Shi, and A. Cavazos, *Nanoemulsion: An emerging technology for oilfield applications between limitations and potentials*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022. **208**: p. 109306.
2. Cheraghian, G., S. Rostami, and M. Afrand, *Nanotechnology in enhanced oil recovery*. Processes, 2020. **8**(9): p. 1073.
3. Jung, J.C., et al., *Rheology and polymer flooding characteristics of partially hydrolyzed polyacrylamide for enhanced heavy oil recovery*. Journal of Applied Polymer Science, 2013. **127**(6): p. 4833-4839.
4. Scott, A.J., L. Romero-Zerón, and A. Penlidis, *Evaluation of polymeric materials for chemical enhanced oil recovery*. Processes, 2020. **8**(3): p. 361.
5. Gozalpour, F., S.R. Ren, and B. Tohidi, *CO₂ EOR and storage in oil reservoir*. Oil & gas science and technology, 2005. **60**(3): p. 537-546.
6. Rezk, M.G., et al., *CO₂ storage potential during CO₂ enhanced oil recovery in sandstone reservoirs*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2019. **66**: p. 233-243.
7. Han, J., et al., *Effect of gravity segregation on CO₂ sequestration and oil production during CO₂ flooding*. Applied Energy, 2016. **161**: p. 85-91.
8. Chen, Y., et al. *Ethoxylated cationic surfactants for CO₂ EOR in high temperature, high salinity reservoirs*. in *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. 2012. OnePetro.
9. Zhang, Y., S.S. Huang, and P. Luo, *Coupling immiscible CO₂ technology and polymer injection to maximize EOR performance for heavy oils*. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2010. **49**(05): p. 25-33.
10. Bian, Y. and G. Penny. *Surfactant formulation evaluation for carbon dioxide foam flooding in heterogeneous sandstone reservoirs*. in *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. 2012. OnePetro.
11. Xiao, C., S.N. Balasubramanian, and L.W. Clapp, *Rheology of viscous CO₂ foams stabilized by nanoparticles under high pressure*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017. **56**(29): p. 8340-8348.
12. Negin, C., S. Ali, and Q. Xie, *Most common surfactants employed in chemical enhanced oil recovery*. Petroleum, 2017. **3**(2): p. 197-211.
13. Farajzadeh, R., R. Krastev, and P. Zitha, *Foam films stabilized with alpha olefin sulfonate (AOS)*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008. **324**(1-3): p. 35-40.
14. Ahmed, S., et al., *Experimental investigation of associative polymer performance for CO₂ foam enhanced oil recovery*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017. **157**: p. 971-979.
15. Talebian, S.H., et al., *Foam assisted CO₂-EOR: A review of concept, challenges, and future prospects*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014. **120**: p. 202-215.

16. Jones, S., et al., *Surfactant screening for foam EOR: Correlation between bulk and core-flood experiments*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016. **500**: p. 166-176.
17. Guo, H., et al. *A novel alkaline-surfactant-foam EOR process*. in *SPE enhanced oil recovery conference*. 2011. OnePetro.
18. Mannhardt, K., J. NOVOSAD, and L. Schramm, *Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*. LL Schramm, Ed., American Chemical Society: Washington, DC, 1994: p. 259-316.
19. Sychova, A., L. Svatovskaya, and M. Sychov, *The Improvement of the Quality of Construction Foam and Non-Autoclave Foam Concrete on Its Basis through the Introduction of Nanosize Additives*, in *Foams-Emerging Technologies*. 2019, IntechOpen.
20. Liu, Y., R.B. Grigg, and B. Bai. *Salinity, pH, and surfactant concentration effects on CO₂-foam*. in *SPE international symposium on oilfield chemistry*. 2005. OnePetro.
21. Yin, G., R.B. Grigg, and Y. Svec. *Oil recovery and surfactant adsorption during CO₂-foam flooding*. in *Offshore Technology Conference*. 2009. OnePetro.
22. Khajepour, M., et al., *Nanoparticles as foam stabilizer for steam-foam process*. SPE Journal, 2018. **23**(06): p. 2232-2242.
23. Falls, A., et al., *Development of a mechanistic foam simulator: the population balance and generation by snap-off*. SPE reservoir engineering, 1988. **3**(03): p. 884-892.
24. Chen, M., Y. Yortsos, and W. Rossen, *Insights on foam generation in porous media from pore-network studies*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005. **256**(2-3): p. 181-189.
25. Hematpur, H., et al., *Foam flow in porous media: Concepts, models and challenges*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018. **53**: p. 163-180.
26. Emadi, A., et al. *Mechanistic study of improved heavy oil recovery by CO₂-foam injection*. in *SPE Enhanced Oil Recovery Conference*. 2011. OnePetro.
27. Wang, S., et al., *Enhancing foam stability in porous media by applying nanoparticles*. Journal of Dispersion Science and Technology, 2018. **39**(5): p. 734-743.
28. Shao, J., J. Darkwa, and G. Kokogiannakis, *Review of phase change emulsions (PCMEs) and their applications in HVAC systems*. Energy and buildings, 2015. **94**: p. 200-217.
29. Guerrero-Hernández, L., et al., *Gemini and Bicephalous Surfactants: A Review on Their Synthesis, Micelle Formation, and Uses*. International Journal of Molecular Sciences, 2022. **23**(3): p. 1798.
30. Qiao, W., et al., *Dynamic interfacial tension behaviors between Guerbet betaine surfactants solution and Daqing crude oil*. Fuel, 2012. **102**: p. 746-750.
31. Qiao, W., et al., *Interfacial tension behavior of double long-chain 1, 3, 5-triazine surfactants for enhanced oil recovery*. Fuel, 2012. **96**: p. 220-225.
32. Jian, G., et al., *Comparative study of extensional viscoelasticity properties of liquid films and stability of bulk foams*. Journal of dispersion science and technology, 2013. **34**(10): p. 1382-1391.
33. Jian, G., Q. Hou, and Y. Zhu, *Stability of polymer and surfactant mixture enhanced foams in the presence of oil under static and dynamic conditions*. Journal of Dispersion Science and Technology, 2015. **36**(4): p. 477-488.

34. Chen, S., et al., *Effect of oil on the stability of polymer enhanced foams*. International Journal of Oil, Gas and Coal Technology, 2013. **6**(6): p. 675-688.
35. Youyi, Z., et al., *Current development and application of chemical combination flooding technique*. Petroleum exploration and development, 2013. **40**(1): p. 96-103.
36. Zhu, Y., et al. *Recent progress and effects analysis of surfactant-polymer flooding field tests in China*. in *SPE enhanced oil recovery conference*. 2013. OnePetro.
37. Jian, G., et al., *Static adsorption of an ethoxylated nonionic surfactant on carbonate minerals*. Langmuir, 2016. **32**(40): p. 10244-10252.
38. Wang, Y., et al., *Adsorption behavior of dodecyl hydroxypropyl sulfobetaine on limestone in high salinity water*. RSC advances, 2015. **5**(73): p. 59738-59744.
39. Dai, C., et al., *Adsorption behavior of cocamidopropyl betaine under conditions of high temperature and high salinity*. Journal of Applied Polymer Science, 2014. **131**(12).
40. ShamsiJazeyi, H., R. Verduzco, and G.J. Hirasaki, *Reducing adsorption of anionic surfactant for enhanced oil recovery: Part I. Competitive adsorption mechanism*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2014. **453**: p. 162-167.
41. Jian, G., et al., *Characterizing adsorption of associating surfactants on carbonates surfaces*. Journal of colloid and interface science, 2018. **513**: p. 684-692.
42. Mageswari, A., et al., *Nanomaterials: classification, biological synthesis and characterization*, in *Nanoscience in Food and Agriculture 3*. 2016, Springer. p. 31-71.
43. Patel, A., et al., *Application of nanotechnology in the food industry: present status and future prospects*, in *Impact of nanoscience in the food industry*. 2018, Elsevier. p. 1-27.
44. Strambeanu, N., et al., *Nanoparticles: Definition, classification and general physical properties*, in *Nanoparticles' promises and risks*. 2015, Springer. p. 3-8.
45. Siegel, R.W., *Synthesis and properties of nanophase materials*. Materials Science and Engineering: A, 1993. **168**(2): p. 189-197.
46. Sun, X., et al., *Application of nanoparticles in enhanced oil recovery: a critical review of recent progress*. Energies, 2017. **10**(3): p. 345.
47. Mohanraj, V. and Y. Chen, *Nanoparticles-a review*. Tropical journal of pharmaceutical research, 2006. **5**(1): p. 561-573.
48. Agista, M.N., K. Guo, and Z. Yu, *A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery*. Applied sciences, 2018. **8**(6): p. 871.
49. Kale, S.N. and S.L. Deore, *Emulsion micro emulsion and nano emulsion: a review*. Systematic Reviews in Pharmacy, 2017. **8**(1): p. 39.
50. Shukla, A.K. and S. Iravani, *Green synthesis, characterization and applications of nanoparticles*. 2018: Elsevier.
51. Mughal, B., et al., *Biogenic nanoparticles: Synthesis, characterisation and applications*. Applied Sciences, 2021. **11**(6): p. 2598.
52. Kumar, A. and C.K. Dixit, *Methods for characterization of nanoparticles*, in *Advances in nanomedicine for the delivery of therapeutic nucleic acids*. 2017, Elsevier. p. 43-58.

53. El-Diasty, A.I. and A.M. Ragab. *Applications of nanotechnology in the oil & gas industry: Latest trends worldwide & future challenges in Egypt*. in *North Africa Technical Conference and Exhibition*. 2013. OnePetro.
54. Boul, P.J. and P.M. Ajayan, *Nanotechnology research and development in upstream oil and gas*. *Energy Technology*, 2020. **8**(1): p. 1901216.
55. Nourafkan, E., Z. Hu, and D. Wen, *Nanoparticle-enabled delivery of surfactants in porous media*. *Journal of colloid and interface science*, 2018. **519**: p. 44-57.
56. Peng, B., et al., *Applications of nanotechnology in oil and gas industry: Progress and perspective*. *The Canadian journal of chemical engineering*, 2018. **96**(1): p. 91-100.
57. Yu, J., et al. *Transport study of nanoparticles for oilfield application*. in *SPE international conference on oilfield scale*. 2010. OnePetro.
58. Panchal, H., et al., *A systematic review on nanotechnology in enhanced oil recovery*. *Petroleum Research*, 2021. **6**(3): p. 204-212.
59. Foroozesh, J. and S. Kumar, *Nanoparticles behaviors in porous media: application to enhanced oil recovery*. *Journal of Molecular Liquids*, 2020. **316**: p. 113876.
60. Sandeep, R., S. Jain, and A. Agrawal, *Application of nanoparticles-based technologies in the oil and gas industry*, in *Nanotechnology for Energy and Environmental Engineering*. 2020, Springer. p. 257-277.
61. Ali, J., et al., *Greenly synthesized magnetite@ SiO₂@ xanthan nanocomposites and its application in enhanced oil recovery: IFT reduction and wettability alteration*. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020. **45**(9): p. 7751-7761.
62. Kazemzadeh, Y., et al., *Review on application of nanoparticles for EOR purposes: A critical review of the opportunities and challenges*. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2019. **27**(2): p. 237-246.
63. Almubarak, M., et al. *Enhancing Foam Stability Through a Combination of Surfactant and Nanoparticles*. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. 2020. OnePetro.
64. Massarweh, O. and A.S. Abushaikh, *The use of surfactants in enhanced oil recovery: A review of recent advances*. *Energy Reports*, 2020. **6**: p. 3150-3178.
65. Kesarwani, H., S. Sharma, and A. Mandal, *Application of novel colloidal silica nanoparticles in the reduction of adsorption of surfactant and improvement of oil recovery using surfactant polymer flooding*. *ACS omega*, 2021. **6**(17): p. 11327-11339.
66. Mashat, A., A. Abdel-Fattah, and A. Gizzatov. *NanoSurfactant: A Novel Nanoparticle-Based EOR Approach*. in *SPE Europec featured at 80th EAGE Conference and Exhibition*. 2018. OnePetro.
67. Dordzie, G. and M. Dejam, *Enhanced oil recovery from fractured carbonate reservoirs using nanoparticles with low salinity water and surfactant: a review on experimental and simulation studies*. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2021. **293**: p. 102449.
68. Sircar, A., et al., *Applications of nanoparticles in enhanced oil recovery*. *Petroleum Research*, 2021.
69. Hu, R., et al., *Research progress of viscoelastic surfactants for enhanced oil recovery*. *Energy Exploration & Exploitation*, 2021. **39**(4): p. 1324-1348.

70. Liu, P., et al., *Experimental study of rheological properties and oil displacement efficiency in oilfields for a synthetic hydrophobically modified polymer*. Scientific reports, 2017. **7**(1): p. 1-11.
71. Asl, H.F., et al., *Effect of SiO₂ nanoparticles on the performance of L-Arg and L-Cys surfactants for enhanced oil recovery in carbonate porous media*. Journal of Molecular Liquids, 2020. **300**: p. 112290.
72. Machale, J., et al., *Impact of mineralogy, salinity, and temperature on the adsorption characteristics of a novel natural surfactant for enhanced oil recovery*. Chemical Engineering Communications, 2020: p. 1-15.
73. Rezaei, A., et al., *Surfactant-silica nanoparticle stabilized N₂-foam flooding: A mechanistic study on the effect of surfactant type and temperature*. Journal of Molecular Liquids, 2021. **325**: p. 115091.
74. Ivanova, A.A., et al., *Effect of nanoparticles on viscosity and interfacial tension of aqueous surfactant solutions at high salinity and high temperature*. Journal of Surfactants and Detergents, 2020. **23**(2): p. 327-338.
75. He, Y., et al., *Study on a nonionic surfactant/nanoparticle composite flooding system for enhanced oil recovery*. ACS omega, 2021. **6**(16): p. 11068-11076.
76. Qian, C., et al., *Synergistic effect between surfactant and nanoparticles on the stability of foam in EOR processes*. SPE Journal, 2020. **25**(02): p. 883-894.
77. Ali, J.A., et al., *Recent advances in application of nanotechnology in chemical enhanced oil recovery: Effects of nanoparticles on wettability alteration, interfacial tension reduction, and flooding*. Egyptian journal of petroleum, 2018. **27**(4): p. 1371-1383.
78. Yuan, L., Y. Zhang, and H. Dehghanpour, *A theoretical explanation for wettability alteration by adding nanoparticles in oil-water-tight rock systems*. Energy & Fuels, 2021. **35**(9): p. 7787-7798.
79. Maurya, N.K. and A. Mandal, *Investigation of synergistic effect of nanoparticle and surfactant in macro emulsion based EOR application in oil reservoirs*. Chemical Engineering Research and Design, 2018. **132**: p. 370-384.
80. Nwidee, L.N., et al., *Wettability alteration of oil-wet limestone using surfactant-nanoparticle formulation*. Journal of colloid and interface science, 2017. **504**: p. 334-345.
81. Bagrezaie, M.A. and P. Pourafshary, *Improvement of surfactant flooding performance by application of nanoparticles in sandstone reservoirs*. Journal of the Japan Petroleum Institute, 2015. **58**(2): p. 97-102.
82. Franco, C.A., et al., *Design and tuning of nanofluids applied to chemical enhanced oil recovery based on the surfactant–nanoparticle–brine interaction: From laboratory experiments to oil field application*. Nanomaterials, 2020. **10**(8): p. 1579.
83. Yekeen, N., et al., *Experimental investigation of minimization in surfactant adsorption and improvement in surfactant-foam stability in presence of silicon dioxide and aluminum oxide nanoparticles*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017. **159**: p. 115-134.
84. Wu, Y., et al., *Reducing surfactant adsorption on rock by silica nanoparticles for enhanced oil recovery*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017. **153**: p. 283-287.
85. Harrison, P. and A. Valavanis, *Quantum wells, wires and dots: theoretical and computational physics of semiconductor nanostructures*. 2016: John Wiley & Sons.

86. Bird, J.P., *Electron transport in quantum dots*. 2013: Springer Science & Business Media.
87. Peveler, W.J., S.B. Jaber, and I.P. Parkin, *Nanoparticles in explosives detection—the state-of-the-art and future directions*. Forensic Science, Medicine and Pathology, 2017. **13**(4): p. 490-494.
88. Gerion, D., et al., *Synthesis and properties of biocompatible water-soluble silica-coated CdSe/ZnS semiconductor quantum dots*. The Journal of Physical Chemistry B, 2001. **105**(37): p. 8861-8871.
89. Dabbousi, B.O., et al., *(CdSe) ZnS core– shell quantum dots: synthesis and characterization of a size series of highly luminescent nanocrystallites*. The Journal of Physical Chemistry B, 1997. **101**(46): p. 9463-9475.
90. Zhu, Y., P. Yu, and J. Fan. *Study on nanoparticle stabilized emulsions for chemical flooding enhanced oil recovery*. in *International Petroleum Technology Conference*. 2021. OnePetro.
91. Sun, Q., et al., *Interfacial rheology of foam stabilized by nanoparticles and their retention in porous media*. Energy & Fuels, 2021. **35**(8): p. 6541-6552.
92. Zhang, Y., et al., *Nanoparticles as foam stabilizer: Mechanism, control parameters and application in foam flooding for enhanced oil recovery*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021. **202**: p. 108561.
93. Wu, Y., et al., *Stability mechanism of nitrogen foam in porous media with silica nanoparticles modified by cationic surfactants*. Langmuir, 2018. **34**(27): p. 8015-8023.
94. Ibrahim, A.F. and H.A. Nasr-El-Din, *Stability improvement of carbon dioxide foam using nanoparticles and viscoelastic surfactants for enhanced-oil-recovery applications*. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2020. **23**(02): p. 414-430.
95. Liu, Q., et al., *Modified Fe₃O₄ nanoparticle used for stabilizing foam flooding for enhanced oil recovery*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020. **605**: p. 125383.
96. Yekeen, N., et al., *A comprehensive review of experimental studies of nanoparticles-stabilized foam for enhanced oil recovery*. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018. **164**: p. 43-74.
97. Fredriksen, S.B., et al., *Surfactant preflows during carbon dioxide foam injection for integrated enhanced oil recovery in fractured oil-wet carbonates*. SPE Journal, 2019. **24**(03): p. 1139-1153.
98. Hahn, R., et al. *Low tension foam flooding for chemical enhanced oil recovery in heterogeneous systems*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2018. OnePetro.
99. Eide, Ø., et al. *Nanoparticle stabilized foam in harsh conditions for CO₂ EOR*. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. 2018. OnePetro.
100. Gland, N., et al. *New developement of cationic surfactant formulations for foam assisted CO₂-EOR in carbonates formations*. in *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference*. 2018. OnePetro.
101. Ghosh, P. and K.K. Mohanty, *Novel application of cationic surfactants for foams with wettability alteration in oil-wet low-permeability carbonate rocks*. SPE Journal, 2018. **23**(06): p. 2218-2231.
102. Emrani, A., A. Ibrahim, and H. Nasr-El-Din. *Evaluation of mobility control with nanoparticle-stabilized CO₂ foam*. in *SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. 2017. OnePetro.

103. Emrani, A.S. and H.A. Nasr-El-Din. *Stabilizing CO₂-foam using nanoparticles*. in *SPE European Formation Damage Conference and Exhibition*. 2015. OnePetro.
104. Singh, R. and K.K. Mohanty. *Synergistic stabilization of foams by a mixture of nanoparticles and surfactants*. in *SPE improved oil recovery symposium*. 2014. OnePetro.
105. Singh, R. and K.K. Mohanty, *Foams stabilized by in-situ surface-activated nanoparticles in bulk and porous media*. *Spe Journal*, 2016. **21**(01): p. 121-130.
106. Emrani, A.S. and H.A. Nasr-El-Din, *An experimental study of nanoparticle-polymer-stabilized CO₂ foam*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017. **524**: p. 17-27.
107. Emrani, A.S., A.F. Ibrahim, and H.A. Nasr-El-Din. *Mobility control using nanoparticle-stabilized CO₂ foam as a hydraulic fracturing fluid*. in *SPE Europec featured at 79th EAGE Conference and Exhibition*. 2017. OnePetro.
108. Razali, N., et al. *Nano-Sized Particle as Foam Stabiliser Designed for Application at High Temperature and Light Crude Oil Condition for Enhanced Oil Recovery-A Fluid-Fluid Case Study*. in *Offshore Technology Conference Asia*. 2018. OnePetro.
109. Ibrahim, A.F., A. Emrani, and H. Nasraddin. *Stabilized CO₂ foam for EOR applications*. in *Carbon Management Technology Conference*. 2017. OnePetro.
110. Luo, H., et al. *Modeling polymer enhanced foam flow in porous media using an improved population-balance foam model*. in *SPE Improved Oil Recovery Conference*. 2018. OnePetro.
111. Rogmo, A.U., et al., *Performance of silica nanoparticles in CO₂ foam for EOR and CCUS at tough reservoir conditions*. *SPE Journal*, 2020. **25**(01): p. 406-415.
112. Nazari, N., J.-S. Tsau, and R. Barati. *Improving CO₂ Foam for EOR Applications Using Polyelectrolyte Complex Nanoparticles Tolerant of High Salinity Produced Water*. in *SPE Improved Oil Recovery Conference*. 2018. OnePetro.
113. Ahmed, S., et al. *Experimental investigation and optimization of polymer enhanced CO₂ foam stability and apparent viscosity*. in *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition*. 2017. OnePetro.
114. Dickson, J.L., B.P. Binks, and K.P. Johnston, *Stabilization of carbon dioxide-in-water emulsions with silica nanoparticles*. *Langmuir*, 2004. **20**(19): p. 7976-7983.
115. Worthen, A., et al. *Multi-scale evaluation of nanoparticle-stabilized CO₂-in-Water foams: From the benchtop to the field*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2015. OnePetro.
116. Worthen, A.J., et al., *Nanoparticle-stabilized carbon dioxide-in-water foams with fine texture*. *Journal of colloid and interface science*, 2013. **391**: p. 142-151.
117. Worthen, A.J., et al., *Carbon dioxide-in-water foams stabilized with nanoparticles and surfactant acting in synergy*. *AIChE Journal*, 2013. **59**(9): p. 3490-3501.
118. Espinosa, D., et al. *Nanoparticle-stabilized supercritical CO₂ foams for potential mobility control applications*. in *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. 2010. OnePetro.
119. Aroonsri, A., et al. *Conditions for generating nanoparticle-stabilized CO₂ foams in fracture and matrix flow*. in *SPE annual technical conference and exhibition*. 2013. OnePetro.
120. Yu, J., et al. *The application of nanoparticle-stabilized CO foam for oil recovery*. in *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. 2013. OnePetro.

121. Yu, J., et al. *Study of particle structure and hydrophobicity effects on the flow behavior of nanoparticle-stabilized CO₂ foam in porous media*. in *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. 2014. OnePetro.
122. Prigiobbe, V., et al., *Transport of Nanoparticle-Stabilized CO₂-Foam in Porous Media*. *Transport in porous media*, 2016. **111**(1): p. 265-285.
123. Kim, I., et al., *Aggregation of silica nanoparticles and its impact on particle mobility under high-salinity conditions*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015. **133**: p. 376-383.
124. Kim, I., et al., *Size-dependent properties of silica nanoparticles for Pickering stabilization of emulsions and foams*. *Journal of Nanoparticle Research*, 2016. **18**(4): p. 1-12.
125. Lotfollahi, M., et al. *Experimental studies and modeling of foam hysteresis in porous media*. in *SPE Improved Oil Recovery Conference*. 2016. OnePetro.
126. Lee, D., et al., *Fly ash nanoparticles as a CO₂ foam stabilizer*. *Powder Technology*, 2015. **283**: p. 77-84.
127. Eftekhari, A.A., R. Krastev, and R. Farajzadeh, *Foam stabilized by fly ash nanoparticles for enhancing oil recovery*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015. **54**(50): p. 12482-12491.
128. Aminzadeh, B., et al. *Effect of nanoparticles on flow alteration during CO₂ injection*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2012. OnePetro.
129. Mo, D., et al. *Study of the effect of different factors on nanoparticle-stabilized CO₂ foam for mobility control*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2012. OnePetro.
130. Yu, J., et al. *Study of adsorption and transportation behavior of nanoparticles in three different porous media*. in *SPE improved oil recovery symposium*. 2012. OnePetro.
131. Zhang, T., et al. *Engineered nanoparticles as harsh-condition emulsion and foam stabilizers and as novel sensors*. in *Offshore Technology Conference*. 2011. OnePetro.
132. Liu, Q., et al., *Ultra-low interfacial tension foam system for enhanced oil recovery*. *Applied Sciences*, 2019. **9**(10): p. 2155.
133. Rattanaudom, P., et al., *The study of ultralow interfacial tension SiO₂-surfactant foam for enhanced oil recovery*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022. **209**: p. 109898.
134. Sakthivel, S., et al., *Carbon nanodots for enhanced oil recovery in carbonate reservoirs*. *Energy Reports*, 2021. **7**: p. 8943-8959.
135. AfzaliTabar, M., et al., *Hybrid of quantum dots for interfacial tension reduction and reservoir alteration wettability for enhanced oil recovery (EOR)*. *Journal of Molecular Liquids*, 2020. **307**: p. 112984.
136. Zhou, Y., et al., *Development of silicon quantum dots based nano-fluid for enhanced oil recovery in tight Bakken cores*. *Fuel*, 2020. **277**: p. 118203.
137. Rane, K., B. Zhang, and L. Goual, *Microscale investigation of DNAPL displacement by engineered graphene quantum dots in heterogeneous porous media*. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021. **625**: p. 126936.
138. Cortés, H., et al., *Non-ionic surfactants for stabilization of polymeric nanoparticles for biomedical uses*. *Materials*, 2021. **14**(12): p. 3197.
139. Lee, K.S. and J.H. Lee, *Hybrid enhanced oil recovery using smart waterflooding*. 2019: Gulf Professional Publishing.

Abstract

Foam flooding is a proven method in the oil recovery process to recover a significant amount of oil remaining in the reservoir. However, the use of surfactant as a foaming agent in carbon dioxide foam may be able to reduce mobility, but the disadvantages of retaining the surfactant in the porous media and the instability of the foam under reservoir conditions (high salinity, high temperature and high pressure) prevent the optimal performance of this chemical in the flooding process is foaming. Because nanoparticles have properties such as high adhesion energy at the interface between the two phases, they are a good candidate for stabilizing the foam even in harsh conditions. Therefore, the aim of this study was to evaluate the stability and mobility properties of carbon dioxide foam at very low concentrations (100 Ppm) of quantum dots of zinc oxide, alpha olefin sulfonate surfactant at critical micelle concentrations (0.1 wt%) and artificial seawater with salinity 40000 Ppm as the base fluid. The foaming ability of the prepared solutions and their foam stability were investigated by recording the foam formation time and reducing its height inside the foam column. The results showed that the foam resulting from the synergistic of quantum dots and surfactants in the static state without the presence of oil, has improved stability by 74%. Therefore, the solution of zinc oxide quantum dots and surfactant creates a much more stable foam, which indicates the high potential of these particles in the foam flooding processes. Also, dynamic injection of foam into the micromodel increased the oil recovery rate from 37.6% of the surfactant solution alone to 97.55% in the presence of quantum dots.

Keywords: Foam, Surfactant, Nanoparticles, Quantum dots, Stability, Mobility, Micromodels



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Experimental Investigation of CO₂ Foam Stability Using Surfactant and Nanoparticles Blends by Static and Dynamic Tests

By: **Hassan Hajisalimi**

Supervisors:

Dr. Mohsen Nazari

Dr. Jalal Fahimpour

February, 2022