بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

مدل‌سازی آزمایشگاهی تزریق فوم با رویکرد ازدیاد برداشت نفت

نگارنده: حمیدرضا زنگنه

استاد راهنما

دکتر محسن نظری

شهریور ۱۳۹۷

شماره: ۱۲۱/۲۹۷/م
تاریخ: ۹۷/۷/۱۶

باسمه‌تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **حمیدرضا زنگنه** با شماره دانشجویی **۹٤۰۸۹٥٤** رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان **مدل‌سازی آزمایشگاهی تزریق فوم با رویکرد ازدیاد برداشت نفت** که در تاریخ **۱۳۹۷/۰٦/۱۵** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: عالی جوی....) ☑ **مردود** ☐

نوع تحقیق: **نظری** ☐ **عملی** ■

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۲- استادراهنمای دوم	-	-	-
۳- استاد مشاور	-	-	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی خالقی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر علی عباس‌نژاد	استادیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	دکتر محمدمحسن شاه‌مردان	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمدمحسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

۶

تقدیم به

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و به کسانی که عشقشان را در وجودم دمید.

تشکر و قدردانی:

در اینجا لازم می‌دانم از همه کسانی که این جانب را در امر انجام این پایان نامه یاری نموده اند

به خصوص جناب آقای دکتر محسن نظری که همواره از راهنمایی و مشاوره های ایشان بهره مند

بوده ام تشکر و قدردانی نمایم.

همچنین لازم می‌دانم از خانواده عزیزم و همه دوستانی که در این مدت این جانب را یاری

نموده اند، تشکر نمایم.

تعهدنامه

این‌جانب **حمیدرضا زنگنه** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **تبدیل انرژی**

دانشکده **مهندسی مکانیک** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **مدل‌سازی آزمایشگاهی تزریق فوم با رویکرد ازدیاد برداشت نفت** تحت راهنمایی **دکتر محسن نظری** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط این‌جانب انجام‌شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 است و مقالات مستخرج بانام "دانشگاه صنعتی شاهرود" و یا " **Shahrood University of Technology** " به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده‌شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده‌شده 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، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

ازآنجاکه در قرن حاضر، نفت یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تلقی می‌شود، لذا دست‌اندرکاران صنعت نفت بر آن هستند که با استفاده از تکنولوژی‌های نوین حداکثر بهره‌برداری از مخازن نفتی را بنمایند. تزریق فوم به عنوان یک روش پربازده در میان فرآیندهای ازدیاد برداشت شناخته می‌شود. در این مطالعه ازدیاد برداشت نفت با تزریق فوم در مقیاس میکرو بیان می‌شود. میکرومدل‌ها با هدف درک بهتر از فرآیندهای ازدیاد برداشت در مقیاس حفره و مشاهده مستقیم جریان سیال در محیط‌های متخلخل به کار می‌روند. میکروسیالات که به عنوان آزمایشگاه روی تراشه بیان می‌شود به علت مزایایی مثل ارزانی و ساخت سریع، نیاز به مقدار کم نمونه آزمایشگاهی و کیفیت بالا در کنترل و مشاهده در تحقیقات استفاده می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر، فوم به کمک دستگاه جریان متمرکز با تزریق هم‌زمان گاز نیتروژن و محلول سورفکتانت (SDS و TTAB) پیش‌ساخته می‌شود و در میکرومدل نفت‌دوست همگن اشباع‌شده با روغن پارافین تزریق می‌شود. کیفیت فوم تزریق‌شده به میکرومدل با تغییر فشار گاز و دبی سیال قابل تغییر است که در این پژوهش از فوم با مشخصات فشار ۳۰۰ میلی بار و دبی ۰٫۲ میلی‌لیتر بر ساعت و قطر متوسط ۱۰۰ میکرومتر استفاده می‌شود. در مطالعه‌ی حاضر از آب‌نمک به عنوان سیال پایه تزریق و سورفکتانت‌های SDS و TTAB استفاده می‌شود که نتایج نشان می‌دهد که حضور سورفکتانت سبب کاهش کشش سطحی و تغییر ترشوندگی میکرومدل می‌شود و اشباع نفت باقی‌مانده را کاهش می‌دهد. در تزریق سیالات پدیده‌ی انگشتی شدن سبب ناپایداری می‌شود که تزریق فوم با کاهش تحرک‌پذیری گاز و افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری سبب بهبود روبیدن نفت باقی‌مانده در میکرومدل می‌شود که راندمان برداشت نفت را ۱۷ درصد نسبت به سورفکتانت TTAB و نسبت به آب‌نمک ۵۴ درصد افزایش می‌یابد که نتایج مطالعه‌ی حاضر این موضوع را تایید می‌کند.

کلید واژگان: ازدیاد برداشت نفت، میکروسیالات، سورفکتانت، تزریق فوم، میکرومدل، دستگاه میکروسیال جریان متمرکز.

فهرست مطالب

۱- فصل اول: مقدمه‌ای بر ازدیاد برداشت ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۱-۱- برداشت نفت ۲

۱-۱-۲- مرحله بازیافت یا استخراج ثالثیه نفت ۴

۱-۱-۳- معرفی میکرومدل ۷

۱-۱-۴- میکروفلوئیدیک ۸

۱-۱-۵- PDMS ۱۰

۱-۲- ساختار گزارش ۱۰

۲- فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق ۱۳

۲-۱- مقدمه ۱۴

۲-۲- فوم ۱۴

۲-۳- سورفکتانت در فوم ۱۵

۲-۴- فوم و ساختار آن ۱۷

۲-۴-۱- ساختار فوم ۱۷

۲-۵- خواص فیزیکی فوم‌ها ۱۹

۲-۵-۱- خواص مکانیکی ۱۹

۲-۵-۲- خواص رئولوژیکی ۲۰

۲-۵-۳- خواص الکتریکی ۲۰

۲-۵-۴- خواص الکتروسینتیکی ۲۱

۲-۵-۵- خواص نوری ۲۲

۲-۶- پدیده‌های سطحی در فوم‌ها ۲۲

۲-۷- چهار نیروی مؤثر بر روی فوم‌ها ۲۴

۲-۷-۱- نیروهای سطحی موجود ۲۷
۲-۸- تخلیه مایع موجود در لایه لملا ۲۹
۲-۸-۱- نیروی وزن ۲۹
۲-۸-۲- اختلاف فشار درون لملا ۳۰
۲-۹- مکانیزم ایجاد فوم در محیط متخلخل ۳۱
۲-۹-۱- مکانیزم برش ۳۱
۲-۹-۲- مکانیزم پشت سرگذاشتن ۳۲
۲-۹-۳- مکانیزم تقسیم لملا ۳۲
۲-۱۰- رژیم‌های جریان فوم در محیط متخلخل ۳۲
۲-۱۱- کیفیت فوم ۳۳
۲-۱۲- رابطه بین کسر جزئی جریان گاز و تحرک گاز ۳۵
۲-۱۲-۱- تحرک گاز ۳۶
۲-۱۲-۲- تحرک مایع ۳۶
۲-۱۳- پایداری فوم ۳۷
۲-۱۳-۱- اثر نفت ۳۷
۲-۱۳-۲- غلظت ماده فعال‌کننده سطحی ۳۸
۲-۱۳-۳- اثر دما ۳۹
۲-۱۳-۴- اثر فشار ۴۱
۲-۱۳-۵- شوری آب‌نمک ۴۲
۲-۱۴- ۴- نتایج به‌دست‌آمده از کاربردهای میدانی ۴۲
۳- فصل سوم: مواد و روش‌ها ۴۷
۳-۱- مقدمه ۴۸
۳-۲- مواد ۴۸
۳-۲-۱- سورفکتانت ۴۸
۳-۲-۲- گاز ۵۰

۳-۲-۳- روغن ۵۱
۳-۳- تجهیزات آزمایشگاهی ۵۱
۳-۳-۱- همزن هاتپلیت ۵۱
۳-۳-۲- میکروسکوپ پرسرعت ۵۲
۳-۳-۳- پمپ سرنگی ۵۲
۳-۳-۴- ترازو ۵۳
۳-۳-۵- رگلاتور ۵۳
۳-۴- میکروسیالات ۵۴
۳-۴-۱- ساخت دستگاه جریان متمرکز و میکرومدلPDMS ۵۵
۳-۵- روش انجام آزمایش ۵۹
۳-۵-۱- تزریق سورفکتانت ۶۱
۳-۵-۲- تولید حباب ۶۳
۳-۵-۳- تزریق فوم ۶۵
۳-۶- تحلیل اطلاعات ۶۶
۳-۶-۱- روش پردازش اطلاعات ۶۶
۳-۶-۲- پارامترهای پردازش تصویر ۶۸
۴- فصل چهارم: نتایج آزمایشگاهی ۷۱
۴-۱- مقدمه ۷۲
۴-۲- اثر رنگ خوراکی بر روی روغن ۷۳
۴-۳- تکرارپذیری ۷۳
۴-۴- تزریق آب‌نمک ۷۵
۴-۴-۱- اثر دبی در تزریق آب‌نمک ۷۵
۴-۵- تزریق سورفکتانت ۷۶
۴-۵-۱- تأثیر متغییرهای مختلف در مقدار نفت باقی‌مانده ۷۶
۴-۶- بررسی پارامتر زمان رخنه ۸۱

۴-۷- تولید حباب ۸۳
۴-۸- تزریق فوم ۸۶
۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۹۱
۵-۱ نتیجه‌گیری ۹۲
۵-۲ پیشنهادها ۹۳
۶- فصل ششم: مراجع ۹۵
۷- پیوست الف ۱۰۳

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ نیروهای مؤثر بر فوم‌ها و اثر آن‌ها ۲۵

جدول ۲-۲ کاربرد ازدیاد برداشتی فوم در میادین نفتی [۷۴-۷۶] ۴۴

جدول ۳-۱ مشخصات سورفکتانت‌های SDS,TTAB 1wt% ۴۹

جدول ۳-۲ مشخصات میکرومدل ۵۶

جدول ۴-۱ مقادیر نفت باقی‌مانده‌ی اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف سورفکتانت TTAB در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت ۷۴

جدول ۴-۲ مقادیر نفت باقی‌مانده‌ی اندازه‌گیری شده در زمان‌های برای آب‌نمک ۲wt% در دبی ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت ۷۴

جدول ۴-۳ مقادیر نفت باقی‌مانده‌ی اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف سورفکتانت SDS در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت ۷۵

جدول ۴-۴ زمان رخنه و مقدار نفت باقی‌مانده را برای آب‌نمک، SDS و TTAB در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت ۸۲

جدول ۴-۵ مقایسه‌ی بین اشباع نفت باقیمانده پس از زمان ۱ دقیقه برای فوم‌های TTAB،SDS، سورفکتانت‌های SDS، TTAB و آب‌نمک ۸۹

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ روش‌های برداشت اولیه، ثانویه و ثالثیه[۳].. ۳
شکل ۱-۲ نمونه‌ای از میکروسیالات [۱۲].. ۹
شکل ۲-۱ نمای ساده‌ای از یک مولکول مواد فعال سطحی[۳۳].. ۱۶
شکل ۲-۲ ساختار فوم سه حبابه ب) ساختار فوم چهار حبابه -ترکیب شدن حباب‌ها [۳۵].. ۱۸
شکل ۲-۳: تصویری از سیستم کلی فوم که بخش‌های مختلف لملا فوم را نشان می‌دهد[۳۷].. ۲۳
شکل ۲-۴: شماتیکی از ساختار فوم در صنعت نفت که قطرات نفت درون ساختار آن وجود دارد [۳].. ۲۴
شکل ۲-۵ قطرات امولسیون و ذرات جامد می‌توانند از تخلیه مایع فوم جلوگیری کنند [۳۵].. ۲۶
شکل ۲-۶ لایه دوگانه الکتریکی با فرض بار منفی در سطح [۳۸].. ۲۸
شکل ۲-۷ نحوه اثرگذاری اختلاف فشار بر تخلیه لملا [۳۸].. ۳۰
شکل ۲-۸ مکانیسم‌های ایجاد فوم در محیط متخلخل [۴۰].. ۳۱
شکل ۲-۹ پارامترها و رژیم‌های جریان در محیط متخلخل [۴۵].. ۳۳
شکل ۲-۱۰ اثر فوم بر تراوایی نسبی مایع [۵۹].. ۳۷
شکل ۲-۱۱ اثر دما بر افت فشار در طی تزریق فوم [۶۷].. ۴۰
شکل ۲-۱۲ اثر فشار بر افت فشار در طی تزریق فوم [۶۷].. ۴۱
شکل ۳-۱: ساختار مولکولی سورفکتانت TTABS.. ۴۹
شکل ۳-۲: ساختار مولکولی سورفکتانت SDS.. ۴۹
شکل ۳-۳ مقایسهی نوع گاز برای تشکیل فوم [۷۹].. ۵۰
شکل ۳-۴ میکروسکوپ پرسرعت دولومیت Meros.. ۵۲
شکل ۳-۵ پمپ سرنگی FIT-VIT LAMBDA.. ۵۳
شکل ۳-۶ ترازوی شرکت RADWAGE مدل ۱/C/۵۱۰ PS.. ۵۳
شکل ۳-۷ دستگاه جریان متمرکز مطالعه حاضر.. ۵۵
شکل ۳-۸ میکرومدل مطالعه حاضر.. ۵۵
شکل ۳-۹ طرح اولیه دستگاه جریان متمرکز در نرم‌افزار کورل دراو.. ۵۶
شکل ۳-۱۰ طرح اولیه میکرومدل در نرم‌افزار کورل دراو.. ۵۶
شکل ۳-۱۱ فوتورزیست مثبت و منفی.. ۵۷
شکل ۳-۱۲ الف) نمای شماتیک از ست آپ آزمایش و ب) ست آپ آزمایش.. ۶۱
شکل ۳-۱۳ (الف) دستگاه جریان متمرکز (از نمای بالا). مقطع برش داده شده از کانال مستطیل است (ب) حبابی را در کانال خروجی نشان می‌دهد (ج) تولید حباب.. ۶۳

شکل ۳-۱۴ فرایند پردازش تصویر ۶۸
شکل ۴-۱ اثر دبی بر مقدار اشباع نفت باقی‌مانده در اثر تزریق آب‌نمک ۲wt٪ ۷۶
شکل ۴-۲ اثر دبی بر اشباع نفت باقی‌مانده در تزریق سورفکتانت SDS ۱٪wt +۲٪wt NaCl ۷۷
شکل ۴-۳ اثر دبی بر اشباع نفت باقی‌مانده در تزریق سورفکتانت TTAB ۱٪wt+۲٪wt NaCl ۷۸
شکل ۴-۴ مقایسه‌ی اثر سورفکتانت آنیونی و کاتیونی در دبی ثابت ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت ۷۹
شکل ۴-۵ مقایسه‌ی اثر سورفکتانت آنیونی و کاتیونی در دبی ثابت ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت ۸۰
شکل ۴-۶ تزریق سورفکتانت SDS۱wt٪ در بازه های زمانی مختلف در دبی ۰,۲ میلی لیتر بر ساعت ۸۱
شکل ۴-۷ تزریق آلف) سورفکتانت SDS ب) سورفکتانت TTAB ج) آبنمک در دبی ۰,۲ میلی لیتر بر ساعت در زمان رخنه ۸۳
شکل ۴-۸ تغییرات اندازه حباب‌های تولیدشده برحسب دبی و فشار ۸۴
شکل ۴-۹ فوم تر و خشک ۸۵
شکل ۴-۱۰ توزیع اندازهی حبابها در ورودی میکرومدل ۸۵
شکل ۴-۱۱ تزریق فوم TTAB با دبی ۰,۲ میلیلیتر بر ساعت و فشار ۳۰۰ میلی بار در میکرومدل ۸۶
شکل ۴-۱۲ مقایسه تزریق فوم SDS و TTAB در میکرومدل ۸۷
شکل ۴-۱۳ برشی از میکرومدل در تزریق فوم ۸۸
شکل ۴-۱۴ تزریق فوم الف)SDS ب)TTAB پس از زمان ۹ ثانیه ۸۹

فهرست علائم

عدد باند	Bo
عدد مویینه	Ca
کشش سطحی	γ
ویسکوزیته	μ
چگالی	ρ
نسبت تحرک‌پذیری	M
تراوایی	K
فوم	F
تحرک‌پذیری فاز جابجاکننده	λ_f
تحرک‌پذیری فاز جابجاشونده	λ_o
میزان گذردهی مایع	ε
میزان گذردهی فضای آزاد	ε_0
جریان الکتریکی	I
ضریب کشسانی فوم	E_v
ضریب کشسانی فوم تر	E'_v

۱- فصل اول: مقدمه‌ای بر ازدیاد برداشت

۱-۱- مقدمه

۱-۱-۱- برداشت نفت

عملیات بازیافت نفت از مخازن به صورت سنتی به ترتیب وقوع زمانی تولید به سه مرحله تقسیم می‌شود: مراحل اولیه، ثانویه و ثالثیه. در مرحله اولیه تولید نفت بر اثر انرژی طبیعی موجود در مخزن می‌باشد. این نیروهای طبیعی عبارتند از[۱]:

نیروهای ناشی از انبساط[1] آب، گاز، نفت و همچنین خلل و فرج

نیروهای رانش گاز محلول[2]

نیروهای رانش کلاهک گازی[3]

نیروهای رانش آبده[4] مخزن

ریزش ثقلی[5]

مرحله ثانویه معمولاً پس از افت تولید مرحله اولیه می‌باشد. فرآیندهای ثانویه تولید به صورت سنتی عبارتند از سیلاب زنی با آب، حفظ فشار و تزریق گاز. اگرچه امروزه، تولید ثانویه غالباً به سیلاب زنی با آب اطلاق می‌گردد. تولید ثالثیه عبارت است از استفاده از گازها به صورت امتزاجی، مواد شیمیایی و انرژی گرمایی پس از غیراقتصادی شدن تولید بر اثر فرآیندهای اولیه و ثانویه تولید [۲].

ازآنجاکه در قرن حاضر، نفت یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تلقی می‌شود، لذا دست‌اندرکاران

---

1 Expansion Drive

2 Solution Gas Drive

3 Gas Cap Drive

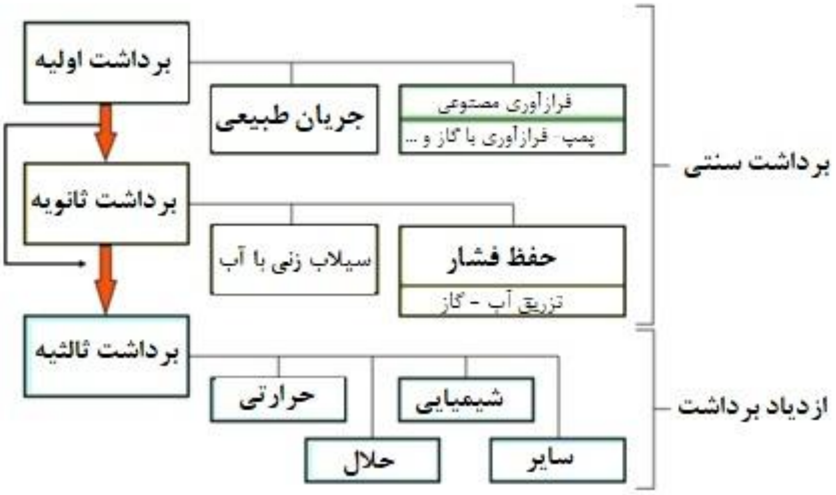
4 Aquifer Drive

5 Gravity Segregation

صنعت نفت بر آن هستند که با استفاده از تکنولوژی نوین حداکثر بهره‌برداری از مخازن نفتی را بنمایند.

در مرحله‌ی برداشت اولیه معمولاً حدود ۵ تا ۱۵ درصد از نفت اولیه در مخزن برداشت می‌شود. به کمک برداشت ثانویه حدود ۲۵ درصد بقیه نفت اولیه استخراج می‌شود. روش‌های برداشت اولیه و ثانویه، به روش‌های برداشت سنتی مرسومند و حدوداً ۳۰ تا ۵۰ درصد نفت اولیه با این روش‌ها استخراج می‌شود. ۵ تا ۳۵ درصد دیگر نفت اولیه به کمک روش‌های ازدیاد برداشت می‌تواند استخراج شود.

ازاین‌رو می‌توان گفت که افزایش نیاز و مصرف از یک طرف و کاهش تدریجی موجودی مخازن دراثر بهره‌برداری از طرف دیگر، انگیزه اصلی و دلیل مهمی برای مطالعه کلیه روش‌های بازیافت ثالثیه و انتخاب بهترین روش برای افزایش بازیافت می‌باشد. در شکل ۱-۱ روش‌های برداشت اولیه، ثانویه و ثالثیه نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ روش‌های برداشت اولیه، ثانویه و ثالثیه[۳]

۱-۱-۲- مرحله بازیافت یا استخراج ثالثیه نفت

روش‌های استخراج ثالثیه و یا ازدیاد برداشت نفت [1](EOR) عموماً به تکنیک‌هایی اطلاق می‌شود که برای بازیابی بیشتر نفت از مخزن بعد از مراحل بازیابی اولیه و ثانویه صورت می‌گیرند. انتخاب سیال به روش تزریق، به‌طور گسترده تحت تأثیر شرایط زمین‌شناسی، ترکیب سیالات مخزن، هزینه‌ی سیال تزریقی و در دسترس بودن آن بستگی دارد[۴].

به‌طورکلی درون مخزن، سه نیرو بر چگونگی حرکت سیال درون محیط متخلخل و درنتیجه میزان بازیافت نفت تأثیرگذارند: نیروی لزجی، نیروی جاذبه و نیروی مویینه. نیروهای مویینه از طریق دو عدد بدون بعد مویینه[۲] و پیوستگی باند[۳] به نیروهای لزجی و جاذبه مرتبط می‌شوند.

عدد مویینه (کاپیلاری) نیروهای لزجی و نیروهای مویینه در محیط متخلخل را مقایسه می‌کند و به صورت رابطه (۱-۱) تعریف می‌شود:

$$N_{Ca} = -\frac{k\nabla p}{\gamma} \qquad (۱-۱)$$

که N_{Ca} عدد بی‌بعد مویینه است k تروایی محیط متخلخل، ∇p گرادیان فشار و γ کشش سطحی فاز جابجا شونده و جابجا کننده است. نیروی مویینه نقش مهمی در به دام افتادن نفت در محیط متخلخل ایفا می‌کند. اگر بتوان نیروی مویینه را کاهش داد نیروی لزجی غالب می‌شود و نفت بهتر جابجا می‌شود. برای ازدیاد برداشت بهتر عدد مویینه باید با کاهش کشش سطحی، افزایش یابد[۵].

در مقیاس میکرو نیروهای کشش سطحی در جریان چند فازی می‌تواند از نیروی جاذبه اهمیت بیشتری داشته باشند. عدد پیوستگی باند (Bo) نیروهای کشش سطحی را با نیروی جاذبه مقایسه

---

[1] Enhance Oil Recovery

[۲] Capillary Number

[۳] Bond Number

می‌کند و به صورت رابطه (۱-۲) تعریف می‌شود[۶].

$$Bo = \frac{(\Delta\rho)gd^2}{\gamma} \qquad (۱-۲)$$

که $\Delta\rho$ اختلاف چگالی دو فاز، d طول مشخصه کانال، g نیروی جاذبه و γ کشش سطحی بین دو فاز است.

در صورت داشتن عدد مویینه کوچک‌تر از $۱۰^{-۳}$ و همچنین عدد پیوستگی باند کوچک‌تر از ۱۰، نیروهای مویینه غالب خواهند بود[۷].

عدد بدون بعد مهم دیگر در حرکت سیالات در محیط متخلخل، نسبت تحرک[۱] می‌باشد. نسبت تحرک پذیری اکثراً برای مقایسه‌ی تحرک پذیری فاز جابجاکننده[۲] و فاز جابجا شونده[۳] به کار برده می‌شود. در ازدیاد برداشت غالباً نفت فاز جابجا شونده و سیال تزریقی به مخزن فاز جابجا کننده در نظر گرفته می‌شوند. نسبت تحرک به صورت رابطه‌ی (۱-۳) بیان می‌شود[۵].

$$M = \frac{\lambda_f}{\lambda_o} = \frac{\frac{k_{r,D}}{\mu_D}}{\frac{k_{r,d}}{\mu_d}} = \frac{k_{r,D}\mu_d}{k_{r,d}\mu_D} \qquad (۱-۳)$$

که M نسبت تحرک‌پذیری، λ_f و λ_o تحرک پذیری فاز جابجاکننده و فاز جابجاشونده، $k_{r,D}$ و $k_{r,d}$ تراوایی نسبی فاز جابجاکننده و فاز جابجا شونده، μ_D و μ_d ویسکوزیته‌ی فاز جابجاکننده و فاز جابجا شونده است. طبق قانون دارسی[۴] تحرک‌پذیری نسبت مستقیم با تراوایی k و نسبت عکس با ویسکوزیته‌ی μ دارد.

---

[1] Mobility Ratio

[2] Displacing Phase

[3] Displaced Phase

[4] Darcy Law

نسبت تحرک کوچک‌تر و یا مساوی با یک، بیانگر جابجایی پایدار و مطلوب می‌باشد؛ بنابراین جهت افزایش ضریب بازیافت از مخازن، می‌بایست اعداد بدون بعد مویینه و پیوستگی باند را افزایش و نسبت تحرک را کاهش داد.

دو مبحث مهم در هر فرآیند ازدیاد برداشت نفت وجود دارند:

۱ـ تأثیر سیال فرآیند در جابه‌جایی نفت داخل حفرات مخزن (جابه‌جایی میکروسکوپیک) و۲ـ حجمی از مخزن که با سیال تزریق‌شده تماس یافته است (جابه‌جایی ماکروسکوپیک).

به‌عبارت‌دیگر راندمان کلی جابه‌جایی در هر فرآیند برداشت نفت می‌تواند در دو بخش راندمان جابه‌جایی میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک بررسی شود. راندمان کلی جابه‌جایی حجم هیدروکربن جابه‌جاشده به حجم هیدروکربن درجا در شروع فرآیند (در شرایط فشار و دمای یکسان) است که برابر حاصل‌ضرب راندمان جابه‌جایی میکروسکوپیک و ماکروسکوپیک است.

راندمان جابه‌جایی میکروسکوپیک به طور قابل‌ملاحظه‌ای مقدار موفقیت یا شکست یک فرآیند را مشخص می‌کند. با توجه به این‌که فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت شامل تزریق توده سیالات مختلف-اند، راندمان جابه‌جایی این توده‌ها در داخل مخزن اهمیت خاصی دارد. راندمان پایین به اتلاف و از کارافتادگی توده تزریقی و درنهایت بازده ضعیف پروژه می‌انجامد[۲].

میکرومدل‌ها با هدف درک بهتر از فرآیندهای ازدیاد برداشت در مقیاس حفره و مشاهده مستقیم جریان سیال در محیط‌های متخلخل به کار می‌روند. این میکرومدل‌ها به‌عنوان شبیه‌ساز دوبعدی سنگ مخزن نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین مزیت این میکرومدل‌ها قابلیت مشاهده حرکت سیال در آن‌ها است که از لحاظ کیفی به تهیه بهترین مدل‌های حرکت سیال در محیط متخلخل کمک می‌نماید.

۱-۱-۳- معرفی میکرومدل

میکرومدل یک محیط متخلخل شفاف است که برای بررسی و مطالعه رفتار حرکت سیال و همچنین مکانیزم جابه‌جایی فازها در مقیاس حفره استفاده می‌شود. طبیعت شفاف این دستگاه آن را برای مشاهده وقایع در مقیاس حفره بسیار سودمند و درنتیجه در مقایسه با سایر دستگاه‌ها در مطالعات مهندسی مخازن نفت بسیار متمایز می‌نمایند. در مخازن زیرزمینی از قبیل نفت، گاز و آب نحوه حرکت سیالات مشخص نیست لذا استفاده از میکرومدل شفاف امکان انجام مطالعات پایه و توسعه تئوری‌های انتقال پدیده‌ها و همچنین مشاهده کمی و کیفی وقایع در این سیستم‌ها را میسر می‌سازد. از مزایای این دستگاه می‌توان مواردی از قبیل امکان مطالعه مشاهده‌ای، امکان بررسی وقایع و مکانیزم جابه‌جایی فازها در محیط‌های متخلخل متفاوت در مقیاس حفره را نام برد. ازآنجاکه بازدهی در مقیاس حفره در فرآیندهای ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز اهمیت ویژه‌ای دارد و کنترل‌کننده بازدهی نهایی مخزن می‌باشد اهمیت دستگاه میکرومدل به عنوان تنها دستگاه موجود برای مطالعه در مقیاس حفره مشخص می‌شود. ابعاد حفره و گلوگاه‌ها در میکرومدل در حدود چندمیکرون است لذا ساخت الگوهای مناسب جریان مهم‌ترین و مشکل‌ترین مرحله در انجام مطالعات میکرومدل است.

ماتکس و کیت[۱] در سال ۱۹۶۱ مدل‌های اولیه میکرومدل را توسعه داده‌اند[۸]. این مدل شبکه‌ای از کانال‌های مستقیم پیوسته بوده است. مدل آن‌ها یک محیط عالی برای مشاهده سطوح تماس بین سیالات در محیط متخلخل ایجاد کرده بود آن‌ها از این مدل برای بررسی اثر ترشوندگی بر عملیات تزریق آب در تولید نفت استفاده کردند. در سال ۱۹۸۷، اوت و بریقام[۲] از میکرومدل‌های سیلیکونی استفاده کردند که به‌منظور افزایش و ایجاد ساختار حفره‌های دقیق‌تر ایجاد گردیدند[۹]. میکرومدل‌های توسعه هرنبرک و همکارانش[۳] در سال ۱۹۹۱ ازجمله بهترین نمونه‌های موجود

---

[1] Mattax and Kyte

[2] Owete and Brigham

[3] Hornbrook et al

هستند[۱۰]. یک تصویر کاملاً دقیق از یک برش مربوط به سنگ ماسه‌ای برا[1] بر روی صفحه سیلیکونی حک شده که در آن از تصاویر مربوط به میکروسکوپ‌های الکترونی استفاده شده بود. این مدل‌ها قابلیت ایجاد ساختارهایی را داشته‌اند که ازلحاظ ترشوندگی و ناهمواری‌های سطحی تا حد زیادی به سنگ‌های ماسه‌ای اولیه نزدیک بودند. به علاوه در هنگام تولید این میکرومدل‌ها میزان عمق حفره‌ها و ساختار کاملاً تا حد زیادی قابل کنترل بودند. .

۱-۱-۴- میکروفلوئیدیک

ریزسیال شناسی[2] یا میکروفلوئیدیک که نیز به عنوان آزمایشگاه روی تراشه[3] بیان می‌شود دانش به‌کارگیری و کنترل مقادیر بسیار کمی از سیال در دستگاه‌های به شکل خیلی ریز است. تحقیقات در میکروفلوئیدیک بر روی اختلاط و آنالیز جریان سیال و ساخت دستگاه‌ها متمرکز شده است. اندازه دستگاه‌های میکروفلوئیدیک می‌تواند از چند صد نانومتر تا چند میلی‌متر تغییر کند [۱۱, ۱۲].

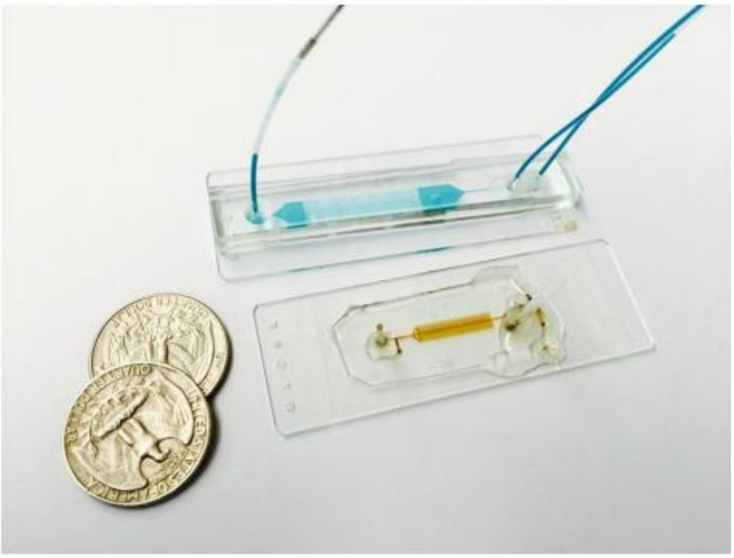
میکروسیالات به علت مزایایی مثل ارزانی و ساخت سریع، نیاز به مقدار کم نمونه آزمایشگاهی و کیفیت بالا در کنترل و مشاهده در تحقیقات استفاده می‌شوند. میکروسیالات معمولاً خیلی کوچک هستند درشکل ۱-۲ نمونه‌ای از میکروسیالات مشاهده می‌شود. فیلتر کردن مواد شیمیایی، تولید فوم و جابجایی سلول‌ها و کاربردهای پزشکی نمونه‌هایی از کاربرد میکروسیالات هستند. میکروسیالات قابلیت کاربرد بالایی درزمینه‌ی تحقیقات ازدیاد برداشت دارند. شبیه‌سازی مخازن نفتی به عنوان نمونه‌ای از محیط متخلخل در مقیاس میکرو یا نانو مثالی از کاربرد میکروسیالات در ازدیاد برداشت است که اجازه می‌دهد شرایط داخل مخزن را مشاهده کرد [۱۲].

---

1 Bera

2 Microfluidics

3 Lab on a chip



شکل ۱-۲ نمونه‌ای از میکروسیالات [۱۲]

در دهه‌های اخیر بیشتر تمرکز محققین بر مشاهده‌ی مستقیم جریان چند فازی در سیستم‌های میکروسیالات بود[۱۳].

از روش‌های مختلف حکاکی بر روی شیشه یا سیلیکون برای شبیه‌سازی محیط متخلخل استفاده می‌شود اما در مطالعات گذشته عرض کانال از مرتبه‌ی ۱۰۰۰ میکرون یا میلی‌متر بوده درحالی‌که امروزه توانایی ساخت کانال‌های کوچک‌تر را دارند که در مقایسه با ماسه‌سنگ[۱] از نظر اندازه حفره‌ها و تراوایی بیشتر به مخازن واقعی شباهت دارند. لی و همکارانش از میکرومدل شیشه‌ای با اندازه حفره‌های ۴۰۰-۶۰۰ میکرون برای مطالعه‌ی کنترل تحرک پذیری گاز به کمک فوم استفاده کردند[۱۴].

در مقایسه مدل‌های شیشه‌ای یا سیلیکونی، PDMS راحت‌تر ساخته می‌شوند و با مواد شیمیایی پرخطر درگیر نیست و به‌راحتی قابل طراحی و ساخت مجدد در صورت نیاز هستند. ترشوندگی غالباً در دستگاه‌های PDMS قابل اصلاح هستند. PDMS با هیدروکربن‌هایی با وزن مولکولی کم همسازی ندارد که درنتیجه کانال ورم می‌کند بنابراین برای هر نوع نفت کاربرد ندارد[۱۵].

---

[1] sand pack

۱-۱-۵- PDMS

با ظهور علم لیتوگرافی دستگاه‌های میکروسیالات معمولاً با PDMS ساخته می‌شوند. از مزایای PDMS می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۶].

- PDMS می‌تواند با سطوح به سطح اتمی برسد و به‌راحتی با هرشکلی مطابقت پیدا کند و برای کارهای حکاکی ایده‌ال است. به طور عادی الاستومر سفتی با مدول برشی 0.25MPa و مدول یانگ حدود 0.5MPa است.
- PDMS دردسترس و ارزان است.
- PDMS در محدوده دید نور شفاف است که به آنالیز بهتر کمک می‌کند.
- PDMS به‌طور طبیعی آب‌گریز هستند اما به‌راحتی با عملیات شیمیایی با پلاسمای اکسیژن یا UV ozone قابل اصلاح هستند [۱۷-۲۰].

دستگاه‌های PDMS می‌توانند در شبیه‌سازی مخازن نفت در شرایطی مثل شوری بالا یا فشار بالا استفاده شوند. PDMS می‌تواند شرایط دمایی متوسط مخازن را تحمل کند ولی در دمای بالا لازم است که از شیشه یا سیلیکون استفاده شود. وسایل شیشه‌ای یا سیلیکونی معمولاً به روش حکاکی با هیدروفلوریک اسید در طرحی با پوشش فلزی به عنوان زیر لایه فرعی ساخته می‌شود و سپس با یک لایه شیشه برای دمای بالا تضمین می‌شود. وسایل بدون پلیمر شرایط زیادی را می‌توانند تحمل کنند ولی ساخت آن‌ها مشکل است.

۱-۲- ساختار گزارش

در فصل دوم مروری بر کارهای گذشته محققان در رابطه با فوم و ماده فعال سطحی انجام خواهد شد. در این فصل انواع مواد فعال سطحی و خواص آن‌ها، فوم و ساختار و خواص آن، مکانیسم‌های تولید فوم و رژیم‌های جریان فوم در محیط متخلخل، پایداری فوم و عوامل مؤثر بر آن و در انتها چند مورد از کاربردهای میدانی فوم در صنعت نفت اشاره خواهد شد. در فصل سوم مراحل ساخت

دستگاه‌های میکروفلوئیدیک به‌طور کامل تشریح شده، تجهیزات آزمایشگاهی مورداستفاده برای تست-های سیلاب زنی، روش انجام آزمایش‌ها و همچنین مواد استفاده‌شده می‌پردازیم. در فصل چهارم به نتایج آزمایش‌های حاصل از تزریق آب‌نمک، ماده فعال سطحی آنیونی SDS، ماده فعال سطحی کاتیونی TTAB و نحوه تولید فوم و تزریق آن در میکرومدل بررسی خواهد شد. در فصل پایانی نیز نتیجه‌گیری حاصل از این تحقیق و پیشنهادهایی جهت مطالعات آتی بیان گردیده است.

۲- فصل دوم: مروری بر پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

در این فصل پیش‌زمینه‌ی کوتاهی از اصول اساسی تئوری و کاربردی فوم ذکر می‌شود. این فصل شامل مفاهیم اصلی فوم، ساختار و خواص فوم، نقش سورفکتانت در فوم، مکانیسم‌های تولید فوم و رژیم‌های فوم در محیط متخلخل، پایداری فوم و عوامل مؤثر برآن و کاربردهای میدانی فوم در صنعت نفت پرداخته می‌شود.

۲-۲- فوم

تزریق گاز به مخزن یکی از پرکاربردترین روش‌های ازدیاد برداشت نفت به شمار می‌رود. چنانچه گاز طی یک یا چند تماس با نفت امتزاج یابد، می‌تواند در حجم جاروب شده تقریباً تمام نفت را جایگزین نماید؛ اما ناهمگونی مخزن و بالاروی ثقلی گاز منجر به کاهش بازده جاروب می‌شود [۲۱].

استفاده از فوم مشکلات ناشی از تزریق گاز مانند بازده پایین جاروب را کاهش می‌دهد. مکانیسم اصلی که فوم با استفاده از آن تحرک گاز را کاهش می‌دهد بی‌حرکت کردن و یا به دام انداختن بخش زیادی از گاز در محیط متخلخل و افزایش ویسکوزیته ظاهری گاز می‌باشد[۲۲].

تاریخچه استفاده از فوم در صنعت نفت برای بهبود بازدهی جاروبی در فرآیند سیلاب زنی گاز به ۶۰ سال پیش برمی‌گردد[۲۳-۲۷].

ایده‌ی استفاده از فوم برای کنترل تحرک گاز به‌وسیله‌ی باند و هالبروک[1] در سال ۱۹۵۸ ارائه شد و توسط فرآید[2] ادامه یافت[۲۸, ۲۹]. در صنعت نفت فوم به دو دسته تقسیم می‌گردد. فوم توده‌ای و فوم در محیط متخلخل. فوم توده‌ای به حجمی اشاره دارد که در آن توده‌ای از حباب‌ها به همدیگر متصل هستند. فوم توده‌ای به‌صورت یک فاز مجزای همگن رفتار می‌کند و در آن سرعت فازهای گاز و مایع یکسان در نظر گرفته می‌شوند. حباب‌ها در فوم توده‌ای نسبت به کانال‌های جریان نسبتاً کوچک

---

[1] Bond and Holbrook

[2] Fried

هستند. در صنعت نفت، فوم توده‌ای در حفاری، سیمان‌کاری و ایجاد شکاف به کار می‌رود[۳۰].

فوم در محیط متخلخل به‌وسیله‌ی توزیع اندازه خلل و فرج و گلوگاه خلل و فرج مشخص می‌گردد. حباب‌های مجزا یک یا چندین حفره‌ی محیط متخلخل را اشغال می‌کنند، به این معنی که فوم به‌صورت یک فاز پیوسته همگن درون محیط متخلخل، عمل نمی‌کند. به‌عبارت‌دیگر، فوم در محیط متخلخل یک فاز ناپیوسته است و در آن حباب‌های گاز توسط فیلم‌های نازک مایع از دیگر حباب‌ها مجزا می‌شوند[۳۱].

فوم پراکندگی نسبتاً همگن فاز گاز در مایع تعریف می‌شود؛ که در آن حباب‌های گاز توسط لایه نازک مایع به نام لملا جدا می‌شود.

به علت کشش سطحی بالا میان فاز گازی و آبی برای تشکیل سطح مایع و گاز، انرژی زیادی لازم است؛ بنابراین برای اینکه فوم تشکیل‌شده دارای پایداری بیشتری باشد باید انرژی لازم جهت تشکیل سطح میان دو فاز کاهش یابد که بدین منظور از ماده‌های فعال سطحی استفاده می‌شود که در ادامه به این موارد بیشتر پرداخته می‌شود.

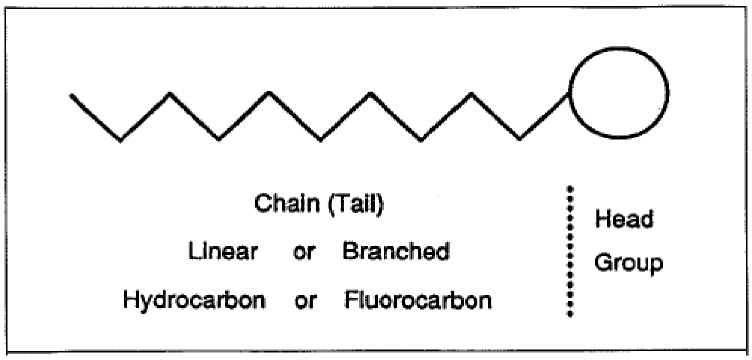
۲-۳- سورفکتانت در فوم

ماده فعال سطحی معمولاً یک ترکیب آلی می‌باشد که از دو قسمت تشکیل‌شده است. قسمت دنباله[۱] که یک زنجیره هیدروکربنی آب‌گریز است و قسمت دیگر سر[۲] قطبی که قسمت آب‌دوست را تشکیل می‌دهد. با این توصیف مواد فعّال سطحی هم در حلال‌های آلی و هم در آب قابل انحلال می‌باشند. آن‌ها با جذب روی سطح تماس مایع/ مایع خواص سطحی را به‌شدت تغییر می‌دهند و باعث کاهش کشش بین سطحی می‌شوند[۳۲]. شکل ۲-۱ نمای ساده‌ای از یک مولکول مواد فعال سطحی را نشان می‌دهد.

---

[1] Tail

[2] Head



شکل ۲-۱ نمای ساده‌ای از یک مولکول مواد فعال سطحی[۳۳]

مواد فعال سطحی بر اساس خاصیت سر قطبی باردارشان به شکل زیر دسته‌بندی می‌شوند:

۱- مواد فعال سطحی آنیونی[1] که دارای استفاده وسیعی در ازدیاد برداشت می‌باشند. دلیل این امر جذب حداقلی روی سطح ماسه‌سنگ به دلیل منفی بودن بار دانه‌های ماسه می‌باشد.

۲- مواد فعال سطحی غیر یونی[2] که معمولاً به‌عنوان ماده فعال سطحی همراه[3] به‌منظور بهبود رفتار فازی به‌کاربرده می‌شوند. این مواد مقاومت زیادی در برابر شوری بالا دارند، اما کشش بین سطحی را به‌خوبی مواد فعال سطحی آنیونی کاهش نمی‌دهند.

۳- مواد فعال سطحی کاتیونی[4] که به دلیل جذب بالا روی سطح ماسه‌سنگ ازلحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیستند، از طرف دیگر این مواد برای تزریق در سنگ‌های کربناته به‌منظور تغییر ترشوندگی از نفت دوست به آب‌دوست قابل‌استفاده هستند.

۴- مواد فعال سطحی یون دوقطبی[5] که شامل دو گروه فعال هستند. نوع این ماده فعال سطحی می‌تواند آنیونی- بدون بار، کاتیونی- بدون بار و کاتیونی - آنیونی باشد. این مواد در برابر دما و شوری

---

[1] Anionic
[2] Non-Ionic
[3] Co-surfactant
[4] Cationic
[5] Zwitterionic

مقاومت بالایی دارند، اما خیلی گران‌قیمت می‌باشند. نام دیگری که به این مواد فعال سطحی اختصاص دارد آمفوتریک [1] می‌باشد.

غلظت بحرانی مایسل (CMC) [2] غلظتی از ماده فعال سطحی تعریف می‌شود که بالاتر از آن به‌طور ناگهانی مایسل تشکیل می‌شوند. در غلظت‌های کم ماده فعال سطحی انرژی آزاد سیستم به دو دلیل کاهش می‌یابد:

۱- کاهش انرژی سطح بین دو سیال

۲- جابه‌جایی بخش‌های آب‌گریز ماده فعال سطحی از تماس با آب

با افزایش غلظت ماده فعال سطحی، سطح مشترک بین دو سیال از ماده فعال سطحی پوشیده می‌شود و کشش بین سطحی بازهم کاهش می‌یابد. سپس ماده فعال سطحی به مایسل‌هایی متراکم می‌شود و انرژی سیستم به دلیل کاهش سطح تماس قسمت‌های آب‌گریز با آب بازهم کاهش می‌یابد.

اما با افزایش غلظت به بالای غلظت بحرانی مایسل کشش بین سطحی تقریباً ثابت می‌ماند و دیگر روند نزولی نخواهد داشت. مواد فعال سطحی که در ازدیاد برداشت استفاده می‌شوند دارای غلظت بحرانی مایسل بین $۱۰^{-۵}$ تا $۱۰^{-۴}$ گرم بر مول می‌باشند[۳۴].

۲-۴- فوم و ساختار آن

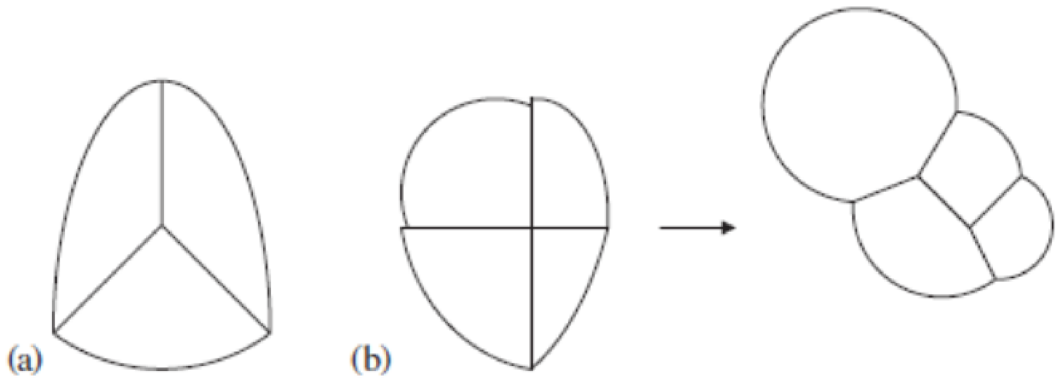
۲-۴-۱- ساختار فوم

فوم ساختار بسیار پیچیده و مبهمی دارد، در ابتدا دو حباب با شعاع‌های یکسان با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند و می‌چسبند، این منجر می‌گردد تا سطح تماسی به وجود آید و درنهایت حبابی با شعاع بزرگ‌تر شکل گیرد. در مرحله دوم انرژی سیستم نسبت به انرژی مرحله اول بیشتر است ازآنجایی‌که

[1] Amphoteric

[2] Critical Miscle Concentration

سیستم سطح تماس (dAc) را به وجود آورده است تفاوت انرژی بین مرحله اول و دوم برابر γdAc خواهد بود. هنگامی‌که مرحله سوم و نهایی رخ می‌دهد کاهشی به‌اندازه ۴۱ درصد در مساحت سطح کل به وجود می‌آید؛ بنابراین در مرحله سوم و نهایی انرژی کل سیستم از انرژی مرحله اول کمتر است$\gamma dAII - III$. شکل ۲-۲ شمایی از ساختار فوم را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲ ساختار فوم سه حبابه ب) ساختار فوم چهار حبابه - ترکیب شدن حباب‌ها[۳۵]

هنگامی‌که ۳ حباب باهم در تماس باشند زاویه تعادلی برابر ۱۲۰ درجه خواهد بود. زاویه تماس به حالت تعادلی سیستم بستگی دارد، هنگامی‌که ۴ حباب باهم در تماس باشند زاویه تعادلی برابر ۱۰۹ درجه و ۲۸ دقیقه است.

دو نوع عمده از فوم‌ها وجود دارند:

- ✓ فوم‌های کروی که از حباب گازی که با فیلم ضخیم مایعی از سیال ویسکوز پوشانده شده است. این نوع فوم را می‌توان فاز رقیق پخش‌شده آنی گاز در مایع در نظر گرفت.

✓ سلول‌های گازی چندوجهی که با فرایند فرسایش[1] شکل می‌گیرد. دیواره‌های نازک و صاف که از اتصال کانال‌های با نقاط تماس شکل می‌گیرد (مرز مسطح[2]).

به علت انحنای میان رویه‌ای فشار در مرز مسطح کمتر است و ضخامت فیلم مایع ضخیم‌تر است. اختلاف فشار بین سلول‌های گاز همسایه با شعاع انحنای مرز مسطح به‌صورت رابطه‌ی (۲-۱) در ارتباط است:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \qquad (۱-۲)$$

۲-۵- خواص فیزیکی فوم‌ها

۲-۵-۱- خواص مکانیکی

تراکم‌پذیری فوم به توانایی فوم برای متراکم نمودن گاز بستگی دارد. قدرت ترکنندگی آن به خواص محلول فوم وابسته است؛ مانند هر سیستم پخش‌شده‌ای فوم نیز دارای خواص جسم جامد می‌باشد، یعنی می‌تواند شکل خود را حفظ نماید و یک ضریب تنشی داشته باشد. یکی از خواص اساسی فوم خاصیت تراکم‌پذیری فوم است؛ و ضریب کشسانی Ev به‌صورت رابطه‌ی (۲-۲) تعریف می‌شود: [۳۵]

$$E_\nu = -\frac{dp_o}{d\ln V} \qquad (۲-۲)$$

P_0 فشار خارجی که منجر به تغییر شکل می‌شود.

V حجم سیستم تغییر شکل‌دهنده

با در نظر گرفتن حجم مایع به‌صورت V_L ضریب کشسانی بالک فوم تر E'_υ به‌صورت زیر بیان

[1] Aging
[2] Plateau

می‌شود:

$$E'_{\nu} = \frac{dp_o}{d\ln V_F} = \frac{V_F dp_o}{d(V_L + V_G)} = E_{\nu}(1 + \frac{V_L}{V_G}) \quad (۳-۲)$$

بنابراین مقدار E'_{υ} فوم تر از E_V فوم خشک بیشتر است.

۲-۵-۲- خواص رئولوژیکی

مانند هر سیستم پخش‌شده‌ای فوم‌ها نیز یک سیستم غیرنیوتنی تشکیل می‌دهند، برای شناخت خواص رئولوژیکی فوم‌ها نیاز به این است تا اطلاعاتی در مورد ضریب کشسانی (ضریب تراکم‌پذیری و انبساط)، ضریب تنش، ویسکوزیته مؤثر و بازیابی کشسان در دست باشد. مطالعه خواص رئولوژیکی مشکل است زیرا با تغییر شکل این خواص تغییر می‌کنند. مناسب‌ترین هندسه برای اندازه‌گیری رئولوژی فوم صفحات موازی است. خواص رئولوژی با ویسکوزیته متغیر شناخته می‌شوند.

ویسکوزیته‌ی فوم تغییرپذیری شدیدی نسبت به‌شدت جریان دارد. جریان بعضی از فوم‌ها شبیه سیالات معمولی می‌باشد، درحالی‌که دیگر فوم‌ها دارای جریان الاستیک هستند. نتایج حاصل از مطالعات رئولوژی فوم، اغلب رفتار شبه پلاستیک را برای آن‌ها گزارش داده‌اند. وابستگی ویسکوزیته فوم به نرخ برشی باعث شده است که ویسکوزیته‌ی واقعی فوم قابل‌اندازه‌گیری نباشد. در عوض، ویسکوزیته‌های ظاهری از طریق اندازه‌گیری تنش‌های برشی به‌دست‌آمده در نرخ‌های برشی مختلف، قابل‌محاسبه است. نتایج نشان داده است که ویسکوزیته‌ی ظاهری فوم با افزایش نرخ برشی و با کاهش کیفیت فوم، کاهش می‌یابد [۳۶].

۲-۵-۳- خواص الکتریکی

فقط فاز مایع درون فوم دارای ضریب هدایت الکتریکی است، هدایت دهی ویژه فوم k_F به میزان

اندازه مایع درون فوم و ضریب هدایت آن kl بستگی دارد:

$$k_F = \frac{k_l}{nB} \tag{۲-۴}$$

n: ضریب انبساط فوم

B : ضریب ساختار فوم

ضریب ساختار فوم به عواملی چون ضریب انبساط فوم و پخش‌شدگی مایع میان مرز مسطح بستگی دارد، B با افزایش ضریب انبساط فوم بین ۱/۵ تا ۳ تغییر می‌کند.

۲-۵-۴- خواص الکتروسینتیکی

در فوم‌ها با میان‌رویه گاز و مایع باردار شده می‌توان پارامترهای الکتروسیتنیکی زیادی را ازجمله پتانسیل زتا و پتانسیل جریان را محاسبه نمود. برای مثال رابطه دبی حجمی و سیال جریانی در لوله موبین و غشاء برحسب پتانسیل زتا با رابطه اسمولچوفسکی[1] احتساب می‌گردد.

$$Q = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 I}{\eta\kappa} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 r^2}{\eta}\frac{\Delta V}{L} \tag{۲-۵}$$

که در رابطه‌ی فوق ε میزان گذردهی مایع، ε_0 میزان گذردهی فضای آزاد، I جریان الکتریکی، η ویسکوزیته مایع، r شعاع مویینه، L طول و ΔV اختلاف پتانسیل بین الکترودهای مویینه است.

تفسیر نتایج الکتروسینتیکی به علت حرکت پذیری سطح و کشسانی فیلم که موجب عدم پیوستگی در چگالی و شعاع مرز در تعادل هیدرو استاتیک و حرکت مایع می‌شود بسیار مشکل است.

[1] Smoluchowski

۲-۵-۵- خواص نوری

نابود شدن جریان درخشان عبوری از لایه فوم به علت پخش نوری شامل چندین اثر ازجمله انعکاس، شکست نور، اختلال و پخش‌شدگی نور توسط عناصر فوم و یا جذب نور توسط محلول فوم است. در فوم‌های چندوجهی سه عنصر ساختاری وجود دارند که خواص نوری کاملاً مشخصی دارند (فیلم، مرز مسطح و گوشه‌ها). خواص نوری مربوط به یک فیلم تک لایه فوم به‌صورت گسترده مطالعه شده است ولی این خاصیت برای فوم به‌عنوان یک سیستم پخش‌شده موردمطالعه زیادی قرار نگرفته است. از بین رفتن جریان نوری ($\frac{I}{I_0}$ که در آن I شدت نور گذرا از درون فوم و I_0 شدت نور برخوردی است) تابعی خطی از مساحت ویژه فوم است. این خاصیت را می‌توان برای اندازه‌گیری مساحت ویژه فوم بکار برد.

۲-۶- پدیده‌های سطحی در فوم‌ها

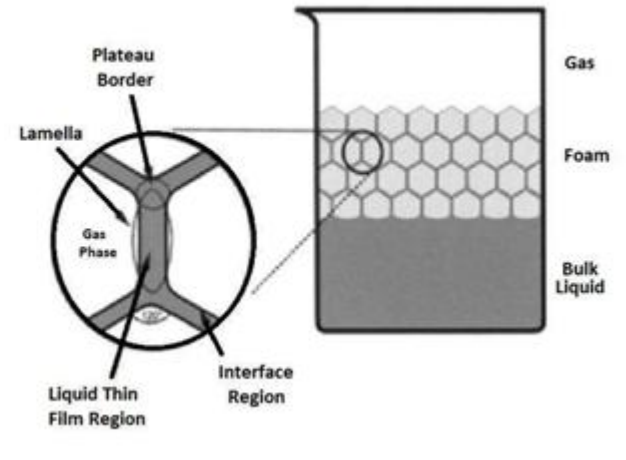
فوم‌ها یک‌فاز پخش‌شده کلوئیدی می‌باشند که فاز گاز در فاز پیوسته مایع پخش‌شده است. در مواردی فاز پخش‌شده به فاز داخلی و فاز پیوسته به فاز بیرونی اطلاق می‌گردد. با توجه به اینکه حباب در فوم‌ها چندوجهی می‌باشند و کروی نیستند نباید هنگامی‌که صحبت از قطر حباب می‌شود تصوری همچون قطر کرات در نظر داشت. در حالت‌های واقعی تشکیل فوم قطر حباب‌های فوم و ضخامت فیلم مایع از حالت کلاسیک آن بیشتر است. در حقیقت قطر حباب‌های فوم از ۱۰ میکرومتر معمولاً بیشتر هستند و گاهی به بالاتر از ۱۰۰۰ میکرومتر نیز می‌رسند.

مقاومت‌پذیری فوم‌ها لزوماً تابع اندازه قطرات نیستند هرچند که ممکن است برای هر نوع فوم یک سایز بهینه قطره وجود داشته باشد. با اینکه به‌صورت معمول مقاومت فوم‌ها بر اساس اندازه قطره شناخته می‌شوند باید توجه نمود که همیشه یک مجموعه از سایزهای مختلف در هر نوع فوم وجود دارد که معمولاً به‌صورت هیستوگرام سایز قطره و در صورت وجود اطلاعات کافی به‌صورت تابع پخش

اندازه نشان داده می‌شود.

بخشی از سیستم دوبعدی کلی فوم در شکل ۲-۳ نشان داده‌شده است. ساختار کلی و عمومی فوم از فاز مایع به‌صورت بالک در پایین و فاز دوم به‌صورت بالک در این حالت گاز در بالا تشکیل‌شده است. در قسمت بزرگنمایی شده قسمت‌های مختلف ساختار فوم به تصویر کشیده شده است. فاز گاز از فیلم مایع به‌صورت میان رویه دوبعدی جدا می‌گردد. در واقعیت صفحه خاصی بین خواص مایع و گاز وجود ندارد. با توجه به علم ریاضیات رفتار فیزیکی این میان رویه از طریق فاز دوبعدی سطح تخمین زده می‌شود[1].

فیلم‌ها همان‌گونه که در شکل ۲-۳ نشان داده‌شده است در زاویه ۱۲۰ درجه به هم می‌رسند (زاویه استینر[2]) که از برابر سازی بردارهای کشش سطحی و یا نیروی انقباضی بین فیلم‌های مایع به دست می‌آید. حباب‌ها در فوم خود را به‌صورت چندوجهی نظم می‌دهند به‌طوری‌که در هر مرز لملا سه لملا در زاویه ۱۲۰ درجه وجود دارند، همان‌گونه که عنوان شد مرزی که لملاها به یکدیگر می‌رسند به مرز مسطح اطلاق می‌شود.



شکل ۲-۳: تصویری از سیستم کلی فوم که بخش‌های مختلف لملا فوم را نشان می‌دهد[۳۷]

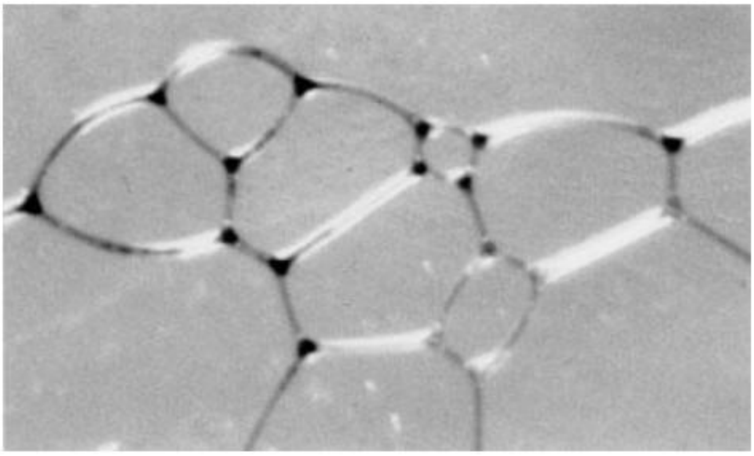
---

1 Gibbs Surface

2 Steiner

در سه بعد چهار لملا در نقطه‌ای به‌صورت زاویه چهاروجهی به‌صورت تقریبی ۱۰۹ درجه به هم می‌رسند. مشاهدات دینامیک فوم نشان می‌دهد هنگامی‌که تعداد بیشتری از فیلم مایع در کنار هم قرار می‌گیرند خیلی سریع به‌صورت دوبعدی و یا سه‌بعدی تغییر وضعیت می‌دهند.

شکل ۲-۴ نمایی از یک فوم واقعی که قطرات مایع نفت درون لملا فوم وجود دارد را نشان می‌دهد. این حالت زمانی به وجود می‌آید که از محلول فوم به‌عنوان شوینده برای پاک‌سازی بکار برده شود و یا هنگامی‌که فوم در مخازن زیرزمینی برای ازدیاد برداشت نفت بکار برده شود.



شکل ۲-۴: شماتیکی از ساختار فوم در صنعت نفت که قطرات نفت درون ساختار آن وجود دارد [۳]

۲-۷- چهار نیروی مؤثر بر روی فوم‌ها

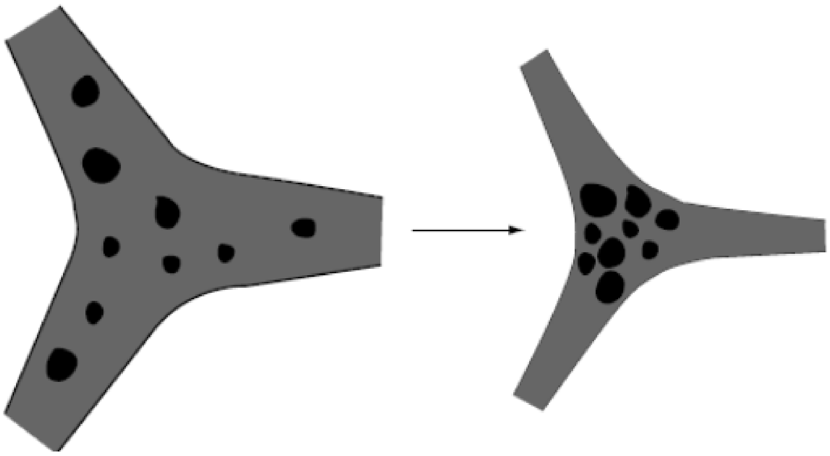
یکی از واضح‌ترین نیروهای مؤثر بر روی فوم‌ها نیروی گرانشی است که موجب تخلیه مایع بین حباب‌های گاز می‌گردد. شدت تخلیه مایع را می‌توان با افزایش ویسکوزیته بالک مایع و یا اضافه نمودن ذرات جامد و قطرات امولسیون کم کرد.

جدول ۲-۱ نیروهای مؤثر بر فوم‌ها و اثر آن‌ها

علت	اثر
نیروی گرانش	تخلیه به محلول فوم
اختلاف فشار بین لملا و مرز مسطح	تخلیه به مرز مسطح
اختلاف فشار بین گازهای درون حباب‌های با سایز متفاوت	نفوذ گاز از حباب‌های کوچک‌تر به حباب‌های بزرگ‌تر
همپوشانی مابین دولایه‌ی الکتریکی	افزایش پایداری فوم

این ذرات در مرز مسطح به دام می‌افتند و با افزایش منطقه‌ای ویسکوزیته موجب جلوگیری از تخلیه مایع می‌گردند (شکل ۲-۵). برای فوم‌های پایداری که عدد فوم بالایی دارند و لملا نازکی در آن‌ها شکل می‌گیرد نیروهای گرانشی کم‌کم جایگزین نیروهای مویینه برای تخلیه فوم می‌شوند. این نیروها به‌این‌علت شکل می‌گیرند که فشار هیدرو استاتیک بر روی مرز مسطح از لایه لملا کمتر است. این فشار هیدرو استاتیک پایین‌تر به علت انحنای سطح مایع بر روی مرز مسطح است، بنابراین تمایلی برای حرکت مایع از لملا به سمت مرز مسطح وجود دارد که از پایداری فوم می‌کاهد.

نیروی سومی که بر فوم‌ها اثرگذار است و کم به نظر می‌رسد ازآنجا نشئت می‌گیرد که فشار گاز درون حباب به‌صورت معکوس با شعاع حباب رابطه دارد، بنابراین حباب‌های کوچک‌تر از حباب‌های بزرگ‌تر پرفشارتر هستند بنابراین انتقالی از حباب‌های کوچک‌تر به حباب‌های بزرگ‌تر توسط مایع وجود دارد؛ بنابراین امکان از بین رفتن فوم بدون شکستن لملا وجود دارد. این انتقال گاز توسط مایع به حلالیت گاز درون مایع بستگی دارد؛ بنابراین پایداری فوم آرگون در محلول آبی از پایداری فوم دی‌اکسید کربن با سیستم مشابه بیشتر است زیرا حلالیت دی‌اکسید کربن در آب نسبت به آرگون بیشتر است.



شکل ۲-۵ قطرات امولسیون و ذرات جامد می‌توانند از تخلیه مایع فوم جلوگیری کنند [۳۵]

نیروی چهارمی بر روی فوم‌های بسیار پایدار مؤثر است و لملای بسیار نازکی را شکل می‌دهد. یک همپوشانی بین دولایه الکتریکی که از ماده فعال سطحی جذب‌شده در میان رویه هوا مایع نشئت می‌گیرد. این همپوشانی منجر به نیروی دافعه می‌گردد و از نازک‌تر شدن بیشتر لملا جلوگیری می‌کند. این پدیده بسته به قدرت یونی سیستم در فاصله‌ای به‌اندازه ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر رخ می‌دهد. اخیراً نشان داده‌شده است که حتی مواد فعال سطحی غیر یونی موجب ایجاد سطحی با بار منفی بر روی میان رویه می‌شود. افزایش نمک دولایه الکتریکی را فشرده می‌سازد و در طی آن پایداری کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش نمک CPP[1] ماده فعال سطحی یونی افزایش می‌یابد؛ و اکتیویته سطح موجب می‌گردد تا تمایل برای ایجاد فوم افزایش یابد؛ بنابراین دو اثر متقابل از افزایش نمک به محلول وجود دارد.

آخرین عاملی که بر روی طول عمر فوم مؤثر است ویسکوزیته مایع است، طبیعتاً فوم‌های با ویسکوزیته بالا بسیار پایدار خواهند بود، در بسیاری از اوقات لازم نیست که بالک مایع تا زمانی که میان رویه ویسکوزیته بالایی دارد ویسکوز بماند. این حالت زمانی رخ می‌دهد که فاز بلوره‌ای لملا مایع

[1] Critical Packing Parameter

در سیستم شکل گیرد. این فاز در میان رویه گاز مایع تغلیظ می‌شود و به‌صورت محلی باعث افزایش ویسکوزیته و درنهایت پایداری فوم می‌گردد.

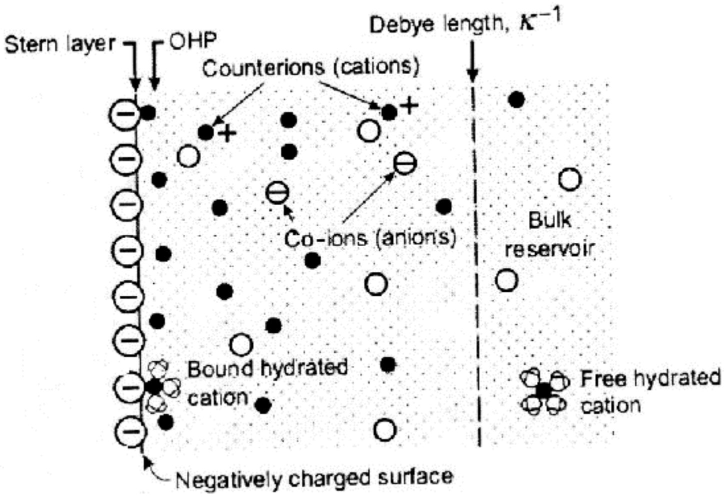
۲-۷-۱- نیروهای سطحی موجود

یکی دیگر از موارد مهم و تأثیرگذار پیرامون رفتار فوم نیروهایی است که به دلایل مختلف بر فرایند تشکیل فوم و پایداری آن مؤثر هستند. گاه اثر این نیروها به حدی قابل‌توجه است که صرف‌نظر نمودن از آن‌ها باعث پیدایش مشکلاتی در توصیف رفتار فوم می‌گردد. با حضور ذرات در محلول مولد فوم اثرات نیروهای موجود بین ذرات و میان رویه بر فوم پررنگ‌تر می‌شود.

به‌طورکلی نیروهای جاذبه و دافعه متعددی درون سیستم‌های حاوی ذرات وجود دارند و شاید بتوان با ساده‌ترین فرضیات بیان نمود که افزایش نیروهای دافعه بین ذرات موجود در سیستم ازآن‌جهت که مانع انعقاد حباب‌های فوم می‌شوند پایداری فوم را افزایش می‌دهند.

ازجمله نیروهای دافعه‌ای که بین ذرات وجود دارد می‌توان به نیروی دافعه‌ای که با نزدیک شدن دو سطح باردار به یکدیگر ایجاد می‌شود اشاره کرد. این نیروی دافعه ناشی از برهم‌نهی لایه دوگانه الکتریکی اطراف هر سطح است. لایه اول همان سطح باردار ذره است که بر اساس ماهیت خود و شرایط محیط می‌تواند بار منفی و یا مثبت داشته باشد. زمانی که این ذره در محیط آبی قرارگرفته و مایع اطراف آن را فرامی‌گیرد چینش خاصی از بارها در اطراف ذره ایجاد می‌شود. بارهای مخالف بار سطح ذره درون مایع به‌صورت لایه‌ی باریک استرن به سطح آن می‌چسبند. پس از این لایه باریک فضایی از بارهای گوناگون که عمدتاً مخالف بار ذره می‌باشند وجود دارد که به آن لایه پراکنده گفته می‌شود. با دور شدن از سطح گوناگونی بارهای موجود در این سطح به سمت تعادل با توده مایع پیش می‌رود. منظور از لایه دوم در دولایه الکتریکی لایه‌های استرن و پراکنده می‌باشند. لایه دوگانه الکتریکی در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. آن‌گونه که در شکل نیز نشان داده شده است طول

دبای[1] حداکثر فاصله‌ای از سطح است که در آن نیروی دافعه سطح بر ذرات هم نام اثر داشته و معرف لایه پراکنده است[۳۸].



شکل ۲-۶ لایه دوگانه الکتریکی با فرض بار منفی در سطح [۳۸]

یکی دیگر از عواملی که می‌تواند پایداری فوم را افزایش دهد وجود نیروهای دافعه الکترواستاتیک بین دو سمت لایه لملا است. به بیان دیگر چنانچه دو سمت لایه لملا به لحاظ نوع بار الکتریکی شبیه باشند نسبت به هم نیروی دافعه داشته و احتمال به هم رسیدن این دو دیواره که به معنای باریک شدن آن و از بین رفتن حباب‌ها است کاهش می‌یابد؛ بنابراین در این شرایط اضافه نمودن الکترولیت به محلول مولد فوم باعث خنثی‌سازی بارها و کاهش دافعه موجود در سمت دیواره لملا و نهایتاً منجر به کاهش پایداری می‌گردد. آزمایش‌هایی که توسط آقای دیویس انجام گرفت نیز تأیید نمود که با افزایش میزان الکترولیت افزوده‌شده به محلول مولد کاهش ضخامت لایه لملا مشاهده می‌گردد[۳۹].

نوع دیگری از نیروهای دافعه بین ذرات نیرویی بانام برن[2] می‌باشد. این نیروی دافعه که در فواصل بسیار نزدیک وجود دارد و البته بسیار قوی نیز است از برهم‌کنش ابر الکترونی بین اتم‌ها ایجاد

[1] Debye
[2] Born

می‌شود.

نیروهای پراکندگی یا نیروهای لاندن - واندروالسی نوع دیگری از نیرو است که مولکول‌ها به یکدیگر وارد می‌کنند و می‌تواند جاذبه و یا دافعه باشند. این نیروها خود مشتمل بر سه نوع می‌باشند. نیروهای بین دوقطبی‌های دائمی، نیروهای بین دوقطبی‌های دائمی و دوقطبی‌های القایی و دسته سوم که به آن‌ها نیروهای پراکندگی لاندن هم گفته می‌شود نیروهای بین دوقطبی‌های القایی می‌باشند. به‌جز در مورد مواد کاملاً قطبی دسته آخر نسبت به بقیه موارد اهمیت بیشتری دارد. بسیاری از پدیده‌های مهم ازجمله چسبندگی، کشش سطحی، جذب سطحی، تر شوندگی، خصوصیات گازها و مایعات، فیلم نازک و بسیاری از پدیده‌های فیزیکی در حضور این نوع نیروها اتفاق می‌افتد. این نوع نیرو بازه مسافت عملکرد بزرگی دارد و در فاصله‌های بزرگ‌تر از ۰,۲ نانومتر و تا ۱۰ نانومتر نیز مؤثر می‌باشند. این نوع نیرو می‌تواند دافعه و جاذبه باشد و می‌تواند ناشی از چرخش دوقطبی‌ها باشد. برای قطرات و ذرات این نیرو با فاصله‌ی بین دو ذره نسبت عکس دارد[۳۵, ۳۸].

۲-۸- تخلیه مایع موجود در لایه لملا

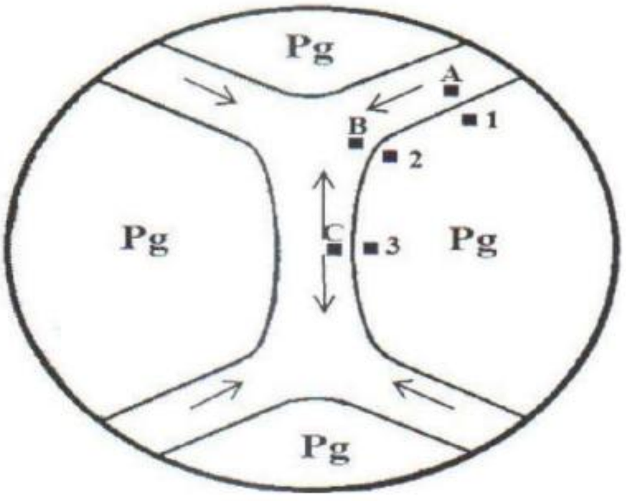
تخلیه مایع موجود در لایه لملا منجر به از بین رفتن این لایه و نهایتاً پارگی حباب و از بین رفتن فوم می‌شود. تخلیه این مایع تحت دو عامل صورت خواهد گرفت.

۲-۸-۱- نیروی وزن

نیروی وزن یکی از دلایل خارج شدن مایع از درون لملا است. ازآنجایی‌که لملا طبیعتاً لایه‌ای باریک است، در صورتی نیروی وزن پر تخلیه آن مؤثر خواهد بود که ضخامت آن نسبت به ضخامت‌های لملاهای عادی زیاد باشد. در این صورت نیروی وزن بر نیروی مویینه غلبه خواهد نمود و باعث تخلیه لملا خواهد شد. در لملاهای با ضخامت زیاد ویسکوزیته توده مایع مولد فوم عامل اصلی در تعیین نرخ تخلیه است. هر چه ویسکوزیته توده بالاتر باشد تخلیه کندتر صورت خواهد گرفت[۳۹].

۲-۸-۲- اختلاف فشار درون لملا

عامل دوم در تخلیه لملا اختلاف فشار است. این عامل که در لملاهای با ضخامت کم تعیین‌کننده است به‌صورت شماتیک در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل در حالتی که فوم وضعیت پایدارتری دارد فشار گاز باید در چهار حباب مجاور یکسان و برابر با p_g باشد.



شکل ۲-۷ نحوه اثرگذاری اختلاف فشار بر تخلیه لملا [۳۸]

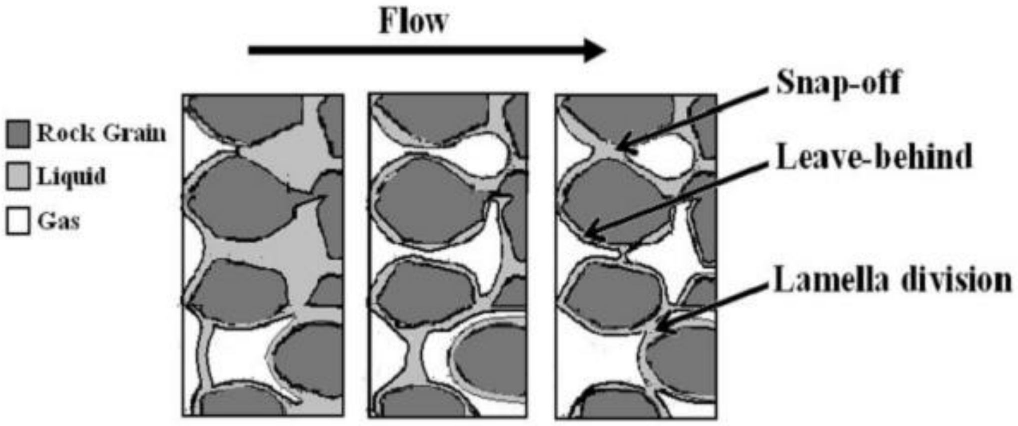
در این حالت با توجه به نقاط نشان داده‌شده در شکل واضح است که فشار تمام نقاط موجود در حباب به جهت محتوی گاز آن با هم برابر است؛ بنابراین داریم $p_1 = p_2 = p_3 = p_g$ از سوی دیگر فشار در نقاط ۱و A د و دو سمت دیواره نیز با هم برابر است. مستقیم بودن مرز لملا و حباب در این حالت تائید کننده این موضوع است. از سوی دیگر با توجه به انحنای ناچیز موجود بین نقاط ۳ و C با تقریب خوبی فشار این نقاط را نیز می‌توان برابر فرض کرد بنابراین $p_1 = p_A$ و $p_2 = p_c$ اما در مرز بین نقاط ۲ و B تقعر شدید موجود حاکی از اختلاف فشار قابل‌توجه بین این نقاط است $p_2 > p_B$ و درنهایت این نتیجه حاصل می‌گردد که فشار در نقطه B از نقاط A و C کمتر است. این به معنای حرکت مایع موجود در لملا از مناطق پرفشار به مناطق با فشار کمتر است. با حرکت مایع ضخامت قسمت‌هایی از لملا کاهش می‌یابد و حباب به لحظه‌ی از هم پارگی نزدیک‌تر می‌شود[۳۹].

۲-۹- مکانیزم ایجاد فوم در محیط متخلخل

رانسوهوف و رادک[1] (۱۹۸۸) سه مکانیزم منجر به ایجاد فوم در محیط متخلخل را مشاهده نمودند [۴۰]:

- برش[2]
- پشت سر گذاشتن[3]
- تقسیم لملا[4]

شکل ۲-۸ این مکانیزم‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸ مکانیسم‌های ایجاد فوم در محیط متخلخل [۴۰]

۲-۹-۱- مکانیزم برش

روف[5] (۱۹۷۰) نشان داد که وقتی نفت از یک محدوده فشرده آب‌دوست به درون خلل و فرج

---

[1] Ransohoff and Radke

[2] Snap-off

[3] Leave-behind

[4] Lamella Division

[5] Roof

پرشده از آب وارد می‌شود، نیروهای بین سطحی طوری اثر می‌کنند که ممکن است بخشی از نفت به شکل قطرات مجزا گردد[۴۱]. مکانیزم مشابه ای در طی تهاجم گاز به خلل و فرج پرشده با مایع اتفاق می‌افتد. این مکانیزم بدون توجه به حضور یا عدم حضور ماده فعال‌کننده سطحی روی می‌دهد، اما اگر ماده فعال‌کننده سطحی پایداری حضور نداشته باشد، حباب‌ها به‌سرعت به هم می‌آمیزند. فرآیند برش درنتیجه اختلاف فشار موئینه بین بدنه و گلوگاه خلل و فرج هست؛ بنابراین وقوع این فرآیند تابعی از نسبت قطر معادل بدنه به گلوگاه می‌باشد[۴۲].

۲-۹-۲- مکانیزم پشت سرگذاشتن

این مکانیزم نیز، در طی تهاجم فاز گاز به محیط متخلخل اشباع‌شده با گاز مایع ایجاد می‌گردد. فوم ایجادشده به‌وسیله مکانیزم پشت سر گذاشتن تقریباً باعث کاهش پنج برابری تراوایی گاز حالت پایدار می‌شود[۴۰, ۴۲]. درحالی‌که فوم ناپیوسته‌ای که توسط مکانیزم برش ایجاد می‌گردد، باعث کاهش چند صد برابری در تحرک گاز می‌شود.

۲-۹-۳- مکانیزم تقسیم لملا

وقتی حباب‌های متحرک فوم در محیط متخلخل تشکیل شد، تعداد لایه‌ها یا حباب‌ها می‌تواند توسط مکانیزم تقسیم لملا افزایش یابد وقتی لایه متحرک در مسیر جریان به یک انشعاب می‌رسد، ممکن است به دو شاخه تقسیم گردد که در هر شاخه از مسیر یک لایه قرار می‌گیرد[۴۳]. به نظر می‌رسد در جریان پایدار گاز مایع جدایش لایه اولین مکانیزم ایجاد فوم باشد[۲۴, ۴۴].

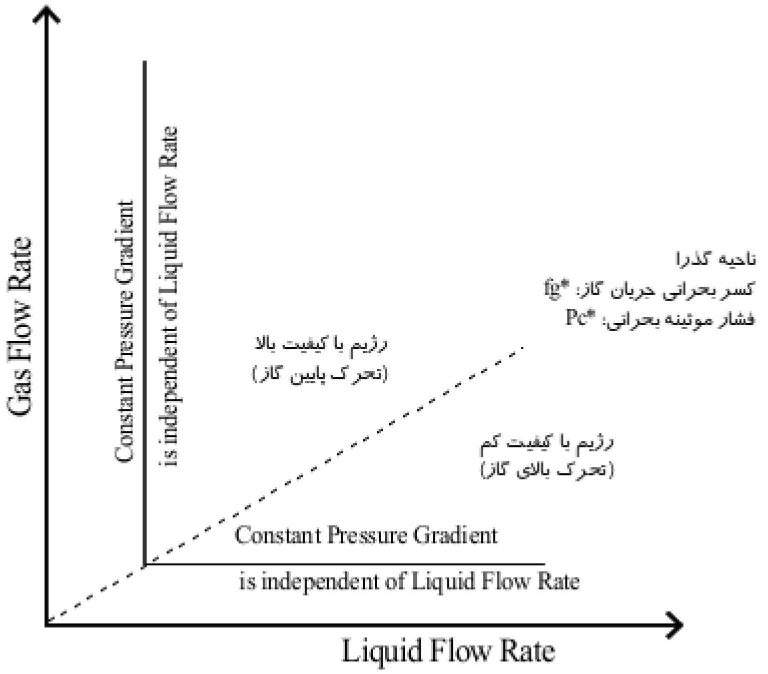
۲-۱۰- رژیم‌های جریان فوم در محیط متخلخل

اوسترلوه و ژانت[1] (۱۹۹۲) نشان دادند که دو رژیم جریان می‌تواند در محیط متخلخل مشخص گردد. رژیم باکیفیت بالا (خشک) که در گرادیان فشار پایدار به دبی جریان گاز وابسته نیست و رژیم

---

[1] Osterloh & Jante

باکیفیت کم (تر) که در آن گرادیان فشار به دبی جریان مایع وابسته نیست[۴۵]. ناحیه گذرا بین دو رژیم به‌وسیله کسر بحرانی جریان گاز (f_g^*) مشخص می‌گردد. الوارض و همکارانش[1] (۱۹۹۹) نتایج اوسترلوه و ژانت را تأیید کردند و با استفاده از داده‌های جریان فوم، با محیط‌های متخلخل و فرمولاسیون‌های مختلف ماده فعال‌کننده سطحی، در دبی‌های جریان متفاوت، نشان دادند که این رفتار جریان فوم یک رفتار عمومی است. شکل ۲-۹ رژیم‌های جریان فوم در محیط متخلخل را نشان می‌دهد [۴۶].



شکل ۲-۹ پارامترها و رژیم‌های جریان در محیط متخلخل [۴۵]

۲-۱۱- کیفیت فوم

نسبت حجم گاز موجود در فوم به کل حجم فوم به‌عنوان «کیفیت فوم» شناخته می‌شود. اندازه‌گیری کیفیت فوم درجا مشکل است. در سیلاب زنی «مغزه»، اغلب کیفیت فوم تزریقی به‌کاررفته و به‌صورت نسبت دبی حجمی گاز به دبی حجمی کل مایع و گاز تزریقی تعریف می‌گردد[۴۴].

[1] Alvarez et al

$$f_g = \frac{q_g}{q_g + q_l} \quad (۲-۶)$$

کیفیت فوم که کسر جزئی جریان گاز نیز، نامیده می‌شود (f)، ازجمله پارامترهای اثرگذار بر تحرک فوم می‌باشد. در این زمینه بررسی‌های گسترده‌ای انجام‌گرفته است. طبق بررسی‌های خطیب و همکارانش تحرک فوم با افزایش کسر جریان گاز (کیفیت فوم) در محدوده ۵۰ تا ۹۸ درصد کاهش می‌یابد، اما برای کسر جریان گاز بالاتر از ۹۸ درصد تحرک فوم با افزایش کسر جریان گاز، افزایش می‌یابد[۴۷].

یعقوبی و هلر[۱] (۱۹۹۴) دریافتند که تحرک فوم با افزایش کسر جریان گاز تا حدود ۸۰ درصد به مقدار کمی افزایش می‌یابد، بعدازآن تحرک فوم سریعاً افزایش می‌یابد[۴۸]. همچنین پاتون و همکارانش[۲] (۱۹۸۳)، هیراساکی و لاوسون[۳] (۱۹۸۵)، مارسدن و خان (۱۹۶۶) و چانگ و گریگ (۱۹۹۹) گزارش دادند که تحرک فوم با افزایش f_g کاهش می‌یابد[۳۶, ۴۹-۵۱]. اما لی و هلر[۴] در سال ۱۹۹۱ گزارش دادند که تحرک فوم با افزایش f_g افزایش می‌یابد[۵۲].

مینسیوکس[۵] تأثیر کیفیت فوم بر روی جابجایی نفت در مغزه‌ی ماسه‌سنگی به روش تزریق هم‌زمان گاز سورفکتانت مطالعه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با کاهش کیفیت فوم مقدار برداشت نفت بالاتر می‌رود[۵۳]. اوسی بونسو و همکاران (۲۰۱۶) مشاهده کردند که در حین جابجایی نفت در یک سلول هل‌شاو[۶] با کاهش کیفیت فوم، فوم‌های پایدارتری تشکیل می‌شود[۵۴]. ما و

[1] Yaghoobi & Heller

[2] Paton

[3] Hirasaki & Lawson

[4] Lee & Heller

[5] Minssieux

[6] Hele-Shaw

همکاران[1] تأثیر کیفیت فوم بر منحرف کردن گاز به‌وسیله‌ی فوم در یک میکرومدل لایه‌ای در غیاب نفت را مطالعه نمودند. آن‌ها منحرف شدن گاز بیشتری از ناحیه‌ی با تراوایی بالا به ناحیه با تراوایی کمتر با افزایش کیفیت فوم تا یک نقطه مشخص که بعد از آن با افزایش کیفیت فوم منحرف شدن گاز کاهش می‌یابد مشاهده نمودند[۵۵]. محققان دیگر سعی کردند کیفیت فوم را به ویسکوزیته‌ی آن مرتبط کنند. میشل (۱۹۷۰) دریافت که در کیفیت پایین‌تر از ۵۵ درصد فوم شبیه سیال نیوتنی رفتار می‌کند که در این حالت ویسکوزیته به تنش برشی وابسته نیست و بالای ۵۵ درصد فوم شبیه سیال غیر نیوتنی رفتار می‌کند[۵۶].

۲-۱۲- رابطه بین کسر جزئی جریان گاز و تحرک گاز

اثر فشار موئینه برای هر نوع جریان چندفازی در محیط متخلخل مهم است، مخصوصاً وقتی دبی‌های جریان، پایین و ناهمگنی در مغزه، بالاست. در دبی‌های پایین، با پایداری فصل مشترک مایع و گاز، کشش سطحی افزایش یافته و فشار موئینه افزایش می‌یابد. افزایش ناهمگنی مخزن نیز، باعث کاهش شعاع خلل و فرج و افزایش فشار موئینه می‌شود. فشار موئینه بحرانی، فوم را در محیط متخلخل به دو قسمت ناحیه فوم پایدار و ناحیه فوم ناپایدار تقسیم می‌کند. تقسیم‌بندی این نواحی بر اساس جریان جزئی بحرانی گاز (fg^*) است و فشار موئینه بحرانی تعیین کننده‌ی fg^* می‌باشد[۵۷].. طبق بررسی‌های بین و همکارانش (۲۰۰۹) رابطه‌ی بین تحرک گاز و f_g می‌تواند به‌وسیله سه خط راست متقاطع در fg^* و کسر جریان شبه تک فازی (fg°)، مشخص گردد. هنگامی‌که $fg < fg^\circ$ ، با افزایش fg تحرک گاز افزایش می‌یابد. علت این است که در این حالت، کسر جریان گاز بسیار پایین می‌باشد (کمتر از ۰٫۰۸) و رژیم جریان به صورت شبه تک فازی مایع بوده و گاز باعث تشکیل فوم نمی‌گردد. هنگامی‌که $fg^\circ < fg < fg^*$ ، با افزایش fg، تحرک گاز کاهش می‌یابد. در این حالت فشار حباب‌های گاز کمتر از فشار مویینه فیلم‌های مایع است و با افزایش کسر جریان گاز شدت

[1] Ma et al

تشکیل فوم افزایش یافته و تحرک گاز کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر کسر جریان گاز، در نهایت فشار حباب‌های گاز از فشار مویینه فیلم‌های مایع بیشتر شده و باعث جریان مجزای گاز و مایع می‌شود. در این حالت $f_g > f_g^*$ و با افزایش fg تحرک گاز به علت جریان مجزای آن افزایش می‌یابد[۵۸].

۲-۱۲-۱- تحرک گاز

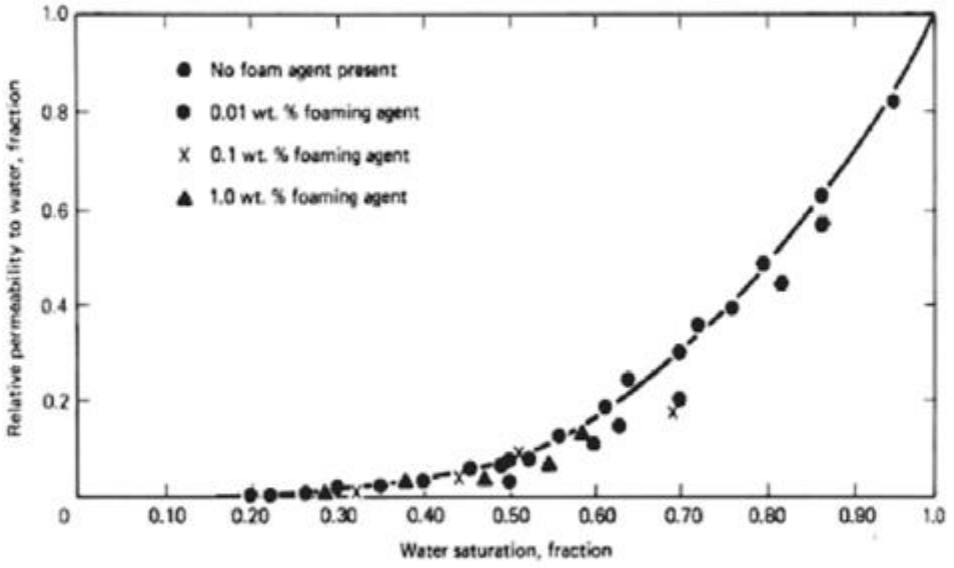
تحرک گاز با تشکیل فوم در محیط متخلخل کاهش می‌یابد. فوم، پخش حباب‌های گاز در فاز تر (محلول فعال سطحی) است که این حباب‌ها توسط فیلم‌های نازک مایع از یکدیگر جدا شده‌اند. این فیلم‌های مایع می‌توانند غیر متحرک یا درحرکت باشند، فیلم‌های مایع ثابت، گاز را به دام می‌اندازند و آن را غیر متحرک می‌سازند، درحالی‌که فیلم‌های مایع متحرک، توسط نیروی کشش سطحی و نیروهای پسا عمل کننده بر آن‌ها، باعث مقاومت در برابر جریان گاز می‌شوند. در هر دو حالت، تحرک گاز با دو مکانیسم متفاوت کاهش می‌یابد؛ در حالت اول، تراوایی نسبی گاز با افزایش اشباع گاز به دام افتاده توسط فیلم‌های مایع ثابت (غیر متحرک)، کاهش می‌یابد. در حالت دوم، ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز توسط فیلم‌های مایع متحرک افزایش می‌یابد، بنابراین، فوم با افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز و با کاهش تراوایی نسبی گاز، باعث کاهش تحرک گاز می‌گردد.

۲-۱۲-۲- تحرک مایع

در حالت تئوری انتظار می‌رود با تشکیل فوم در محیط متخلخل و افزایش اشباع گاز به دام افتاده در لایه‌های مایع، اشباع مایع کاهش یابد که نتیجه‌ی آن، کاهش غیرمستقیم تراوایی نسبی مایع است. با کاهش تراوایی نسبی مایع، تحرک مایع کاهش می‌یابد. بااین‌حال، نتایج آزمایشگاهی روند مخالفی را نشان می‌دهند. برای مثال، داده‌های آزمایشگاهی برنارد و همکارانش[1] (۱۹۶۵) نشان

[1] Bernard et al

داد که افزایش اشباع گاز و عامل کف کننده (افزایش میزان فوم موجود) بر تراوایی نسبی مایع اثرگذار نیستند. (شکل ۲-۱۰)[۵۹]



شکل ۲-۱۰ اثر فوم بر تراوایی نسبی مایع [۵۹]

۲-۱۳- پایداری فوم

پایداری فوم به ساختار و پایداری فیلم‌های مایع وابسته است. هرچه فیلم‌های مایع پایدارتر باشند، فوم پایدارتر است. ناپایداری فیلم‌های مایع باعث انعقاد و ناپایداری فوم می‌گردد. مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پایداری فیلم‌های مایع عبارت‌اند از: حضور نفت، غلظت ماده فعال‌کننده سطحی، دما و فشار و شوری. در این بخش به بررسی این عوامل پرداخته‌شده است.

۲-۱۳-۱- اثر نفت

حضور نفت اثر مهمی بر جریان فوم در محیط متخلخل دارد. حضور نفت نشان‌دهنده‌ی یک فاز اضافی نسبت به فاز گاز و فاز ماده فعال‌کننده سطحی در محیط متخلخل است، که کشش سطحی بین فازها و اشباع فازها در محیط متخلخل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. فرایدمن و جنسن[1] (۱۹۸۶) اظهار نمودند که حضور نفت با اشباع بیش از ۲۰ درصد اثر نامطلوبی بر گسترش فوم تشکیل‌شده

[1] Friedmann & Jensen

دارد[۶۰]. اوسی بونسو[1] و همکاران همچنین نشان دادند که تولید فوم پایدار در حضور نفت سبک در محیط متخلخل نسبت به نفت سنگین به تأخیر می‌افتد[۵۳]. بنابراین، وقتی فوم به‌منظور کنترل تحرک در فرآیندهای ازدیاد برداشت نفت به کار می‌رود، درک واکنش فوم - نفت بسیار مهم است. این موضوع در طی چند دهه‌ی اخیر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. برخی از مکانیسم‌های ناپایدار کننده‌ی فوم توسط نفت عبارت‌اند از[۳۵]:

۱- تخلیه مایع در فیلم‌های مایع به علت جذب ماده فعال‌کننده سطحی به درون فاز نفت، این حالت در هنگام ایجاد امولسیون بارزتر است.

۲- تغییر تر شوندگی سنگ توسط نفت که باعث کاهش تولید فوم می‌گردد.

۳- پخش خود به خودی نفت در فیلم‌های مایع که باعث جابجایی و ناپایداری فصل مشترک پایدارکننده‌ی فوم می‌گردد.

۴- قطرات امولسیون شده‌ی نفت که باعث شکسته شدن و گسیختگی فصل مشترک پایدارکننده‌ی فوم می‌گردد.

۲-۱۳-۲- غلظت ماده فعال‌کننده سطحی

ماده فعال‌کننده سطحی مهم‌ترین نقش در ایجاد و پایداری فوم در محیط متخلخل را دارد. ماده فعال‌کننده سطحی با پایدار کردن فیلم‌های مایع، باعث افزایش پایداری فوم می‌گردد. توانایی کافی برای تولید کف، پایدار بودن در شرایط مخزن، هرزروی کم بر اثر جذب بر روی سنگ و تجزیه، توانایی افزایش بازدهی جاروبی و در دسترس و ارزان بودن، ازجمله خصوصیات یک ماده فعال‌کننده سطحی مناسب هستند. کاهش غلظت ماده فعال‌کننده سطحی زیر غلظت مایسل بحرانی (CMC) باعث انتقال

[1] Osei-Bonsu

ناحیه گذرای رژیم جریان به مقادیر کمتر f^* می‌گردد[۴۶]. نیروهای انعقاد کننده فوم به‌طور معکوس با غلظت ماده فعال‌کننده سطحی متناسب است. بنابراین با کاهش غلظت ماده فعال‌کننده سطحی فوم ناپایدار می‌گردد و بازدهی جابجایی کاهش می‌یابد[۶۱]. فرآیدمن و جنسن (۱۹۸۶) نشان دادند که با افزایش غلظت ماده فعال‌کننده سطحی اندازه حباب‌های فوم درون محیط متخلخل کاهش می‌یابد [۶۰]. لی[1] (۲۰۰۶) دریافت که با کاهش غلظت ماده فعال‌کننده سطحی، سرعت بالاتری برای ایجاد فوم لازم است [۴۴].

جذب ماده فعال‌کننده بر سنگ مخزن، غلظت ماده فعال‌کننده سطحی در سیال تزریق را کاهش می‌دهد. میزان جذب تابعی از فرمولاسیون ماده فعال‌کننده سطحی، سیالات مخزن، لیتولوژی مخزن و شرایط مخزن است[۶۲]. برای مغزه‌های ماسه‌سنگی متراکم نشده در دماهای ۵۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش دما جذب ماده فعال‌کننده سطحی کاهش می‌یابد و با حضور رس در مغزه میزان جذب افزایش می‌یابد[۶۳]. گریگ و میخالین[2] (۲۰۰۷) نشان دادند که در کنار دیگر پارامترها میزان جذب ماده فعال‌کننده سطحی بر روی سنگ تابعی از حالت جابجایی سیال است و دانسیته جذب ماده فعال‌کننده سطحی بر روی سنگ بهترین تابع توصیف‌کننده ماده فعال‌کننده سطحی موجود در سیستم به‌جای غلظت ماده فعال‌کننده سطحی است[۶۴]. لییو و همکارانش[3] (۲۰۰۶) دریافتند که حضور گاز همراه ماده فعال‌کننده سطحی در سنگ میزان جذب ماده فعال‌کننده سطحی را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد[۶۵].

۲-۱۳-۳- اثر دما

ازآنجایی‌که دمای مخازن از عواملی است که در حین فرآیند تزریق فوم تغییر نمی‌کند و ثابت می‌ماند، مطالعات خیلی کمی در خصوص سیلاب زنی مغزه به‌وسیله فوم در درجه حرارت بالا وجود

---

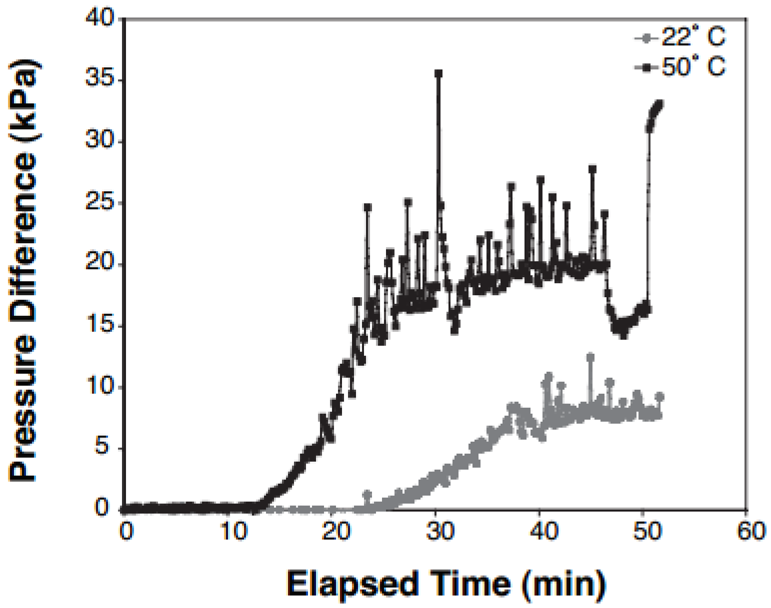
[1] Li

[2] Grigg & Mikhalin

[3] Liu et al

دارد. بااین‌حال، آشکار است که جاری شدن فوم در دماهای بالا نیاز به طراحی دقیق‌تری نسبت به دماهای کمتر از ۸۰ درجه سانتی‌گراد دارد. یکی از مزایای درجه حرارت بالا آن است که جذب سورفکتانت را درون سازند کاهش می‌دهد. یکی از موانع اولیه برای کاربردی کردن فوم در اعماق، دمای بالای سازند است که باعث کاهش حلالیت سورفکتانت در آب‌نمک می‌شود. چنین رفتاری با افزایش دما رخ می‌دهد. همچنین، با افزایش دما تخریب سورفکتانت افزایش می‌یابد. افزایش دما همچنین باعث افزایش اندک کشش سطحی بین CO_2 و آب‌نمک می‌شود. بخصوص در دماهای بالاتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد برای جبران اثر دما نیاز است از غلظت بیشتری از سورفکتانت استفاده شود [۶۵, ۶۶].

تغییر در دما می‌تواند به تغییر در اندازه حباب‌های فوم منجر شود. ازآنجایی‌که فوم تزریقی، از میان شبکه با خلل و فرج و گلوگاه‌های کوچک جریان دارد، هر تغییر در اندازه‌ی حباب‌های فوم اثر مستقیمی بر تحرک فوم دارد. با افزایش دما افت فشار در طی جریان فوم افزایش‌یافته و تحرک فوم کاهش می‌یابد (شکل ۲-۱۱) [۶۷].

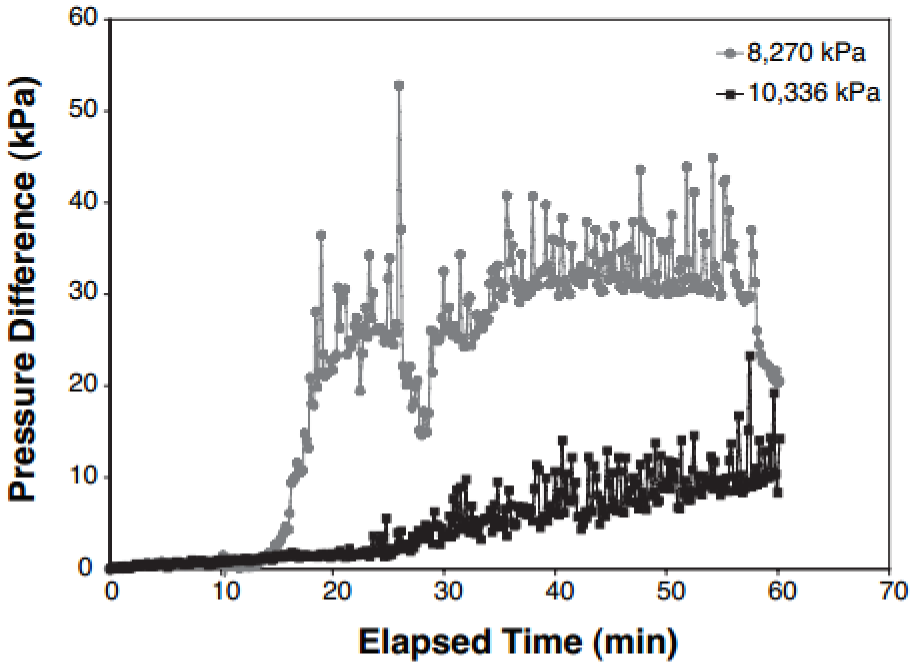


شکل ۲-۱۱ اثر دما بر افت فشار در طی تزریق فوم [۶۷].

اثر دما بر پایداری فوم به غلظت ماده‌ی فعال‌کننده سطحی نیز، وابسته است. طبق بررسی‌های لی یو و همکارانش (۲۰۰۵)، عموماً در غلظت‌های بالا، افزایش دما تأثیر چندانی بر پایداری فوم ندارد؛ اما در غلظت‌های پایین با افزایش دما پایداری فوم کاهش می‌یابد[۶۵].

۲-۱۳-۴- اثر فشار

اگرچه ممکن است فشار اثر قابل‌توجهی بر کشش‌سطحی نداشته باشد، اما فشار می‌تواند به واسطه‌ی اثر آن بر اندازه‌ی حباب‌های فوم، بر تحرک فوم تأثیرگذار باشد. به‌طورکلی، انتظار می‌رود که با افزایش فشار اندازه‌ی حباب‌های فوم کوچک‌تر شود. حباب‌های با اندازه کوچک‌تر باعث جریان آسان‌تر فوم در محیط متخلخل می‌گردد؛ بنابراین با افزایش فشار، افت فشار در طی جریان فوم کاهش و تحرک فوم افزایش می‌یابد (شکل ۲-۱۲) [۶۷]



شکل ۲-۱۲ اثر فشار بر افت فشار در طی تزریق فوم [۶۷]

اثر فشار بر پایداری فوم به غلظت ماده‌ی فعال‌کننده سطحی وابسته است، به‌طوری‌که در

غلظت‌های بالا تغییرات فشار تأثیر اندکی بر پایداری فوم در حالت استاتیکی دارد؛ اما در غلظت‌های پایین با افزایش فشار پایداری فوم کاهش می‌یابد[۶۵].

۲-۱۳-۵- شوری آب‌نمک

به‌طورکلی افزایش شوری ممکن است تمایل به ناپایدار کردن فوم را داشته باشد و یا بسته به نوع سورفکتانت اثر کمی بر پایداری فوم داشته باشد. کاهش پایداری فوم ممکن است مربوط به افزایش شوری و تخریب فوم با کاهش نیروهای الکتروستاتیکی دوقطبی یا کاهش حلالیت سورفکتانت در آب‌نمک باشد.

اثر شوری ممکن است بیشتر زمانی خود را نشان دهد که سورفکتانت را درون گاز CO_2 حل کرده تا در آب‌نمک حل شود. چنین سیستم‌هایی در غلظت کم سورفکتانت‌های غیر یونی زمانی که ذرات جامد درون آب‌نمک حضورداشته باشند قادر خواهند بود که حلالیت سورفکتانت در آب‌نمک را کاهش دهند و مشاهده شده که سورفکتانت‌ها وارد فاز CO_2 شده‌اند[۶۸].

۲-۱۴- ۴- نتایج به‌دست‌آمده از کاربردهای میدانی

نتایج مهمی از کاربردهای میدانی فوم به دست آمد است. تورتا و سینگال[1] (۱۹۹۷) از بررسی ۴۲ کاربرد فوم دریافتند که جدی‌ترین مشکل در فرآیندهای سیلاب زنی با فوم کاهش بیش‌ازاندازه تزریق پذیری است[۶۹]. کوهن و همکارانش[2] (۱۹۹۰) به‌منظور استفاده از تزریق نیتروژن - فوم برای کاهش کانال‌های گاز، بررسی انجام دادند. این بررسی به دو دلیل ناموفق بود: (۱) به علت تخمین نادرست تزریق پذیری فشار تزریق نزدیک به فشار شکست سازند به کار گرفته شد که سبب ایجاد کانال‌های جدید گاز گردید؛ (۲) تخمین نادرست حجم فوم موردنیاز برای تزریق[۷۰]. این بررسی اهمیت بالای انتخاب روش مناسب برای تزریق فوم به‌منظور غلبه بر مشکل تزریق پذیری کم را نشان

---

[1] Turta & Singhal

[2] Kuehne et al

داد. ممکن است تزریق متناوب محلول فعال‌کننده سطحی و گاز (SAG) نسبت به تزریق هم‌زمان محلول فعال‌کننده سطحی و گاز بهتر باشد.

وانگ و همکاران[1] (۱۹۹۷) کاربرد فوم در دو چاه تولیدی که در اثر مخروط شدگی گاز بهره‌وری نفت کاهش‌یافته بود را موردبررسی قراردادند. نتایج حاکی از عملکرد موفق فوم در چاه اول و عملکرد ناموفق آن در چاه دوم بود. علت این بود که در چاه با عملکرد موفق، فوم پیش آماده تزریق گردید، درحالی‌که در چاه دوم بعد از تزریق محلول فعال‌کننده سطحی به‌تنهایی، فوم پیش آماده تزریق شد. با تزریق تنهای محلول فعال‌کننده سطحی در محیط متخلخل اشباع از گاز فوم تولید نمی‌گردد، زیرا فوم می‌تواند توسط فرآیند تخلیه، نه به‌وسیله فرآیند آشام تولید گردد. ناموفق بودن تزریق فوم پیش آماده پس از تزریق محلول فعال‌کننده سطحی در چاه دوم نشان‌دهنده تخمین نادرست اندازه فوم موردنیاز برای بهبود عملکرد مؤثر چاه است. بلاکر و همکارانش[2] (۱۹۹۹)، آرا و اسکوگ[3] (۲۰۰۰)، اسکوگ و همکارانش[4] (۲۰۰۲) و بلاکر و همکارانش (۲۰۰۲) جزئیات وسیع‌ترین کاربرد فوم در صنعت نفت یعنی پروژه فوم کمک‌کننده به تزریق متناوب آب و گاز (FAWAG) در «میدان اسنور» نروژ را بررسی کردند.

دو پروژه کاربرد فوم در این میدان انجام گرفت. پروژه اول به‌منظور کاهش نسبت گاز به نفت (GOR) در یک چاه تولیدی بود و پروژه دوم به‌منظور کنترل تحرک گاز در عمق مخزن توسط FAWAG بود. هر دوی این پروژه در بهبود بازیافت نفت موفق بودند[۷۱-۷۳]. نتایج به‌دست‌آمده از این پروژه نشان دهنده رفتار موفق فوم در شرایط مخزن برای کاربردهای میدانی است.

---

[1] Wong et al

[2] Blaker et al

[3] Aarra & Skuge

[4] Skuge et al

جدول ۲-۲ کاربرد ازدیاد برداشتی فوم در میادین نفتی [۷۴-۷۶]

نام میدان	سال انجام پروژه	مشکلاتی که بر آن‌ها غلبه شد	مزیت سیلاب زنی فوم	مشکلات ناشی از سیلاب زنی فوم
daqing	2012	میزان آبدهی بالا، راندمان جاروب ضعیف و ناهمگونی شدید	کنترل تحرک پذیری و مسدود کردن نواحی دزد	خیر
Shengali Tuo11	2004	میزان آبدهی بالا و بالاروندگی گاز	میزان آب تولیدی قطع و تولید نفت افزایش یافت	خیر
Snorre	1996	رخنه گاز نابالغ	۵۰٪ کاهش GOR[1] در مدت دو ماه	بله سخت بودن ارزیابی عملکرد فوم به علت پیچیدگی زمین‌شناسی
East Mallet Unit, Texas	1994	کانال زدن گاز و تولید گاز	کاهش کانال‌های گاز و تولید گاز	بله (مشکلات عملیاتی در ارتباط با تزریق هم‌زمان)
East Vaccum grayburg, Mexico	1993	افتادن فشار مخزن به حداقل فشار امتزاجی و الگوهای عجیب رخنه	انحراف گاز در عمق	بله ازلحاظ اقتصادی (هزینه‌های مواد شیمیایی و عملیات)
North Ward-Ester, Texas	1991	جاروب ضعیف عمودی و برداشت نفت پایین	انحراف گاز CO_2 از ناحیه سارق به ناحیه جاروب نشده و درنتیجه افزایش برداشت نفت	خیر

[1] Gas Oil Ratio

۲-۱۵- نوآوری

مهم‌ترین نوآوری این پروژه استفاده از دستگاه‌های میکروفلوئیدیک به عنوان میکرومدل برای بررسی ازدیاد برداشت نفت در محیط متخلخل است. با توجه به این‌که روش رایج برداشت نفت در ایران استفاده از تزریق آب دریا، روش‌های شیمیایی و تزریق گاز است و چگالی پایین گاز، پدیده‌ی انگشتی شدن ازجمله معایب این روش‌ها محسوب می‌شود که یکی از راهکارهای برطرف کردن چنین مشکلاتی استفاده از روش ازدیاد برداشت به کمک تزریق فوم می‌باشد. به دلیل این‌که فوم باعث کاهش چشم‌گیر تحرک‌پذیری گاز و افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری و درنتیجه افزایش راندمان روبیدن سطح می‌شود که در این پژوهش از فوم به عنوان سیال تزریق‌شونده در دستگاه میکروفلوئیدیک استفاده شده و با تزریق آب‌نمک مقایسه شده است. دیگر نوآوری این پروژه استفاده از میکروسکوپ پرسرعت برای تصویربرداری از فرآیند تزریق برای ازدیاد برداشت نفت و سپس استفاده از پردازش تصویر برای به دست آوردن اشباع نفت باقی‌مانده به‌حساب آورد.

۳- فصل سوم: مواد و روش‌ها

۳-۱- مقدمه

با توجه به اهمیت ازدیاد برداشت در صنعت نفت مشاهده فرایند برداشت در مخازن نفتی به درک بهتر این پروسه کمک می‌کند. به این منظور از میکرومدل PDMS به دلیل شفافیت مناسب آن استفاده شد. برای مشاهده این فرآیند از عکس‌برداری به کمک میکروسکوپ پرسرعت استفاده شد.

در این پژوهش مجموعه‌ای از آزمایش‌ها برای درک اثر نوع ماده و دبی جریان در میزان نفت باقی‌مانده در میکرومدل استفاده شده است. در این بخش شرح کاملی از روند انتخاب مواد، تجهیزات آزمایشگاهی، ساخت دستگاه‌ها، روش تولید حباب برای تزریق فوم و روش انجام آزمایش‌ها ارائه شده است. آزمایش‌های انجام گرفته‌شده شامل تزریق دو نوع سورفکتانت و تزریق فوم است.

۳-۲- مواد

۳-۲-۱- سورفکتانت

فوم از نظر ترمودینامیکی ناپایدار است به علت اینکه سطح مشترک بین دو فاز خیلی بزرگ است و حباب‌ها تمایل به منعقد شدن[۱] دارند تا با کاهش سطح مشترک انرژی آزاد مرز مشترک[۲] کاهش یابد [۷۷]؛ بنابراین به عامل فوم‌ساز برای تشکیل فوم قوی و پایدار نیاز است که عامل فوم ساز می‌تواند سورفکتانت یا هر محلولی با مولکول‌های جذب‌کننده باشد [۷۸].

برای بررسی اثر نوع ماده، سورفکتانت‌های مطالعه‌ی حاضر از دسته‌ی سورفکتانت‌های آنیونی و کاتیونی است. از سورفکتانت آنیونی SDS[۳] و کاتیونی TTAB[۴] شرکت مرک به صورت پودر در این تحقیق استفاده شد و دارای خلوص ۹۹ درصد بودند. خواص فیزیکی این دو ماده فعال سطحی در

---

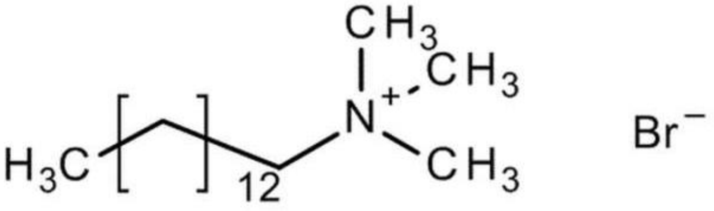
[1] Coalesce

[2] Interfacial

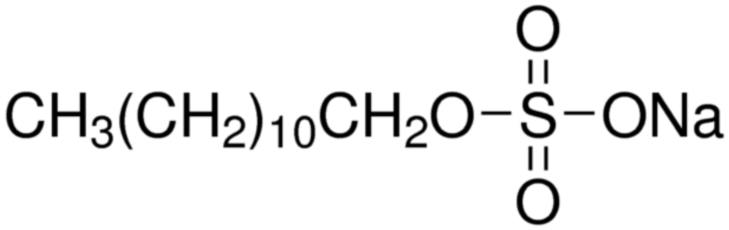
[3] Sodium Dodecyl Sulfate

[4] Tetra Decyl Trimethyl Ammonium Bromide

جدول ۳-۱ آمده است.



شکل ۳-۱: ساختار مولکولی سورفکتانت TTAB



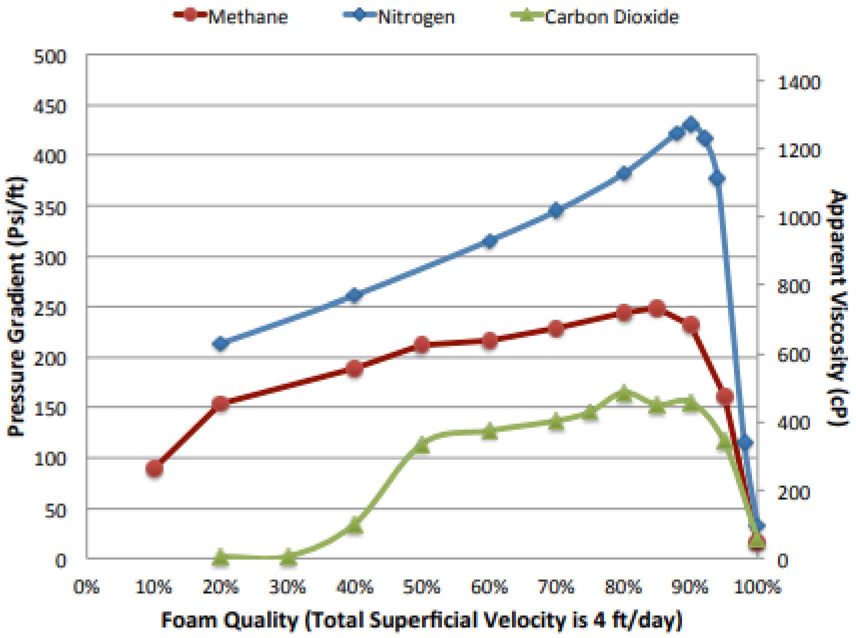
شکل ۳-۲: ساختار مولکولی سورفکتانت SDS

جدول ۳-۱ مشخصات سورفکتانت‌های SDS,TTAB 1wt%

سورفکتانت TTAB(1wt%)	سورفکتانت SDS(1wt%)	مشخصات ترموفیزیکی
۱,۰۱۲۴	۱,۰۱۳۵	چگالی (gr/cm^3)
۱,۰۰۲	۱,۰۲۷	ویسکوزیته (mPa·s)
۲۲,۶۱	۱۵,۵۰۴	کشش‌سطحی (mN/m)
۳۳۶,۴	۲۸۸,۳۸	وزن مولکولی (gr/mol)
$C_{17}H_{38}BrN$	$CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$	فرمول

۳-۲-۲- گاز

محققین مطالعات زیادی در مورد اثر نوع گاز بر پایداری فوم انجام داده‌اند. زنگ و همکاران[1] به مقایسه‌ی گازهای CO_2، N_2، CH_4 و مخلوطCH_4 - CO_2 و گاز دودکش[2] پرداختند که نتایج کار آن‌ها در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج زنگ و همکاران فوم حاصل از گاز نیتروژن دارای ویسکوزیته‌ی ظاهری بالاتر و استحکام بیشتر است [۷۹].



شکل ۳-۳ مقایسه‌ی نوع گاز برای تشکیل فوم[79]

فوم نیتروژنی به طور گسترده در روش‌های تزریق فوم به کار برده می‌شود و بازدهی مطلوبی در میادین نفتی داشته است[۸۰]. نیتروژن گازی با قیمت کم سبز(بحث محیط زیستی) و گازی پایان‌ناپذیر است. این همچنین چگال ناپذیر و اغلب انحلال ناپذیر است و در شرایط مخزن در حالت گازی است و تحرک بالا و مقاومت جریان کم در محیط متخلخل دارد[۸۱].

---

[1] Zeng et al

[2] Flue Gas

فرآیدمن و همکاران عملکرد تزریق فوم نیتروژنی را در شرایط دمابالا مطالعه کردند و نشان دادند که قابلیت ازدیاد برداشتی فوم نیتروژنی ۳ برابر بیشتر از سیلاب زنی آب داغ است[۲۳].

پنگ و همکاران یافتند که فوم نیتروژنی کمبود فشار نزدیک چاه را جبران می‌کند تا مخروطی شدن آب در لایه‌های نازک نفتی را آرام کند که به آن تکنولوژی فوم ضد مخروطی شدن آب گفته می‌شود[۸۲]. علاوه بر این حضور حباب‌های نیتروژن ویسکوزیته‌ی مؤثر گاز را افزایش داده و شرایط پایداری را در فرآیند جابجایی ایجاد می‌کند[۸۳]. بنابراین در این مطالعه از گاز نیتروژن با خلوص ۹۹,۹۹۵ برای تشکیل فوم استفاده شد.

۳-۲-۳- روغن

کان و همکارانش ثابت کردند که روغن پارافین بر روی میکرومدل تأثیر نمی‌گذارد به همین دلیل در آزمایش از روغن پارافین (شرکت مرک) به دلیل عدم تورم[۱] میکرومدل PDMS استفاده شد [۱۵]. برای بهبود کیفیت عکس‌ها در پردازش تصویر، ۰,۵wt% رنگ خوراکی قرمز به روغن افزوده شده است. رنگ خوراکی تغییری در کشش‌سطحی و ویسکوزیته روغن ایجاد نمی‌کند.

۳-۳- تجهیزات آزمایشگاهی

۳-۳-۱- همزن هات‌پلیت

برای آماده‌سازی سیال‌های جابجا شونده و جابجا کننده نیاز به همزن به جهت مخلوط سازی پودرها در آب مقطر و تهیه محلولی همگن می‌باشد. ازاین‌رو، از همزن هات‌پلیت استفاده شده است. مکانیزم این همزن این‌گونه می‌باشد که این همزن یک قرص مغناطیسی که داخل مخلوط قرار می‌گیرد را به چرخش در می‌آورد. پس از تنظیم آن به گونه‌ای که قرص در مرکز بشر قرار گیرد می‌توان با تنظیم سرعت زاویه‌ای قرص مورد نظر به سرعت مطلوب برای هم زدن دست پیدا کرد.

---

[1] swell

همزن قابلیت تنظیم دما در صورت نیاز به گرما را نیز دارد که در این آزمایش تمام فرآیندهای همگن‌سازی در دمای محیط (۲۵ درجه سانتی‌گراد) انجام گرفته شده است. از همزن هات‌پلیت مدل در این تحقیق استفاده شده است.

۳-۳-۲- میکروسکوپ پرسرعت

برای ثبت تصاویر و نحوه حرکت سیالات در میکرومدل و حباب‌های تولیدشده در دستگاه جریان متمرکز[1] از میکروسکوپ پرسرعت شرکت دولومیت که قابلیت عکس‌برداری نیز دارد، استفاده شد. میکروسکوپ پرسرعت مورداستفاده قابلیت زوم تا ۵x را دارد که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود.

شکل ۳-۴ میکروسکوپ پرسرعت دولومیت Meros

۳-۳-۳- پمپ سرنگی

در این تحقیق از پمپ سرنگی[2] LAMBDA VIT-FIT شکل ۳-۵ استفاده شده است. این پمپ توانایی به‌کارگیری سرنگ‌هایی با حجم کم و زیاد را دارد که با توجه به سرنگ استفاده شده قابلیت

---

[1] flow-focusing device

[2] Syringe pump

برنامه پذیری برای تزریق سیال در دبی‌های مختلف را دارد. استفاده از این پمپ در مصارف پزشکی رایج است و علاوه بر این در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی برای کارهای تحقیقاتی مثل نفت، رنگ، تشکیل قطره و .... کاربرد دارد.

شکل ۳-۵ پمپ سرنگی LAMBDA VIT-FIT

۳-۳-۴- ترازو

در این تحقیق از ترازوی شرکت RADWAGE مدل PS 510/C/1 شکل ۳-۶ با دقت ۰,۰۰۱ ± گرم برای اندازه‌گیری تمامی پودرها استفاده شده است.

شکل ۳-۶ ترازوی شرکت RADWAGE مدل PS 510/C/1

۳-۳-۵- رگلاتور

با توجه به اینکه فشار داخل مخزن نیتروژن غالباً بالا است و از طرفی فشار موردنیاز برای تولید حباب در دستگاه جریان متمرکز کمتر از ۱bar است نیاز به فشار شکن دومرحله‌ای است که رگلاتور مدل Air Flow فشار ۰ تا ۳۰۰ بار را به رنج ۰ تا ۲,۵ بار تقلیل می‌دهد.

۳-۴- میکروسیالات[1]

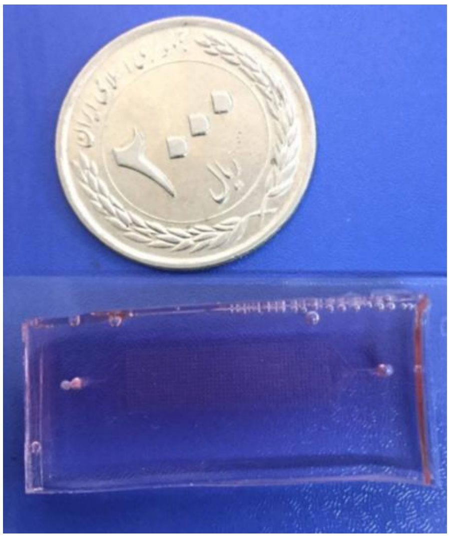
همان‌گونه که در فصل ۱ ذکر شد میکروسیالات اغلب به عنوان آزمایشگاه روی تراشه معروف هستند. تحقیقات در میکروسیالات بر ترکیب و آنالیز جریان سیال و ساخت متمرکز شده است [۱۱, ۱۲].

میکروسیالات به علت مزایایی مثل ارزانی و ساخت سریع، نیاز به مقدار کم نمونه آزمایشگاهی، کیفیت بالا در مشاهدات و قابلیت کنترل در تحقیقات استفاده می‌شوند. میکروسیالات غالباً کوچک هستند. فیلتر کردن مواد شیمیایی، تولید فوم و جابجایی سلول‌ها و کاربردهای پزشکی نمونه‌ای از کاربرد میکروسیالات هستند. میکروسیالات قابلیت کاربرد بالایی در زمینه‌ی تحقیقات ازدیاد برداشت و کاربردهای پزشکی دارند. شبیه‌سازی مخازن نفتی به‌عنوان نمونه‌ای از محیط متخلخل در مقیاس میکرو یا نانو مثالی از کاربرد میکروسیالات در ازدیاد برداشت است که اجازه می‌دهد شرایط داخل مخزن را مشاهده کرد [۱۲]. در تحقیق حاضر از دستگاه جریان متمرکز شکل ۳-۷ و میکرومدل شکل ۳-۸ استفاده شد.

---

[1] Microfluidics

شکل ۳-۷ دستگاه جریان متمرکز مطالعه حاضر



شکل ۳-۸ میکرومدل مطالعه حاضر

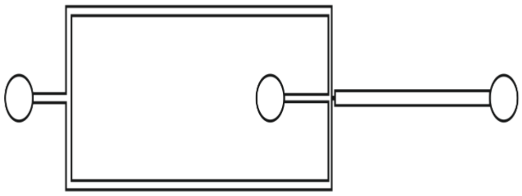
۳-۴-۱- ساخت دستگاه جریان متمرکز و میکرومدل PDMS

طراحی و ساخت میکرومدل از عوامل مهم برای انجام درست آزمایش است. طرح میکرومدل و دستگاه جریان متمرکز ابتدا به کمک نرم‌افزار کورل‌دراو[1] طراحی می‌شود. طرح اولیه‌ای که با نرم‌افزار کورل-دراو طراحی شد در شکل ۳-۹ و شکل ۳-۱۰ مشاهده می‌شود. میکرومدل با طول ۲۳,۰۸ میلی‌متر و

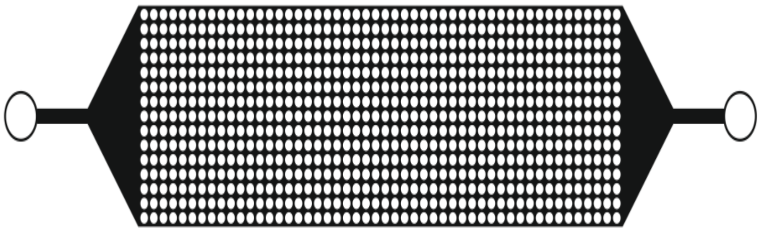
[1] Corel Draw

عرض ۵,۷۸ میلی‌متر به شکل مخزن مستطیلی با شبکه‌ای از ستون‌های استوانه‌ای با شعاع ۳۰۰ میکرومتر و با فاصله‌ی ۸۰ میکرومتر ازهم مرتب شده‌اند. (دید از بالا). طول میکرومدل برای مشاهده دینامیک حرکت جریان در مرز خروجی تقریباً بزرگ در نظر گرفته شد. مشخصات میکرومدل با جزییات در

جدول ۳-۲ جمع‌آوری شده است. برای ساخت دستگاه جریان متمرکز و میکرومدل ابتدا باید قالب طرحی که به کمک نرم‌افزار طراحی شده و ماسک آن چاپ شد را آماده کرد و سپس بر روی قالب آماده‌شده PDMS[1] ریخته می‌شود که در ادامه به صورت کامل توضیح داده می‌شود.



شکل ۳-۹ طرح اولیه دستگاه جریان متمرکز در نرم‌افزار کورل‌دراو



شکل ۳-۱۰ طرح اولیه میکرومدل در نرم‌افزار کورل‌دراو

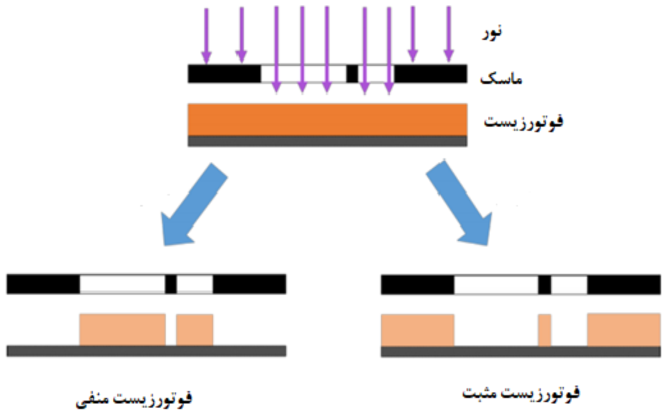
جدول ۳-۲ مشخصات میکرومدل

فاصله‌ی گلوگاه (μm)	قطر دانه‌ها (μm)	تخلخل (٪)
۸۰	۳۰۰	۵۶

[1] Polydimethylsiloxane (CH3[Si(CH3)2O]nSi(CH3)3)

۳-۴-۱-۱- ساخت قالب

دستگاه‌های میکروسیالات به کمک لیتوگرافی که در ادامه بیان شده ساخته شدند. برای ساخت میکرومدل و دستگاه جریان متمرکز ابتدا نیاز به یک قالب است تا PDMS بر روی آن ریخته شود. برای ساخت قالب نیاز به فوتورزیست[۱] است. فوتورزیست‌ها موادی حساس به نور هستند که شامل دو دسته‌ی فوتورزیست منفی و مثبت هستند. در فوتورزیست‌های مثبت بعد از نوردهی قسمت‌هایی از فوتورزیست که زیر اشعه فرابنفش قرار گرفتند به‌وسیله محلول ظاهر کننده از بین می‌روند و قسمت-هایی که نور به آن‌ها تابیده نشده در محلول حل نمی‌شوند. در فوتورزیست‌های منفی عکس این قضیه صادق است و قسمت‌هایی از فوتورزیست که نور به آن‌ها تابیده نشده به‌وسیله‌ی محلول ظاهرکننده از بین نمی‌روند. شکل ۳-۱۱ تفاوت بین دو فوتورزیست مثبت و منفی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۱ فوتورزیست مثبت و منفی

برای ساخت قالب از سیلیکون ویفر[۲] ۴ اینچی به‌عنوان زیرلایه استفاده شده است که در ادامه مراحل ساخت قالب ذکر می‌شود:

۱- ابتدا سیلیکون ویفر را با ایزوپروپانول (IPA)[۳] و آب مقطر شستشو داده شد.

---

[۱]photoresist
[۲] Siliconwafer
[۳]Isopropanol

۲- برای خشک‌کردن سطح زیر لایه به مدت ۵ دقیقه در دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد روی هات‌پلیت قرار داده شد تا آب باقی‌مانده بخار شود.

۳- ۴ میلی‌لیتر فوتورزیست SU-8 روی سیلیکون ویفر ریخته و در دستگاه پوشش‌دهنده‌ی چرخشی[1] قرار داده شد تا به‌صورت یکنواخت بر روی سیلیکون ویفر لایه نشانی شود. برای ارتفاع ۶۰ میکرومتر، سیلیکون ویفر روی پوشش‌دهنده چرخشی[2] در دور ۵۰۰rpm و شتاب ۱۰۰rpm/sec به مدت ۱۰ ثانیه و دورrpm ۳۰۰۰ و شتاب ۳۰۰rpm/sec به مدت ۳۰ ثانیه تنظیم شد تا لایه نشانی انجام شود.

۴- زیر لایه بر روی هات‌پلیت در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ دقیقه و سپس در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ دقیقه قبل از نوردهی[3] قرار گرفت تا به‌آرامی خشک شود. افزایش دما به‌تدریج باید صورت گیرد.

۵- برای نوردهی به مدت ۷ ثانیه زیر اشعه فرابنفش با توانmj/cm^2 ۱۵۰ قرار داده شد تا طرح روی ماسک همان‌گونه که در ابتدای بحث گفته شد بر روی قالب حکاکی شود.

۶- زیرلایه در ظاهرکننده‌ی SU-8 به مدت ۶ دقیقه قرار داده شد تا محلول با آن قسمت از فوتورزیست‌ها که در معرض نور بوده‌اند واکنش دهد و آن‌ها را از بین ببرد که نتیجه‌اش برجسته شدن طرح روی زیر لایه بود.

۷- قالب آماده‌شده‌ی مرحله‌ی قبل با ایزوپراپانول و آب مقطر شسته شد تا فوتورزیست‌هایی که در مرحله‌ی ظهور از بین نرفتند پاک شود تا طرح نهایی بر روی زیرلایه حک شود.

۸- به مدت یک دقیقه در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و سپس تا دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ دقیقه فرایند خشک‌کردن ادامه می‌یابد تا طرح ثابت شود.

---
[1] spin coated

[2] spin coater

[3] exposure

۳-۴-۱-۲- مراحل قالب‌گیری با PDMS

برای ساخت دستگاه‌های میکروسیالات بسته‌ی الاستومر کاربرد دارد. این بسته شامل پایه الاستومر سیلیکون مایع[۱] و عامل عمل آورنده[۲] (مخلوطی از پلاتینیوم و دو پلیمر متیل هیدروسیلوکزان و دیمتیل سیلوکزان) است که با نسبت ۱۰:۱ باهم ترکیب شدند.

۱- بعد از ترکیب این دو حباب‌های به وجود آمده با کمک مکش بعد از مدت ۲۰ دقیقه تخلیه شد.

۲- ترکیب را بر روی زیرلایه‌ی آماده‌شده با دقت ریخته سپس برروی هات پلیت قرار داده و در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۷ ساعت گذاشته شد.

۳- بعد از به عمل آمدن طرح PDMS از سیلیکون جدا شد و سوراخ‌های ورودی خروجی با پانچ سوراخ شد.

۴- قالب آماده‌شده را در دستگاه پاک‌سازی پلاسما گذاشته، پلاسما به تغییر ترشوندگی سطح PDMS به آب‌دوست، کمک می‌کند که سطح PDMS به شیشه بچسبد.

۵- میکرومدل آماده‌شده به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد گذاشته شد.

دستگاه جریان متمرکز و میکرومدل ساخته‌شده، در شکل ۳-۷ و شکل ۳-۸ به ترتیب نشان داده شده است.

۳-۵- روش انجام آزمایش

آزمایش‌های این تحقیق شامل تزریق دو سورفکتانت مختلف و فوم‌های تولیدشده به کمک این

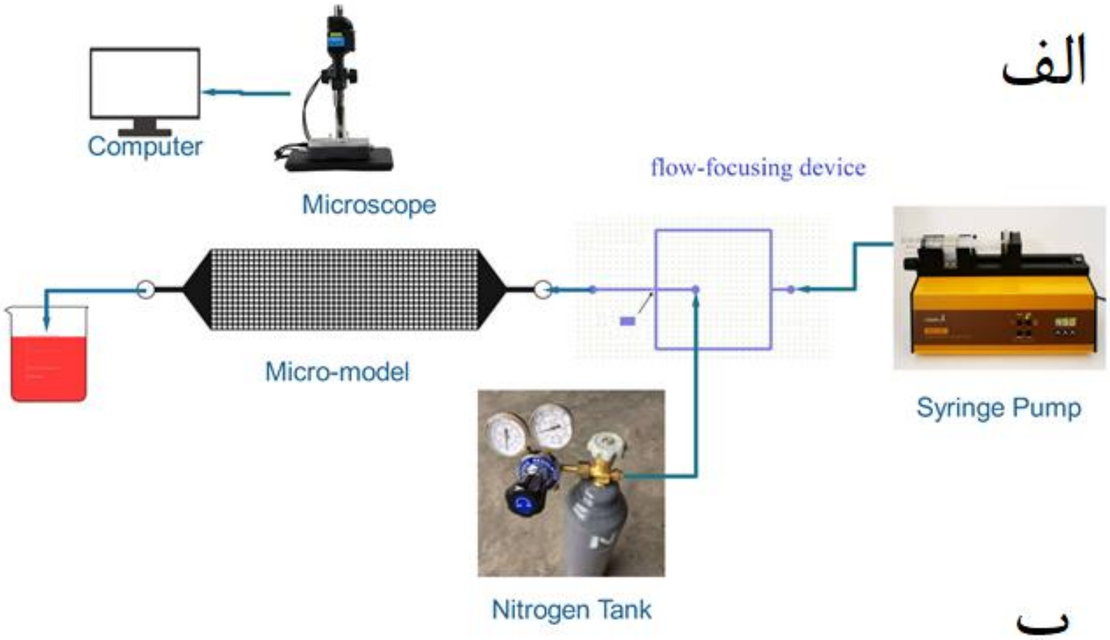
---

[1] Vinyl-Terminated PDMS

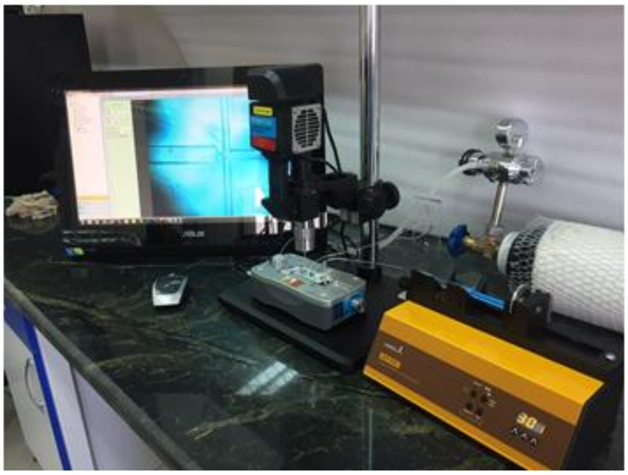
[2] Curing

دو سورفکتانت در میکروسیال است. از دو میکروسیال مجزا، دستگاه جریان متمرکز و میکرومدل شبیه‌سازی‌شده از مخزن در آزمایش‌های تزریق فوم استفاده شد. فوم در دستگاه جریان متمرکز پیش‌ساخته و به کمک لوله‌ی PET به میکرومدل انتقال داده شده است. درشکل ۳-۱۲ الف) نمای شماتیک از ست آپ آزمایش و ب) ست آپ آزمایش نشان داده می‌شود. فرآیند جاروب شدن میکرومدل با میکروسکوپ پرسرعتی که دوربین نیز دارد، عکس‌برداری شده است. پردازش تصاویر یکی از مراحل مهم آزمایش‌ها است که به کمک نرم‌افزار متلب عکس‌های گرفته‌شده کمی سازی شده است. نتایج آزمایش‌ها از جنبه‌های مختلف برای مقایسه‌ی اثر عوامل مختلف بر فرآیند برداشت نفت بحث شده است.

الف



ب



شکل ۳-۱۲ الف) نمای شماتیک از ست آپ آزمایش و ب) ست آپ آزمایش

۳-۵-۱- تزریق سورفکتانت

یکی از روش‌های ازدیاد برداشت نفت تزریق سورفکتانت برای تغییر ترشوندگی مخزن است. سورفکتانت (مختصر شده‌ی «عامل فعال‌کننده‌ی سطحی») ماده‌ای به‌شدت فعال برای جذب در سطوح یا مرز مشترک بین فازها است. سورفکتانت‌ها به دسته‌های آنیونی (بار منفی)، کاتیونی (بار مثبت)، غیر یونی (بدون بار) و زتریونیک/آمفوتریک (هردو بار مثبت و منفی) تقسیم می‌شوند که سورفکتانت‌های مطالعه حاضر جزء دسته‌های کاتیونی و آنیونی می‌باشد.

اصلی‌ترین مزیت انتخاب سورفکتانت‌های آنیونی این است که می‌تواند رفتار فاز را با تغییر شوری محلول سورفکتانت کنترل کند که نسبتاً آسان انجام می‌شود. مزیت دیگر آن این است که مواد فعال سطحی آنیونی به خاطر اینکه سطح کف بار آنیونی دارد به اندازه مواد فعال‌سطحی کاتیونی و غیر یونی جذب کف نمی‌شود. این کاهش جذب سطحی نیز دلیلی بر مزیت استفاده از این سورفکتانت‌ها است[۸۴].

شنگ و همکاران[1] [۴۹] نشان دادند که سورفکتانت های آنیونی سبب کاهش کشش سطحی می‌شوند.در ساختار مخازن، نفت در بین حفرات وجود دارد که نفت های به دام افتاده در بین حفرات با بالانس شدن نیروهای ویسکوز و نیروهای کاپیلاری کنترل می‌شوند. که این تعادل با عدد مویینه (۳-۱) بیان می‌شود.

$$Ca = \frac{\mu u}{\gamma} \qquad (۳-۱)$$

که μ یسکوزیته سیال تزریقی u سرعت سیال تزریقی و γ کشش‌سطحی سیال تزریقی است. عدد مویینه به صورت معکوس با درصد اشباع نفت باقی‌مانده رابطه دارد.

برای بررسی اثر سورفکتانت در بهبود درصد راندمان برداشت از ترکیب سورفکتانت آنیونی SDS با غلظت ۱wt% و ۲wt% آب‌نمک و سورفکتانت کاتیونی TTAB با غلظت ۱wt% و ۲wt% آب‌نمک استفاده شد.

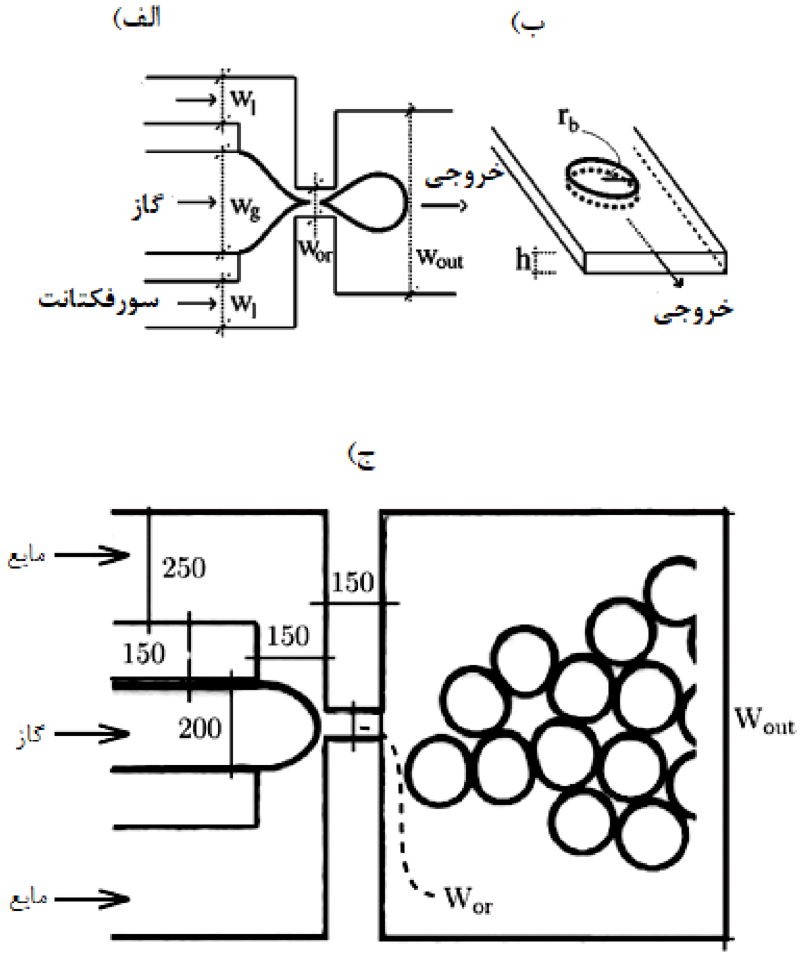
برای آماده کردن محلول‌های فوق ابتدا مقدار ۰,۴ گرم نمک و ۰,۲ گرم از پودرهای سورفکتانت را در مقدار ۱۹,۴ گرم آب به کمک هات‌پلیت مخلوط؛ تا محلول آماده شود، سپس میکرومدل از روغن رنگی اشباع شد. به کمک پمپ سرنگی در دبی‌های ۰,۲ml/hr و ۰,۵ml/hr برای هر آزمایش مجزا به

[1] Chang et al

میکرومدل اشباع‌شده تزریق شد و به کمک میکروسکوپ و عکس‌برداری در زمان‌های مختلف روند تزریق مشاهده و عکس گرفته‌شده است. شکل زیر فرآیند تزریق سورفکتانت را در میکرومدل نشان می‌دهد.

۳-۵-۲- تولید حباب در دستگاه جریان متمرکز

برای تولید قطره در میکرو سیالات عموماً از دستگاه T-junction و برای تولید حباب از دستگاه جریان متمرکز استفاده می‌شود. طرح دستگاه جریان متمرکز به کمک لیتوگرافی ساخته شد. به‌صورت کیفی، فعالیت دستگاه جریان متمرکز که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است را می‌توان به صورت زیر توضیح داد.[۱۵]



شکل ۳-۱۳ (الف) دستگاه جریان متمرکز (از نمای بالا). مقطع برش داده شده از کانال مستطیل است (ب) حبابی را در کانال خروجی نشان می‌دهد (ج) تولید حباب

همان‌طور که در شکل ۳-۱۳ مشاهده می‌شود دستگاه جریان متمرکز با ارتفاع ۶۰ میکرومتر شامل دو ورودی است. دو فاز وارد کانال می‌شوند (یک کانال مرکزی با عرض ۲۰۰ میکرومتر برای گاز و دو کانال بیرونی با عرض ۲۵۰ میکرومتر برای مایع). با توجه به اینکه فشار مخزن گاز نیتروژن بالا بود و فشار ورودی به میکرومدل جریان متمرکز نیاز به فشار پایین داشت از رگلاتور استفاده شد تا فشار ۱۰۰ بار را به کمتر از ۱ بار تقلیل دهد و مایع (از دو محلول سورفکتانت SDS و TTAB استفاده شده است) هم به‌وسیله‌ی پمپ سرنگی در ورودی مایع کانال تزریق شد.

سیال در محل تقاطع کانال در بالادست اریفیس با عرض ۵۰ میکرومتر به یکدیگر می‌رسند. افت فشار در راستای محور سیستم، سیال را وارد این سوراخ می‌کند، جریان گاز وارد اریفیس می‌شود و حباب گازی در پایین‌دست اریفیس متورم گردید. این حفره[1] (منظور حباب در حال رشد است) مایع را به خارج کانال هل می‌دهد و جایگزین آن می‌شود. سپس اتصال گردنی[2] حباب به کانال داخلی با بزرگ شدن حباب، نابود می‌شود و حباب از کانال خارجی آزاد می‌شود. مشاهده شد زمانی که بازه فشار (p) گسترده‌ای به جریان گاز اعمال شود، در نرخ جریان ثابت مایع (Q)، سیستم حالت دوره‌ای خواهد داشت بدین‌صورت که در هر دوره نوک جریان وارد سوراخ می‌شود، حباب فشرده می‌شود، می‌شکند و از سمت بالای سوراخ آزاد می‌شود. حباب‌ها اندازه‌های یکسانی دارند؛ اندازه حباب‌ها را می‌توان به‌سادگی تعیین کرد: در فشار ثابت اعمال‌شده به جریان گاز، با افزایش دبی سیال، حجم حباب کاهش می‌یابد؛ اگر دبی ثابت باشد، آنگاه افزایش فشار منجر به افزایش جریان می‌شود. در آزمایش‌ها فشار گاز ورودی ثابت و با تغییر دبی و همچنین در دبی ثابت با تغییر فشار گاز قطر حباب‌ها کنترل می‌گردد. بعد از تغییر هریک از پارامترها زمان داده شد تا حباب‌ها به توازن برسند.

---

[1] cavity

[2] neck connecting

۳-۵-۳- تزریق فوم

روش‌های اولیه و ثانویه برداشت نفت در بهترین حالت تنها ۴۰٪ نفت خارج می‌کنند و اغلب نیز از این مقدار کمتر است و بقیه در زمین باقی می‌مانند. برای راندمان بیشتر از چاه بهتر است که از روش‌های ثالثیه استفاده شود که نفت با پمپ شدن حجم زیادی از سیال به درون چاه جابجا می‌شود و رسیدن به سطح زمین که سیلاب زنی نیز گفته می‌شود. تزریق فوم یکی از روش‌های معروف برای هل دادن و هدایت نفت به سمت چاه‌های تولیدی است.

در محیط متخلخل تعریف فوم بیشتر مبهم است چراکه اغلب فوم به‌صورت فیلم نازک مایع به نام لملا شناخته‌شده است. لملا در حضور سورفکتانت در مرز مشترک گاز مایع پایدار شده است. به علت ویسکوزیته‌ی موثر بالاتر فوم نسبت به گاز، اغلب به عنوان روشی برای بهبود جاروب موثر در فرآیندهای ازدیاد کاربرد دارد. فوم می‌تواند انگشتی شدن[1] را با کاهش ویسکوزیته و چگالی کاهش دهد.

برای تزریق فوم در دستگاه‌های میکرو سیالات ابتدا باید فوم را در یک دستگاه مجزا آماده کرد که تولید فوم در قسمت تولید حباب بیان شد

فوم تولیدشده در دستگاه جریان متمرکز پس از پایدار شدن به کمک لوله PET به محیط متخلخل انتقال داده می‌شوند تا با جاروب کردن میکرومدل، نفت را به دلیل ویسکوزیته‌ی بالاتر فوم جابجا کند. نفت برداشت‌شده از خروجی میکرومدل در ظرف دیگری ریخته شده است. همچنین به کمک میکروسکوپ (شرکت دولومیت) که همراه با دوربین پرسرعت است از روند جاروب شدن میکرو مدل عکس‌برداری شده است؛ که درنتیجه عکس‌های باکیفیتی از فرآیند جاروب شدن میکرومدل خواهیم داشت. دبی سورفکتانت تزریقی به کمک پمپ سرنگی و فشار گاز ورودی نیز با رگلاتور کنترل شده است. در آزمایش عکس‌های گرفته‌شده در زمان‌های مختلف ثبت شد که درنهایت برای هر عکس

---

[1] viscous fingering

پردازش تصویر انجام شده است و نتایج آن یادداشت شد. آزمایش‌ها برای فوم با سورفکتانت‌های متفاوت انجام شد که برای تائید راستی آزمایی هر آزمایش سه مرتبه تکرار شده است. سورفکتانت‌های استفاده‌شده در آزمایش سدیم دودسیل‌سولفات (SDS) که از دسته سورفکتانت‌های آنیونی و تترا-دسیل‌تری‌متیل‌آمونیوم‌بروميد (TTAB) از دسته‌ی سورفکتانت‌های کاتیونی است. غلظت سورفکتانت‌ها ۱wt است. زنگ و همکاران[1] به مقایسه‌ی گازهای CO_2،N_2 ، CH_4 و مخلوطCH_4-CO_2 و گاز دودکش[2] پرداختند که نتایج کار آن‌ها در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. با توجه به نتایج فوم حاصل از گاز نیتروژن دارای ویسکوزیته‌ی ظاهری بالاتر و استحکام بیشتر است [۷۹].

۳-۶- تحلیل اطلاعات

۳-۶-۱- روش پردازش اطلاعات

در هنر قرمز، آبی و زرد سه رنگ عمده هستند که با ترکیب شدن با یکدیگر به نسبت‌های مختلف، سایر رنگ‌ها را ایجاد می‌کنند. در دنیای دیجیتال قرمز، آبی و سبز رنگ‌های عمده هستند. با ترکیب کردن روشنایی‌های مختلف این سه رنگ می‌توان سایر رنگ‌ها را ایجاد کرد که به "RGB" معروف هستند. رنگ‌های RGB را می‌توان با سه عدد [R G B] جدا کرد و هر عدد از ۰ تا ۲۵۵ بر اساس شدت این سه رنگ متغییر هستند. برای مثال ماتریس اعداد [۰ ۰ ۲۵۵]، [۰ ۲۵۵ ۰]و [۲۵۵ ۰ ۰] به ترتیب بیانگر رنگ‌های قرمز، سبز و آبی هستند. درصورتی‌که شدت رنگ‌های فوق بالاترین حد خود را داشته باشند [۲۵۵ ۲۵۵ ۲۵۵] شاهد رنگ سفید و درصورتی‌که کمترین مقدار خود را داشته باشند [۰ ۰ ۰] رنگ مشکی را خواهیم داشت.

عکس‌های گرفته‌شده در زمان‌های مختلف جاروب شدن روغن را به کمک سیال‌های جابجا کننده در میکرومدل نشان می‌دهد و عکس‌ها به‌صورت پیکسل برای جدا کردن فازها تحلیل شده

---

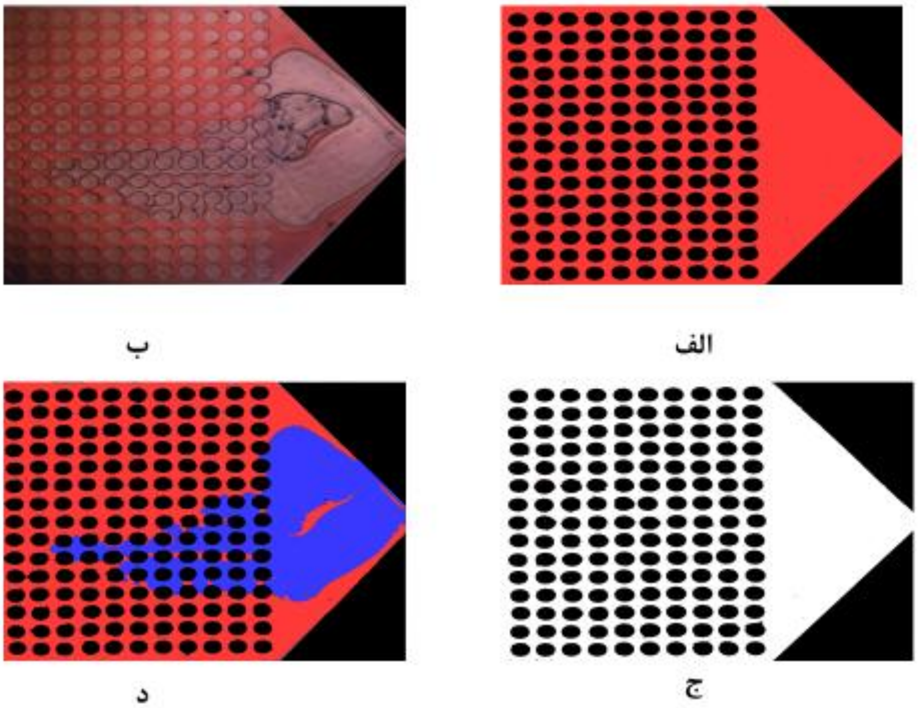
[1] Zeng et al

[2] Flue Gas

است.

شکل ۳-۱۴ ابتدا عکس خام از میکرومدل که با روغن اشباع‌شده است الف حالت قبل از جاروب شدن و ب) حالت بعد از جاروب شدن را نشان می‌دهد. برای پردازش ابتدا عکس به‌صورت باینری[1] تبدیل‌شده که فقط "۰" و "۱" ایجادشده که پیکسل‌های سیاه و سفید است. ناحیه‌ی سفید فضای در دسترس برای جریان و ناحیه‌ی مشکی دانه‌ها را نشان می‌دهد. با شروع جاروب شدن، جریان فوم وارد میکرومدل شده و در آن نفوذ می‌کند؛ که در قسمت ج نشان داده شده است. محلول سورفکتانت و حباب‌های گاز دایره‌های بی‌نظم که در محلول سورفکتانت توزیع‌شده‌اند که با رنگ سفید نشان داده شده است. روغن نیز با رنگ قرمز متمایز شده است. با توجه به تفاوت رنگ در دو سیال جابجا شونده و جابجا کننده، هر پیکسل عکس از دیگری متمایز شده است که در قسمت د) نشان داده شده است. برای راحتی فاز سیال جابجا کننده، جابجاشونده و دانه‌ها به ترتیب بارنگ‌های آبی، قرمز و مشکی مشخص‌شده‌اند؛ که برای محاسبه‌ی اشباع هر فاز تعداد پیکسل‌های رنگ مربوط به خودش شمرده شده است. برای این کار از پردازش تصویر به کمک نرم‌افزار متلب استفاده شده است.

[1] binary



شکل ۳-۱۴ فرایند پردازش تصویر

برای پردازش تصاویر فازهای مختلف در تصاویر از یکدیگر جداشده‌اند و درنهایت به کمک پردازش تصویر متلب تحلیل شدند. با مقایسه‌ی پیکسل تصویر رنگ‌های قرمز و آبی مقادیر آن‌ها به دست آورده و با ابن نتایج، نمودارهای اشباع رسم گردید.

۳-۶-۲- پارامترهای پردازش تصویر

اشباع برای هر فاز به‌صورت کسر مساحت آن فاز به مساحت کل تعریف شده است که به ترتیب در رابطه‌های (۳-۱) و (۳-۲) و (۳-۳) بیان شد.

$$s_o = s_r = \frac{A_r}{A_{tot}} \tag{۳-۱}$$

$$s_{sur} = s_b = \frac{A_b}{A_{tot}} \tag{۳-۲}$$

$$A_{tot} = A_r + A_b \qquad (۳-۳)$$

که A_{tot} مساحت کل فازهای موجود در عکس است. به ترتیب A_r، A_b بیانگر مساحت فازهای سیال جابجاشونده و جابجاکننده و s_o، s_{sur} نیز توصیف گر اشباع روغن و سیال جابجا کننده می‌باشد. قبل از شروع تزریق A_{tot} برابر مساحت روغن اولیه است.

راندمان جاروب مؤثر نسبت روغن جاروب شده (روبیده شده) به مقدار روغن اولیه تعریف شده است که در رابطه‌ی (۳-۴) بیان شد.

$$E = \frac{A_{tot} - A_r}{A_{tot}} = 1 - \frac{A_r}{A_{tot}} = 1 - s_o \qquad (۴-۳)$$

که E راندمان جاروب مؤثر، A_{tot} مقدار روغن اولیه و A_r مساحت روغن بعد از تزریق و s_o اشباع روغن است.

۴- فصل چهارم: نتایج آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه

با توجه به اهمیت ازدیاد برداشت نفت محققین به دنبال یافتن بهترین ماده برای تزریق به‌عنوان سیال جابجا کننده هستند. با توجه به این‌که نیروی مویینه نقش مهمی را در به دام‌انداختن نفت در محیط متخلخل ایفا می‌کند؛ بنابراین اگر نیروی مویینه کاهش یابد، نیروی ویسکوز غالب می‌شود و نفت بهتر جابجا می‌شود. برای ازدیاد برداشت بهتر عدد مویینه باید با کاهش کشش سطحی افزایش یابد. یکی از روش‌های کاهش کشش سطحی استفاده از سورفکتانت است. ساختار منحصربه‌فرد مولکول‌های سورفکتانت، آن را قادر می‌سازد تا مرز مشترک بین آب و نفت یا آب و هوا را از هم جدا کند. وجود سورفکتانت با غلظت کم می‌تواند کشش‌سطحی بین دو سیال را کاهش دهد. در ازدیاد برداشت با فوم، سورفکتانت می‌تواند کشش سطحی بین نفت و آب را کاهش دهد که درنتیجه عدد مویینه افزایش می‌یابد. حضور فوم سبب کاهش نسبت تحرک‌پذیری و افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز می‌شود که سبب افزایش ازدیاد برداشت نفت می‌شود. در این فصل ابتدا نتایج حاصل از تزریق آب‌نمک به‌عنوان سیال پایه و سورفکتانت‌های آنیونی و کاتیونی و فوم‌های تولیدشده به کمک این سورفکتانت‌ها را در محیط میکرومدل نفت دوست و تاثیر آن ها بر مقدار نفت باقی‌مانده در میکرومدل مطالعه می‌شود. در این آزمایش‌ها از روغن پارافین به دلیل عدم تورم میکرومدل به عنوان سیال جابجاشونده و از آب‌نمک و سورفکتانت‌های آنیونی و کاتیونی SDS و TTAB و همچنین فوم‌های تشکیل‌شده از تزریق هم‌زمان سورفکتانت و گاز نیتروژن به عنوان سیال جابجاکننده استفاده می‌شود همچنین اثر دبی سیال‌های تزریق‌شونده بر مقدار نفت باقی‌مانده و نوع سورفکتانت نیز بررسی می‌شود. برتری سورفکتانت های آنیونی و کاتیونی نسبت به آب‌نمک ارزیابی می‌شود و در ادامه به میزان افزایش راندمان مقدار نفت باقی‌مانده در تزریق فوم به عنوان سیال جابجاکننده نسبت به تزریق سورفکتانت پرداخته می‌شود.

۴-۲- اثر رنگ خوراکی بر روی روغن

با توجه به نتایج مطالعات گذشته (کان و همکارانش) به دلیل عدم تورم میکرومدل از روغن پارافین به‌عنوان سیال جابجا شونده استفاده شد. همان‌طور که در فصل ۳ بیان شد به دلیل عکس‌برداری بهتر و تمایز رنگی در پردازش تصویر بین دو سیال جابجا کننده و سیال جابجا شونده از رنگ خوراکی با غلظت ۰٫۵wt% در روغن استفاده می‌شود.

ویسکوزیته‌ی روغن به کمک دستگاه ویسکومتر Antom Paar MCR302 دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد؛ که بر اساس نتایج گرفته شده مقدار ویسکوزیته‌ی روغن در حالتی که رنگ به آن افزوده شد ۳۰٫۸۹mpa.s بود درحالی‌که این مقدار برای روغن بدون رنگ ۳۱٫۰۴mpa.s اندازه‌گیری شد که بیانگر این است که افزودن رنگ خوراکی تأثیر زیادی بر مقدار ویسکوزیته ندارد.

۴-۳- تکرارپذیری

به‌منظور یکپارچگی داده‌های آزمایش و تکرارپذیری تست‌ها، هر آزمایش ازدیاد برداشت بر روی محیط یکسان و طی چند دوره تحت شرایط یکسان انجام شد. نتایج حاصل از سورفکتانت‌های SDS و TTAB و فوم‌های تشکیل‌شده با سورفکتانت‌های SDS و TTAB در ادامه نشان داده می‌شود. لازم به ذکر است که به منظور کم کردن خطای آزمایش و نتایج دقیق‌تر، محیط متخلخل پس از شستشو خشک شود و به مدت ۲۴ ساعت از آن استفاده نشود.

جدول ۴-۱ تا جدول ۴-۳ به‌خوبی نشان‌دهنده مطابقت زیاد سه تست متفاوت سورفکتانت‌های SDS و TTAB و آب‌نمک در تکرارپذیری داده‌ها است. نحوه محاسبه انحراف معیار در پیوست الف ذکر شده است.

جدول ۴-۱ مقادیر نفت باقی‌مانده‌ی اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف سورفکتانت TTAB در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت

زمان (دقیقه)	Oil saturation Test 1	Test 2	Test 3	میانگین	انحراف معیار
br[1]	۴۷,۳۵	۵۷,۶۲	۴۷,۵۳	۵۰,۸۳	۵,۸۸
۱	۲۹,۱۵	۲۵,۷۴	۲۴,۶۱	۲۶,۵۱	۲,۳۶
۲	۲۸,۸۴	۲۱,۲۴	۲۳,۲۷	۲۴,۴۵	۳,۹۴
۳	۲۷,۵۶	۲۰,۸۶	۲۲,۰۷	۲۳,۵۰	۳,۵۷
۶	۲۵,۱۳	۱۸,۳۳	۱۷,۴۴	۲۰,۳۰	۴,۲۱
۹	۲۴,۷۵	۱۷,۵۶	۱۷,۰۴	۱۹,۷۹	۴,۳۱

جدول ۴-۲ مقادیر نفت باقی‌مانده‌ی اندازه‌گیری شده در زمان‌های برای آب‌نمک۲wt% در دبی ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت

زمان (دقیقه)	Oil saturation Test 1	Test 2	Test 3	میانگین	انحراف معیار
br	۵۷,۳	۵۱,۲۸	۵۳,۹۸	۵۴,۱۸	۳,۰۱
۱	۵۲,۸۳	۴۴,۳۷	۴۹,۰۳	۴۸,۷۴	۴,۲۳
۲	۴۸,۴۳	۳۸,۶۷	۴۱,۹۳	۴۳,۰۱	۴,۹۶
۳	۳۱,۴۷	۳۹,۷۴	۳۴,۹۷	۳۵,۳۹	۴,۱۵
۶	۳۳,۲	۲۴,۸۷	۲۸,۰۷	۲۸,۷۱	۴,۲
۹	۲۹,۷۱	۲۴,۱۲	۲۶,۰۷	۲۶,۶۳	۲,۸۳

[1] Breakthrough Time

جدول ۴-۳ مقادیر نفت باقی‌مانده‌ی اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف سورفکتانت SDS در دبی ۰٫۲ میلی‌لیتر بر ساعت

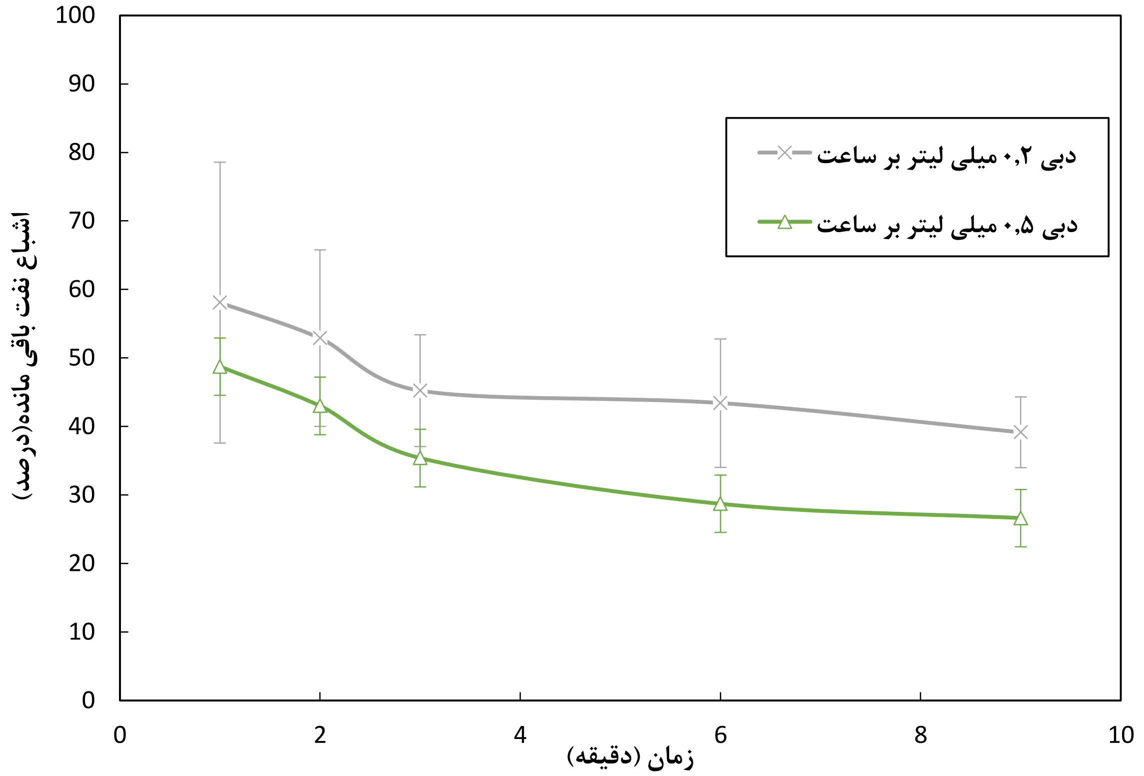
زمان (دقیقه)	Oil saturation			میانگین	انحراف معیار
	Test 1	Test 2	Test 3		
br	۴۰٫۱۹	۲۶٫۷۱	۲۹٫۹۹	۳۲٫۲۹	۷٫۰۲۹
۱	۳۹٫۲۴	۲۳٫۲۲	۲۷٫۸۰	۳۰٫۰۹	۸٫۲۵
۲	۳۲٫۳۰	۲۲٫۳۷	۲۴٫۷۴	۲۶٫۴۷	۵٫۱۸
۳	۲۷٫۰۴	۲۰٫۵۱	۲۴٫۴۱	۲۳٫۹۹	۳٫۲۸
۶	۲۵٫۸۶	۱۸٫۴۸	۲۰٫۷۹	۲۱٫۷۱	۳٫۷۷
۹	۲۱٫۸۸	۱۷٫۸۱	۱۹٫۱۱	۱۹٫۶۰	۲٫۰۸

۴-۴- تزریق آب‌نمک

با توجه به اینکه در اکثر مخازن نفتی در ایران از آب دریای خلیج‌فارس به‌عنوان سیال تزریقی استفاده می‌شود در تحقیق حاضر از آب‌نمک با شوری ۲wt% به‌عنوان سیال پایه برای مقایسه با سایر آزمایش‌ها استفاده می‌شود.

۴-۴-۱- اثر دبی در تزریق آب‌نمک

شکل ۴-۱ نمودار اشباع نفت باقی‌مانده برای آب‌نمک ۲wt% را در زمان‌های مختلف برای دبی-های ۰٫۲ و ۰٫۵ میلی‌لیتر بر ساعت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۱ در دقایق پایانی، میزان اشباع نفت باقی‌مانده با افزایش زمان تغییر نمی‌کند و به شرایط حالت پایا رسیده است به همین دلیل تغییرات اشباع نفت باقی‌مانده در ۹ دقیقه‌ی اولیه گزارش شده است.



شکل ۴-۱ اثر دبی بر مقدار اشباع نفت باقی‌مانده در اثر تزریق آب‌نمک ۲wt%

شکل ۴-۱ بیانگر این است که با افزایش دبی آب‌نمک، اشباع نفت باقی‌مانده در دبی ۰,۲ تا ۴۱ درصد و در دبی ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت تا اشباع ۲۷ درصد کاهش می‌یابد.

۴-۵- تزریق سورفکتانت

۴-۵-۱- تأثیر متغییرهای مختلف در مقدار نفت باقی‌مانده

برای بهبود ازدیاد برداشت عدد مویینه باید با کاهش کشش سطحی افزایش یابد. یکی از روش‌های کاهش کشش سطحی استفاده از سورفکتانت است. در این قسمت به بررسی اثر دبی و نوع سورفکتانت در مقدار نفت باقی‌مانده پرداخته می‌شود.

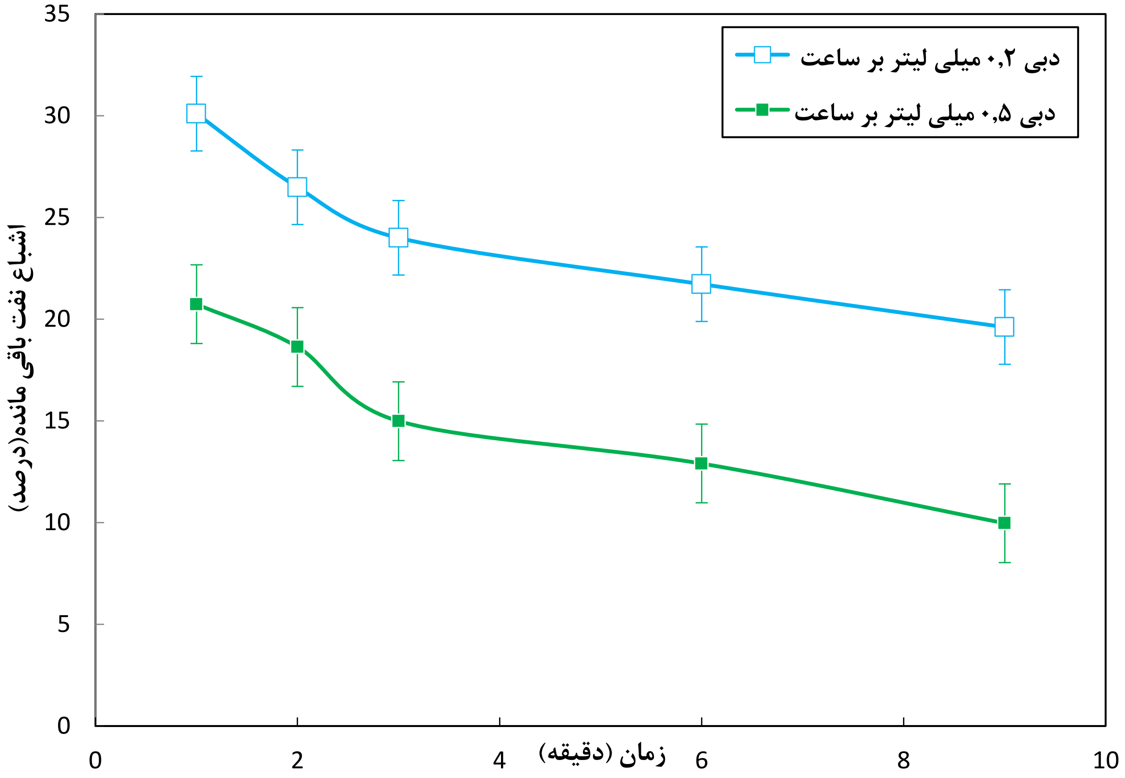
همان‌گونه که در فصل ۱ گفته شد عدد مویینه می‌تواند با افزایش سرعت سیال تزریقی یا کاهش کشش سطحی افزایش یابد که سرعت سیال با افزایش دبی پمپ افزایش و یا با افزودن سورفکتانت

کشش سطحی کاهش می‌یابد.

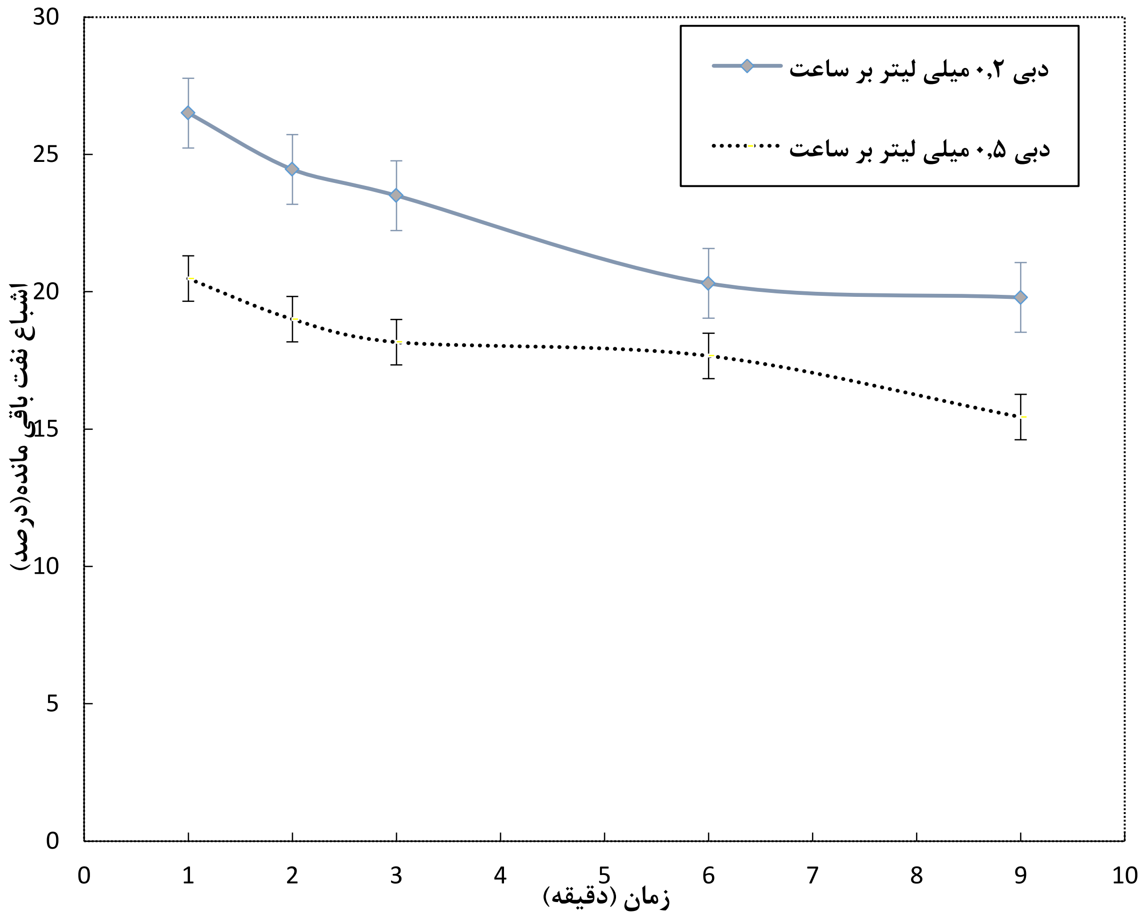
۴-۵-۱-۱- بررسی اثر دبی

همان‌گونه که در فصل ۱ ذکر شد اثر دبی روی پارامتر سرعت در رابطه عدد موئینه تأثیرگذار است که با افزایش دبی عدد موینه افزایش می‌یابد که باعث بهبود ازدیاد برداشت نفت می‌شود. از طرفی سورفکتانت با تأثیر مثبت بر ترشوندگی و کشش سطحی باعث بهبود ازدیاد برداشت می‌شود.

شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ درصد نفت باقی‌مانده میکرومدل در دبی‌های ۰,۲ و ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت برای دو سورفکتانت آنیونیSDS با ۱ درصد وزنی سورفکتانت و ۲ درصد وزنی آب‌نمک و سورفکتانت کاتیونی TTAB با ۱ درصد وزنی سورفکتانت و ۲ درصد وزنی آب‌نمک برای بررسی اثر دبی بر مقدار نفت باقی‌مانده را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲ اثر دبی بر اشباع نفت باقی‌مانده در تزریق سورفکتانت ۱wt% SDS+ ۲wt% NaCl

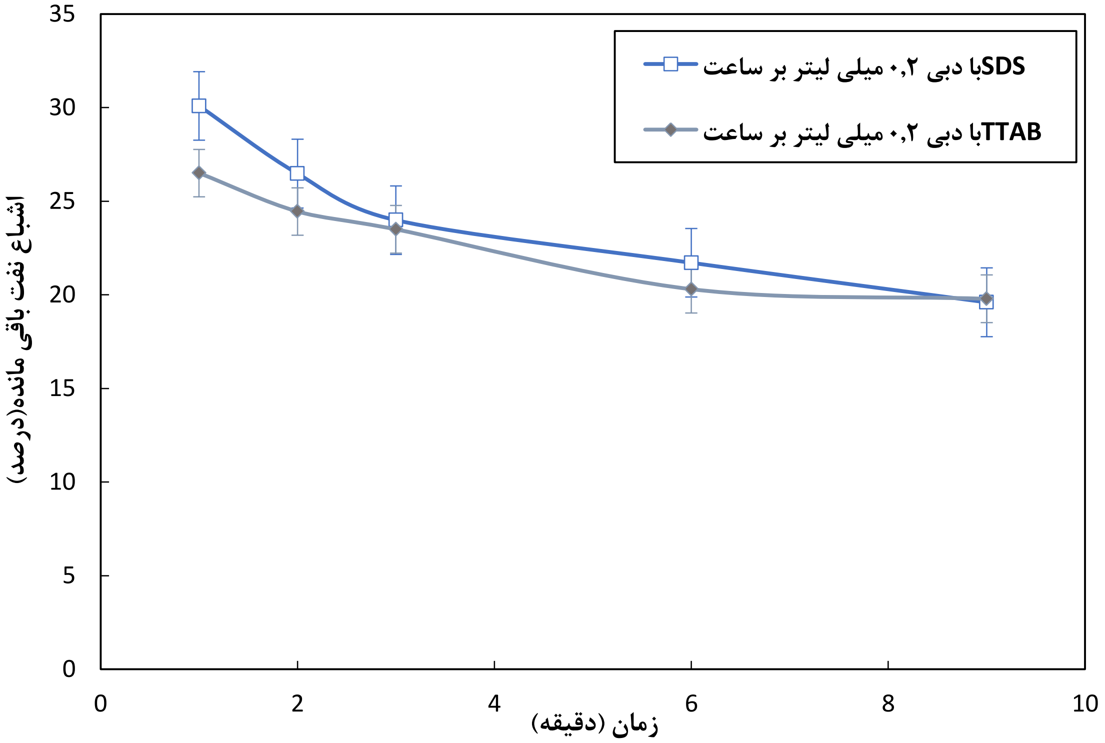


شکل ۴-۳ اثر دبی بر اشباع نفت باقی‌مانده در تزریق سورفکتانت ۲wt% NaCl+۱wt% TTAB

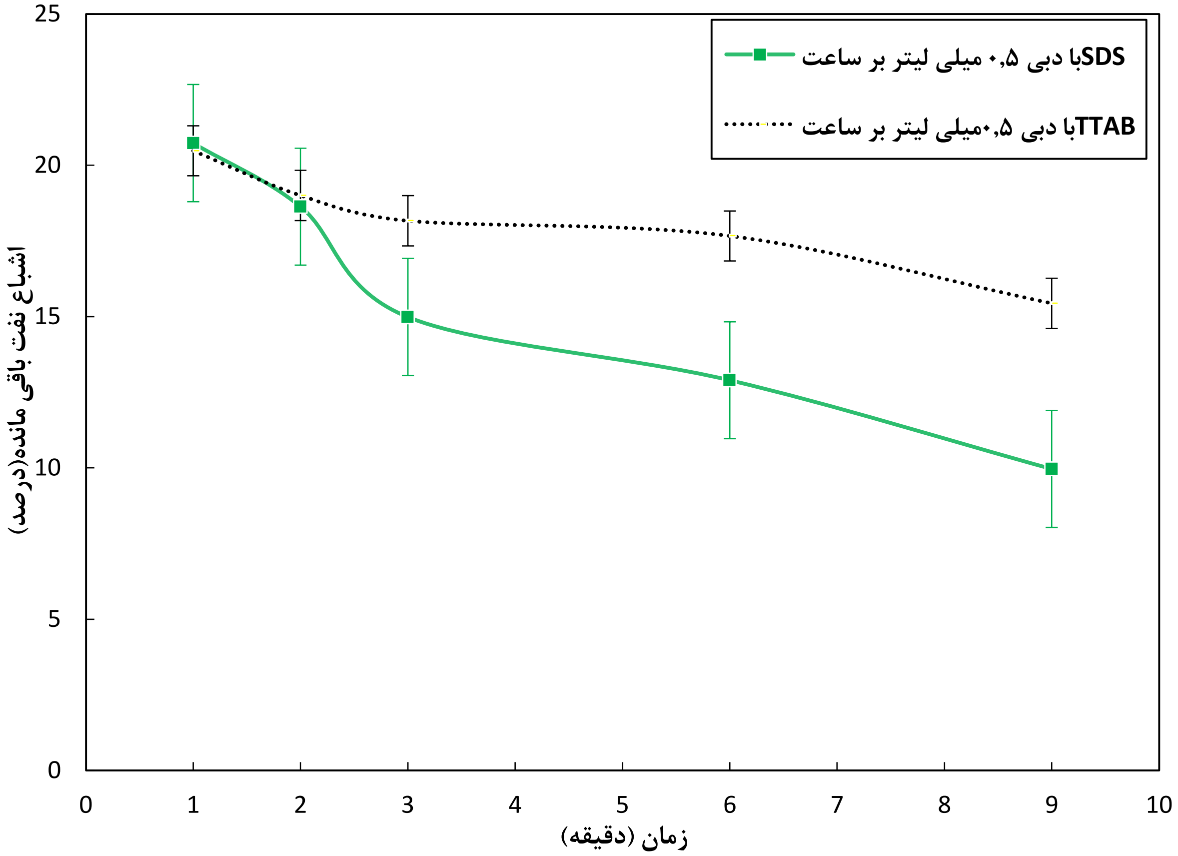
شکل ۴-۲ و شکل ۴-۳ اثر دبی بر مقدار اشباع نفت باقی‌مانده را در اثر تزریق سورفکتانت‌های SDS و TTAB در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد که بیانگر این است که به دلیل افزایش دبی عدد مویینه افزایش می‌یابد و سبب کاهش مقدار نفت باقی‌مانده می‌شود. با توجه به نمودارهای فوق برای سورفکتانت SDS در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت و دبی ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت به‌طور میانگین اختلاف بین دبی ۰,۲ و ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت حدوداً ۱۰ درصد است و برای سورفکتانت TTAB اختلاف بین دو دبی نسبت به SDS کمتر است. همچنین در دقایق اولیه شیب نمودار نسبت به دقایق پایانی تست تندتر است و باگذشت زمان مقدار نفت باقی‌مانده روند ثابتی را نشان می‌دهد.

۴-۵-۱-۲- بررسی اثر نوع سورفکتانت

با توجه به تعریف عدد مویینه که در فصل ۱ گفته شد اثر نوع سورفکتانت روی پارامتر کشش سطحی و ویسکوزیته در رابطه عدد موئینه تأثیرگذار است. آزمایش‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که هم مواد فعال سطحی کاتیونی و هم مواد فعال سطحی آنیونی در آب‌دوست کردن مخزن نفت دوست تأثیر بسزایی داشته که به‌موجب آن مکش خود به خودی آب به داخل مخزن رخ می‌دهد[۳۴].



شکل ۴-۴ مقایسه‌ی اثر سورفکتانت آنیونی و کاتیونی در دبی ثابت ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت



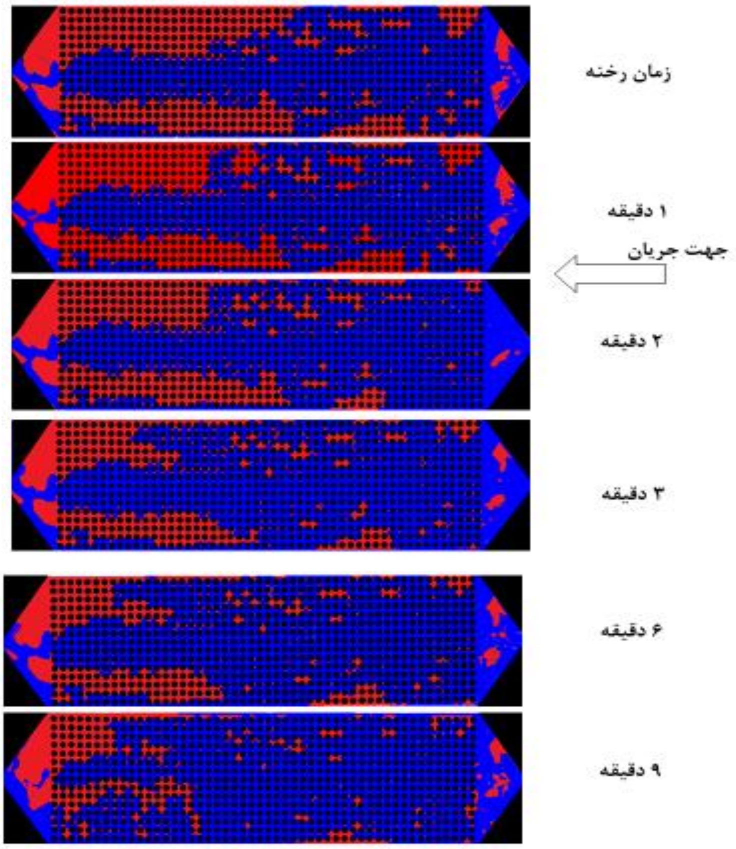
شکل ۴-۵ مقایسه‌ی اثر سورفکتانت آنیونی و کاتیونی در دبی ثابت ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت

شکل ۴-۴ و شکل ۴-۵ اشباع نفت باقی‌مانده را در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۹ دقیقه برای دو سورفکتانت آنیونی SDS و سورفکتانت کاتیونی TTAB در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۴ در دقایق اول و در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت اختلاف مقدار نفت باقی‌مانده در میکرومدل بین SDS و TTAB حدوداً ۵ درصد گزارش می‌شود که نسبت به مقدار باقی‌مانده‌ی نفت از دقیقه‌ی ۳ به بعد بیشتر است و از ۶ دقیقه مقدار نفت باقی‌مانده تغییر زیادی نمی‌کند و درنهایت مقدار اشباع نفت باقی‌مانده ۱۹,۶ درصد اعلام می‌شود.

شکل ۴-۵ اشباع نفت باقی‌مانده را در بازه‌ی زمانی ۰ تا ۹ دقیقه برای دو سورفکتانت آنیونی SDS و سورفکتانت کاتیونی TTAB در دبی ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در دقایق اولیه اختلاف بین مقدار نفت باقی‌مانده در SDS و TTAB ناچیز است ولی باگذشت زمان سورفکتانت آنیونی SDS نسبت به سورفکتانت کاتیونی TTAB ۵ درصد اشباع نفت باقی‌مانده‌ی

کمتری در آزمایش‌های تحقیق حاضر دارد.

تزریق سورفکتانت SDS1wt% در بازه‌های زمانی ذکرشده در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت را نشان می‌دهد. جهت جریان از ورودی میکرومدل به سمت خروجی است که در مشخص‌شده است. درروند روبیدن میکرومدل از دقیقه‌ی ۶ تا ۹ تغییر ۵ درصدی در میزان اشباع نفت باقی‌مانده مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۶ تز

۰,۲ میلی لیتر بر ساعت

۴-۶- بررسی پارامتر زمان رخنه

مدت‌زمان تزریق اولین میزان سیال از ورودی و سپری کردن تا خروجی میکرومدل را زمان رخنه می‌گویند.

جدول ۴-۴ مقدار درصد نفت باقی‌مانده و زمان رخنه در میکرومدل در دبی‌های ذکرشده را برای سه تست که بیانگر تکرارپذیری است، در تزریق آب‌نمک و سورفکتانت SDS و TTAB را نشان می‌دهد.

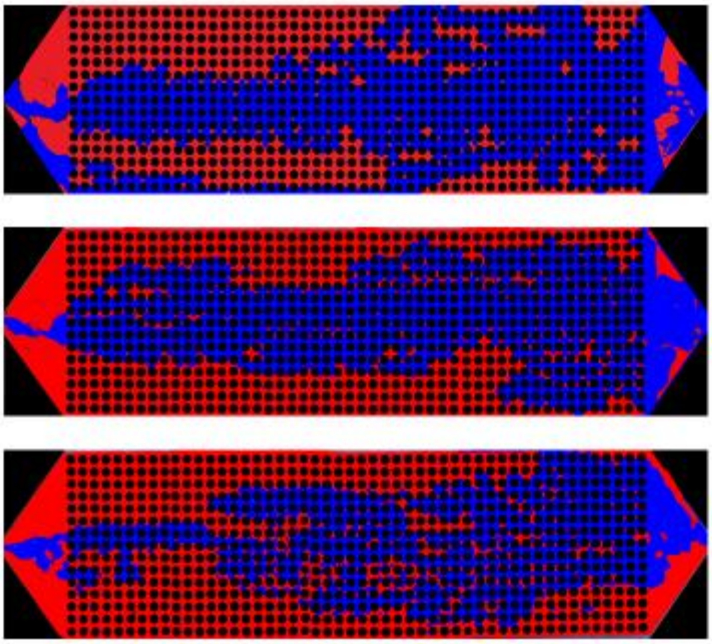
جدول ۴-۴ زمان رخنه و مقدار نفت باقی‌مانده را برای آب‌نمک، SDS و TTAB در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت

ماده		مقدار نفت باقی‌مانده	زمان رخنه
آب نمک ۲ درصد وزنی در دبی ۰,۲ میلی لیتر بر ساعت	میانگین	۶۱,۵۵	۱۰,۱۸
سورفکتانت SDS ۱ درصد وزنی و ۲ درصد وزنی نمک در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت	میانگین	۳۲,۲۹	۱۵,۰۶
سورفکتانت TTAB ۱ درصد وزنی و ۲ درصد وزنی نمک در دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت	میانگین	۵۰,۸۳	۱۰,۲۵

با توجه به جدول ۴-۴ مشاهده می‌شود که به دلیل کاهش کشش سطحی بین سیالات و تغییر تر شوندگی در محیط متخلخل زمان رخنه در حضور سورفکتانت افزایش می‌یابد.

با مقایسه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام‌شده مشاهده می‌شود که زمان رخنه در سورفکتانت TTAB از SDS کمتر است و همچنین مقدار نفت باقی‌مانده در زمان رخنه برای سورفکتانت SDS از TTAB کمتر است.

شکل ۴-۷ روند حرکت سورفکتانت SDS و TTAB و آب‌نمک را در زمان رخنه برای دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت را در میکرومدل نشان می‌دهد. (جهت جریان از راست به چپ است)



الف

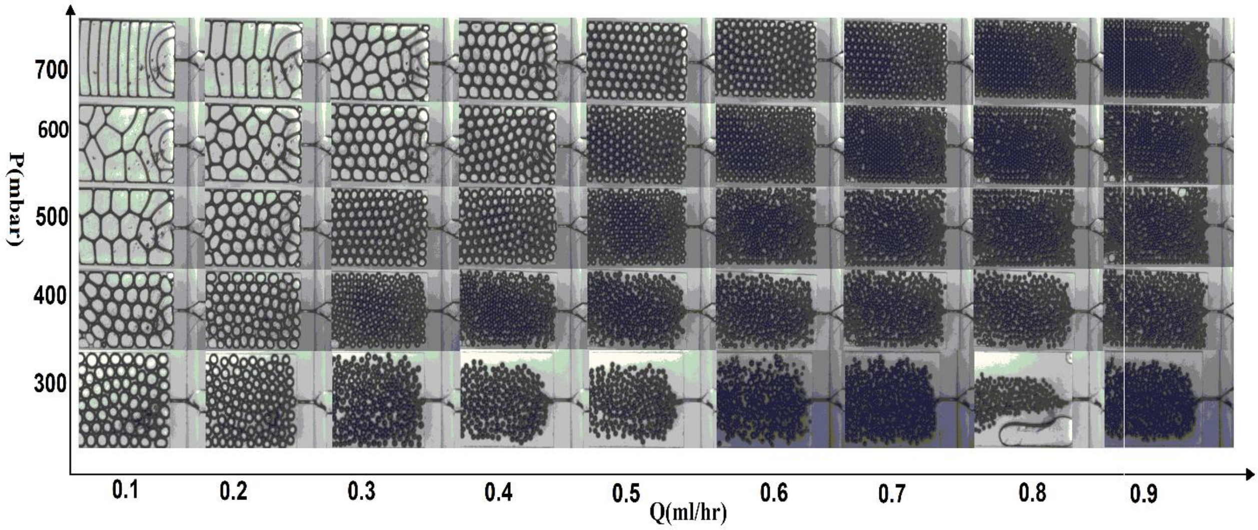
ب

ج

شکل ۴-۷ تزریق الف) سورفکتانت SDS ب) سورفکتانت TTAB ج) آب‌نمک در دبی ۰,۲ میلی لیتر بر ساعت در زمان رخنه

۴-۷- تولید حباب

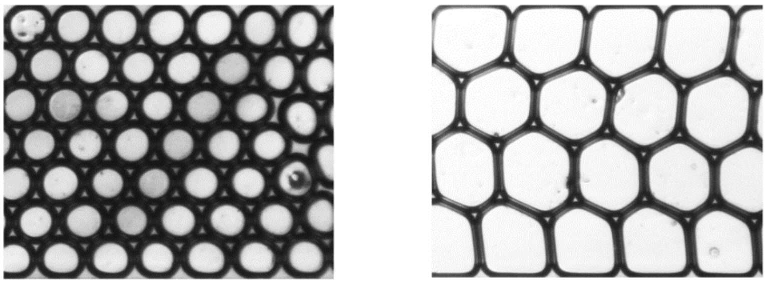
برای تولید فوم در ازدیاد برداشت روش‌های مختلفی وجود دارد یکی از این روش‌ها تولید حباب در دستگاه مجزای جریان متمرکز است. برای بررسی کیفیت حباب‌های تشکیل‌شده، در دستگاه جریان متمرکز که در فصل در مورد نحوه ساخت آن بیان شد دربازه‌ی فشاری ۳۰۰ تا ۷۰۰ میلی بار و دبی ۰,۱ تا ۰,۹ میلی‌لیتر بر ساعت حباب‌هایی تولید شد. در شکل ۴-۸ تغییرات حباب‌های تولیدشده به این روش نشان داده می‌شود.



شکل ۴-۸ تغییرات اندازه حباب‌های تولیدشده برحسب دبی و فشار

همان‌طور که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌شود در فشار ثابت اعمال‌شده به جریان گاز، با افزایش دبی سیال حجم حباب کاهش می‌یابد و تراکم حباب‌های تولیدشده افزایش می‌یابد؛ اگر دبی ثابت باشد، آنگاه افزایش فشار منجر به افزایش حجم حباب می‌شود و تراکم حباب‌ها کاهش می‌یابد. در این مطالعه از حباب‌های تولیدشده در فشار ۳۰۰ میلی بار و دبی ۰٫۲ میلی‌لیتر بر ساعت به علت تراکم و اندازه یکنواخت آن‌ها استفاده می‌شود.

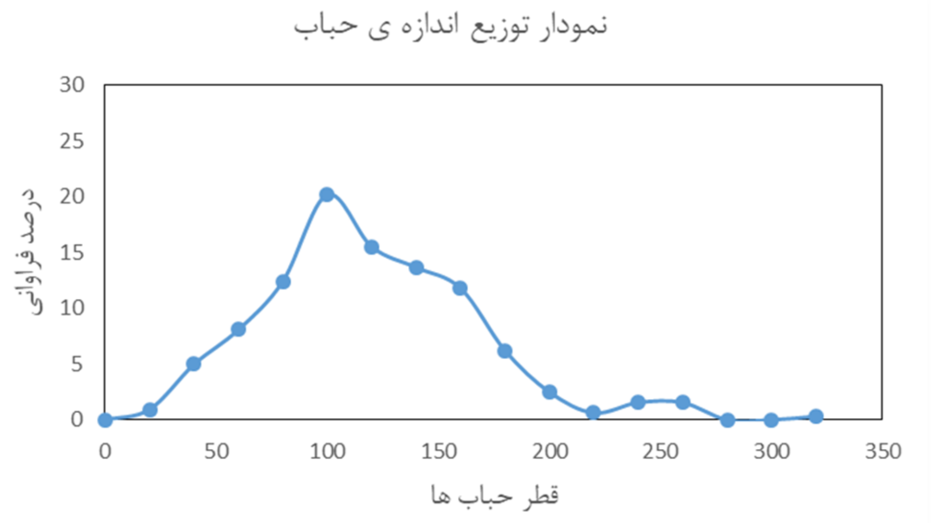
شکل ۴-۹ نمونه‌ای از فوم تر و خشک تولیدشده را نشان می‌دهد. فوم تر فومی با کیفیت پایین است که با توجه به تعریف کیفیت دبی گاز باید کم باشد تا فوم تر تشکیل شود. برای تولید فوم خشک نیز باید دبی گاز زیاد باشد. فوم خشک شامل حباب‌های بزرگ و لملا با ضخامت کم و فوم تر شامل حباب‌های کوچک و لملا با ضخامت زیاد است. در فوم‌های تر حباب‌ها تقریباً گرد هستند درحالی‌که فوم‌های خشک به‌صورت چندضلعی می‌باشند. در آزمایش‌های انجام‌شده کیفیت فوم طبق رابطه‌ی (۲-۶)، ۸۵٪ محاسبه می‌شود.



شکل ۴-۹ فوم تر و خشک

معمولاً بافت فوم[1] را به‌اندازه‌ی حباب‌ها ربط می‌دهند تحرک فوم به‌شدت تابع بافت فوم است که بافت‌های ریز در مقایسه با بافت درشت تحرک بیشتری دارند. اگر میانگین اندازه‌ی حباب‌ها از قطر حفره خیلی کوچک‌تر باشد فوم به‌صورت حباب‌های پراکنده در حفره جریان می‌یابد. اگر اندازه‌ی متوسط حباب‌ها از قطر حفره بیشتر باشد فوم به‌صورت فیلم‌هایی که حباب‌های گاز مجزا را از هم جدا می‌کند، جریان می‌یابد.

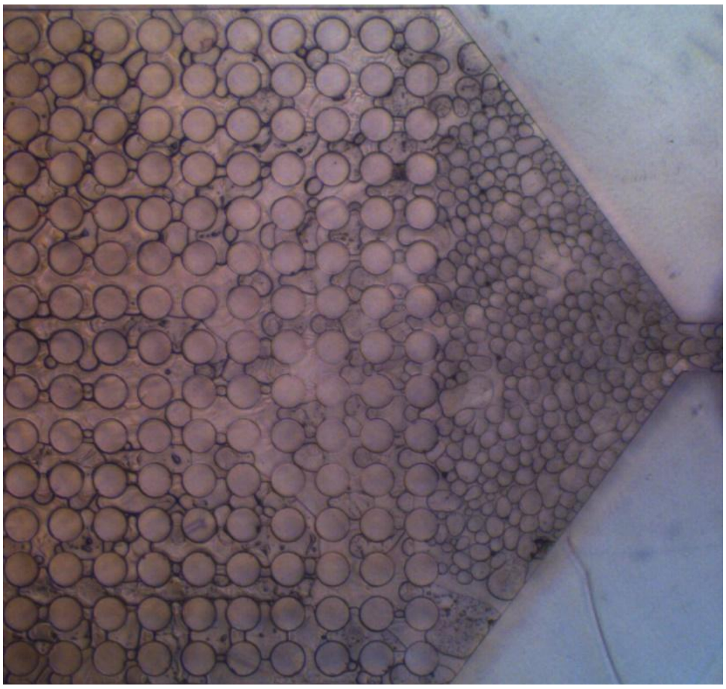
شکل ۴-۱۰ توزیع اندازه‌ی حباب‌ها را که با در نظر گرفتن ورودی میکرومدل شکل ۴-۱۱ و شمردن حباب‌ها با قطرهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰ توزیع اندازه‌ی حباب‌ها در ورودی میکرومدل

[1] Texture Foam

با توجه به اینکه اندازه‌ی حفره در میکرومدل ۸۰ میکرومتر است و تابع توزیع اندازه‌ی حباب‌ها بر اساس شکل ۴-۱۰ شامل حباب‌هایی با اندازه‌های کمتر و بیشتر از قطر حفره است، درنتیجه انتظار می‌رود که در میکرومدل فوم به‌صورت حباب‌های پراکنده در حفره و همچنین فوم به‌صورت فیلم‌هایی که حباب‌های گاز مجزا را از هم جدا می‌کند مشاهده شود که در شکل ۴-۱۱ قابل‌مشاهده است.



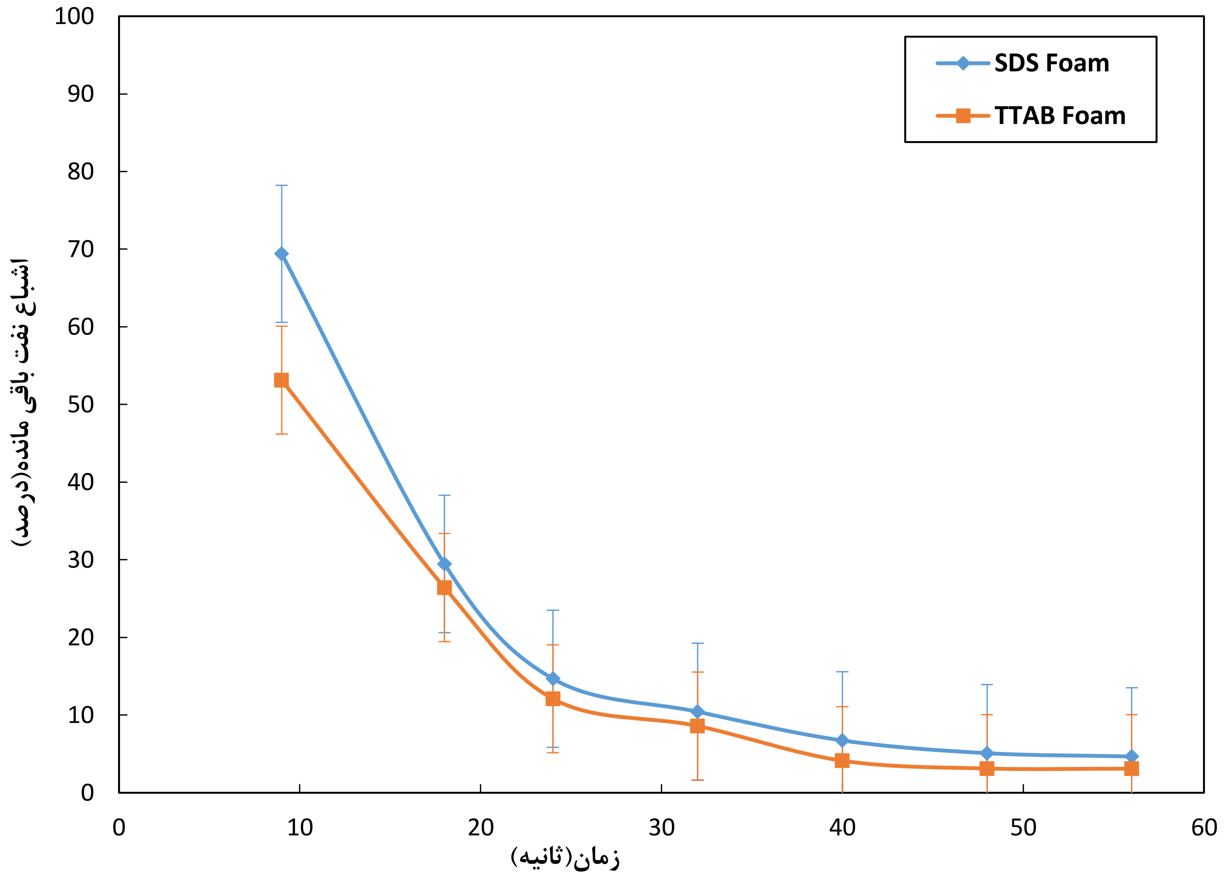
شکل ۴-۱۱ تزریق فوم TTAB با دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار ۳۰۰ میلی بار در میکرومدل

۴-۸- تزریق فوم

تزریق گاز در شکل‌های مختلف می‌تواند سبب بهبود تولید شود؛ اما در حین تزریق گاز ممکن است بازدهی تولید به حد مطلوبی افزایش پیدا نکند. چگالی پایین گاز و پدیده انگشتی شدن ازجمله معایب تزریق گاز به مخازن به شمار می‌رود. یکی از راهکارهای مقابله با چنین مشکلاتی استفاده از روش ازدیاد برداشت به کمک فوم می‌باشد. استفاده از فوم موجب می‌شود تا تحرک پذیری گاز به شکل قابل‌ملاحظه‌ای کاهش پیدا کند.

یکی از تأثیرگذارترین عواملی که بر روی کارایی فوم مؤثر است، اندازه ساختار فوم ایجادشده

می‌باشد. این پارامتر به عوامل بسیاری نظیر نرخ تزریق، نوع و غلظت سورفکتانت، ترشوندگی محیط متخلخل، سیالات موجود در محیط متخلخل و اشباع هریک از آن‌ها و همچنین میزان جذب مولکول‌های سورفکتانت به سطح سنگ بستگی دارد[85] . در این مطالعه با توجه به ساختار و جنس میکرومدل تنها تأثیر نوع سورفکتانت بررسی می‌شود. نمودار شکل ۴-۱۲ اثر نوع سورفکتانت در تزریق فوم بر مقدار نفت باقی‌مانده برای آزمایش با شرایط، دبی سورفکتانت های SDS و TTAB ۰٫۲ میلی-لیتر بر ساعت و فشار گاز ۳۰۰ میلی‌بار را نشان می‌دهد. در آزمایش اخیر حباب‌هایی با قطر متوسط ۲۰۰ میکرومتر برای تزریق در میکرومدل تولید شد.

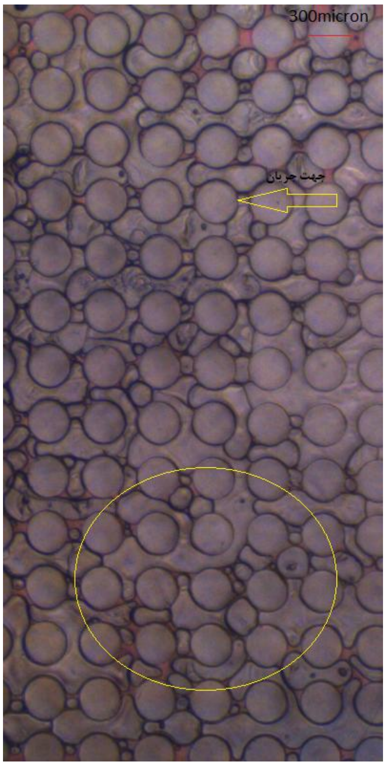


شکل ۴-۱۲ مقایسه تزریق فوم SDS و TTAB در میکرومدل

با توجه به شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود که فوم حاصل از سورفکتانت TTAB نسبت به

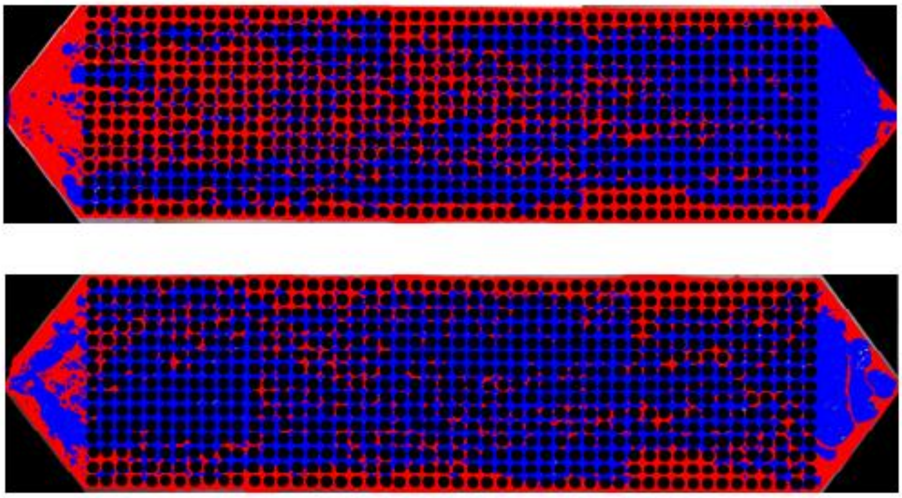
سورفکتانت SDS نفت باقی‌مانده کمتری در میکرومدل دارد که راندمان برداشت را بالاتر می‌برد. همان‌طور که درشکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود نمودار برای هر دو فوم به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد و بعد از ۴۸ ثانیه به مقدار پایداری می‌رسد که تزریق بعدازآن تغییر خاصی را در مقدار نفت باقی‌مانده ایجاد نمی‌کند.

با توجه به اینکه اندازه‌ی حفره ۸۰ میکرومتر است و تابع توزیع اندازه‌ی حباب‌ها بر اساس شکل ۴-۱۰ شامل حباب‌هایی با اندازه‌های کمتر و بیشتر از قطر حفره است، درنتیجه انتظار می‌رود که در میکرومدل فوم‌هایی به‌صورت حباب‌های پراکنده در بین فضای حفره و همچنین فوم‌هایی به‌صورت فیلم‌هایی که حباب‌های گاز مجزا را از هم جدا می‌کند مشاهده شود، که در شکل ۴-۱۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۱۳ برشی از میکرومدل در تزریق فوم

شکل ۴-۱۴ تزریق فوم‌های SDS و TTAB را پس از ۹ ثانیه نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود پس از ۹ ثانیه برای فوم با سورفکتانت TTAB مقدار اشباع نفت باقی‌مانده ۵۳,۱۴ درصد و برای فوم با سورفکتانت SDS مقدار اشباع نفت باقی‌مانده ۶۹,۴ درصد است که شکل ۴-۱۴ نیز بیانگر این گفته است.



شکل ۴-۱۴ تزریق فوم الف)SDS ب)TTAB پس از زمان ۹ ثانیه

جدول ۴-۵ مقایسه‌ی بین اشباع نفت باقی‌مانده پس از زمان ۱ دقیقه برای فوم‌های TTAB،SDS، سورفکتانت‌های SDS، TTAB و آب‌نمک را بیان می‌کند که تزریق فوم میزان اشباع نفت باقی‌مانده در میکرومدل را به دلیل کاهش تحرک‌پذیری گاز، کاهش می‌دهد.

جدول ۴-۵ مقایسه‌ی بین اشباع نفت باقی‌مانده پس از زمان ۱ دقیقه برای فوم‌های TTAB،SDS، سورفکتانت‌های SDS، TTAB و آب‌نمک

سیال تزریق‌شونده	اشباع نفت باقی‌مانده پس از زمان ۱ دقیقه(درصد)
فوم SDS	۴,۶۷
فوم TTAB	۳,۱
سورفکتانت SDS با دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت	۳۰
سورفکتانت SDS با دبی۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت	۲۰,۷۲
سورفکتانت TTAB با دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت	۲۶
سورفکتانت TTAB با دبی۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت	۲۰,۴۸
آب‌نمک با دبی ۰,۲ میلی‌لیتر بر ساعت	۵۸,۰۸
آب‌نمک با دبی ۰,۵ میلی‌لیتر بر ساعت	۴۸,۷۴

۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای انتخاب سیال مناسب برای ازدیاد برداشت نفت مقایسه بین تزریق سیال‌-های آب‌نمک و سورفکتانت‌های SDS و TTAB در دبی‌های ۰٫۲ و ۰٫۵ میلی‌لیتر بر ساعت و فوم‌-های SDS و TTAB انجام‌گرفته است. نتایج حاصل از پروژه در زیر به‌صورت جامع آمده است.

- دستگاه‌های میکروفلوئیدیک با توجه به ارزانی، ساخت راحت و شفافیت بالای آن‌ها برای عکس‌برداری باکیفیت بالاتر در فرآیند ازدیاد برداشت نفت استفاده می‌شوند.
- در مقایسه‌ی موردی تزریق آب‌نمک در دبی‌های ۰٫۲ و ۰٫۵ میلی‌لیتر بر ساعت اشباع نفت باقی‌مانده از دقیقه‌ی ۱ تا دقیقه‌ی ۹ برای دبی‌های۰٫۲ و ۰٫۵ میلی‌لیتر بر ساعت به ترتیب ۱۸٫۹۳ و۲۲٫۱۱ درصد کاهش یافت و همچنین اشباع نفت در دبی ۰٫۵نسبت به ۰٫۲ میلی‌لیتر بر ساعت ۱۲٫۵ درصد کاهش یافت.
- با مقایسه‌ی بین تزریق دو سورفکتانت SDS و TTAB مشاهده می‌شود که SDS نسبت به TTAB در دبی ۰٫۵ میلی‌لیتر بر ساعت به میزان ۵٫۴۴ درصد اشباع نفت باقی‌مانده کاهش می‌یابد.
- با مقایسه‌ی بین تزریق آب‌نمک و سورفکتانت SDS و TTAB مشاهده می‌شود که در دبی ۰٫۲ میلی‌لیتر بر ساعت اشباع نفت باقی‌مانده برای آب‌نمک به مقدار ۳۹٫۱۵ درصد و برای SDS و TTAB به ترتیب به مقدار ۱۹٫۶۰ و ۱۹٫۷۹ درصد اندازه‌گیری می‌شود.
- در پژوهش حاضر برای تولید فوم از دستگاه جریان متمرکز استفاده شد که برای تولید حباب دبی سیال از ۰٫۱ تا ۰٫۹ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار گاز از ۳۰۰ تا ۷۰۰ میلی بار تغییر داده می‌شود که برای تولید حباب از مشخصات فشار گاز ۳۰۰ میلی بار و دبی ۰٫۲ میلی‌لیتر برای تزریق فوم استفاده شد.

- با توجه به اینکه اندازه حفره ۸۰ میکرومتر است و طبق تابع توزیع اندازه‌ی حباب‌ها؛ بیشترین فراوانی حباب‌های ورودی به میکرومدل با فراوانی ۲۰ درصد مربوط به حباب با قطر ۱۰۰ میکرومتر است که از قطر حفره بزرگ‌تر می‌باشد درنتیجه رژیم غالب فوم به‌صورت حباب‌های پراکنده در حفره و همچنین به‌صورت فیلم‌هایی است که حباب‌های گاز مجزا را از هم جدا می‌کنند.
- با مقایسه‌ی بین تزریق فوم‌های SDS و TTAB مشاهده می‌شود فوم که عامل کاهش تحرک‌پذیری و افزایش ویسکوزیته‌ی ظاهری گاز است؛ بعد از ۵۶ ثانیه مقدار اشباع نفت باقی‌مانده در هر دو تزریق به عدد ۴ درصد می‌رسد که نسبت به تزریق سیال در مدت زمان ۱ دقیقه نفت باقی‌مانده‌ی کمتری در میکرومدل وجود دارد.

۵-۲ پیشنهادها

می‌توان برای بررسی بیشتر در مورد بهبود تزریق فوم برای برداشت نفت، موضوعات زیر را بررسی کرد.

- برای کاهش بیشتر تحرک‌پذیری در تولید فوم به فاز مایع پلیمر اضافه کرد.
- برای کاهش بیشتر تحرک‌پذیری در تولید فوم به فاز مایع نانوذره اضافه کرد.
- بررسی اثر تزریق فوم در محیط متخلخل ناهمگون با استفاده از میکرومدل با دو ناحیه‌ی تراوایی
- مدل‌سازی رفتار فوم در محیط متخلخل

۶- فصل ششم: مراجع

1. Ahmed, T. and P. McKinney, *Advanced reservoir engineering*. 2011: Elsevier.

2. Green, D. and G. Willhite, *Enhanced oil Recovery, vol. 6.* SPE Textbook Series, TX, USA, 1998.

3. Lake, L.W., *Enhanced oil recovery*. 1989.

4. خراط, ر., ازدیاد برداشت نفت. ۱۳۹۱: انتشارات نهر دانش.

5. Ali, S.F. and S. Thomas, *A Realistic Look at Enhanced () il Recovery*. Scientia Iranica, 1994. **1**(3).

6. Günther, A. and K.F. Jensen, *Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis.* Lab on a Chip, 2006. **6**(12): p. 1487-1503.

7. Ezekwe, N., *Petroleum reservoir engineering practice*. 2010: Pearson Education.

8. Mattax, C. and J. Kyte, *Ever see a water flood.* Oil Gas J, 1961. **59**(42): p. 115-128.

9. Owete, O.S. and W.E. Brigham, *Flow behavior of foam: a porous micromodel study.* SPE Reservoir Engineering, 1987. **2**(03): p. 315-323.

10. Hornbrook, J., L. Castanier, and P. Pettit. *Observation of foam/oil interactions in a new, high-resolution micromodel*. in *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 1991. Society of Petroleum Engineers.

11. Stone, H.A., A.D. Stroock, and A. Ajdari, *Engineering flows in small devices: microfluidics toward a lab-on-a-chip.* Annu. Rev. Fluid Mech., 2004. **36**: p. 381-411.

12. Whitesides, G.M., *The origins and the future of microfluidics.* Nature, 2006. **442**(7101): p. 368.

13. Cubaud, T., U. Ulmanella, and C.-M. Ho, *Two-phase flow in microchannels with surface modifications.* Fluid Dynamics Research, 2006. **38**(11): p. 772.

14. Li, R.F., *Study of Foam Mobility Control in Surfactant Enhanced Oil Recovery Processes in One-Dimensional, Heterogeneous Two-Dimensional, and Micro Model Systems*. 2011, Rice University.

15. Conn, C.A., et al., *Visualizing oil displacement with foam in a microfluidic device with permeability contrast.* Lab on a Chip, 2014. **14**(20): p. 3968-3977.

16. Qin, D., Y. Xia, and G.M. Whitesides, *Soft lithography for micro-and nanoscale patterning.* Nature protocols, 2010. **5**(3): p. 491.

17. Berdichevsky, Y., et al., *UV/ozone modification of poly (dimethylsiloxane) microfluidic channels.* Sensors and Actuators B: Chemical, 2004. **97**(2-3): p. 402-408.

18. Bodas, D. and C. Khan-Malek, *Formation of more stable hydrophilic surfaces of PDMS by plasma and chemical treatments.* Microelectronic engineering, 2006. **83**(4-9): p. 1277-1279.

19. Bodas, D. and C. Khan-Malek, *Hydrophilization and hydrophobic recovery of PDMS by oxygen plasma and chemical treatment—An SEM investigation.* Sensors and Actuators B: Chemical, 2007. **123**(1): p. 368-373.

20. Zhou, J., A.V. Ellis, and N.H. Voelcker, *Recent developments in PDMS surface modification for microfluidic devices.* Electrophoresis, 2010. **31**(1): p. 2-16.

21. Koval, E., *A method for predicting the performance of unstable miscible displacement in heterogeneous media.* Society of Petroleum Engineers Journal, 1963. **3**(02): p. 145-154.

22. Patzek, T.W., *Field applications of steam foam for mobility improvement and profile control.* SPE Reservoir Engineering, 1996. **11**(02): p. 79-86.

23. Friedmann, F., W. Chen, and P. Gauglitz, *Experimental and simulation study of high-temperature foam displacement in porous media.* SPE reservoir engineering, 1991. **6**(01): p. 37-45.

24. Gauglitz, P.A., et al., *Foam generation in homogeneous porous media.* Chemical Engineering Science, 2002. **57**(19): p. 4037-4052.

25. Kamal, M. and S. Marsden Jr. *Displacement of a micellar slug foam in unconsolidated porous media*. in *Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*. 1973. Society of Petroleum Engineers.

26. Kovscek, A.R., W.P. Tadeusz, and C.J. Radke, *Mechanistic foam flow simulation in heterogeneous and multidimensional porous media.* SPE Journal, 1997. **2**(04): p. 511-526.

27. Lawson, J.B. and J. Reisberg. *Alternate slugs of gas and dilute surfactant for mobility control during chemical flooding*. in *SPE/DOE enhanced oil recovery symposium*. 1980. Society of

Petroleum Engineers.

28. Boud, D.C. and O.C. Holbrook, *Gas drive oil recovery process*. 1958, Google Patents.

29. Fried, A.N., *Foam-drive process for increasing the recovery of oil*. 1960, Bureau of Mines, San Francisco, Calif.(USA). San Francisco Petroleum Research Lab.

30. Rossen, W.R., *Foams in enhanced oil recovery.* Foams: Theory, Measurements and Applications, 1996. **57**: p. 413-464.

31. Yan, W., *Foam for mobility control in alkaline/surfactant enhanced oil recovery process*. 2006, Rice University.

32. Fanun, M., *Properties of microemulsions with mixed nonionic surfactants and citrus oil.* Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2010. **369**(1-3): p. 246-252.

33. Jamaloei, B.Y., *Insight into the chemistry of surfactant-based enhanced oil recovery processes.* Recent Patents on Chemical Engineering, 2009. **2**(1): p. 1-10.

34. Sheng, J., *Modern chemical enhanced oil recovery: theory and practice*. 2010: Gulf Professional Publishing.

35. Schramm, L.L., *Emulsions, foams, and suspensions: fundamentals and applications*. 2006: John Wiley & Sons.

36. Marsden, S. and S.A. Khan, *The flow of foam through short porous media and apparent viscosity measurements.* Society of Petroleum Engineers Journal, 1966. **6**(01): p. 17-25.

37. Nasr-El-Din, H., *Permeability decline due to flow of dilute suspensions through porous media.* Advances in Chemistry Series, 1996(251).

38. Israelachvili, J.N., *Intermolecular and surface forces*. 2011: Academic press.

39. Rosen, M.J., *Surfactant and Interfacial Phenomena, Chap. 1*. 2004, Wiley.

40. Ransohoff, T. and C. Radke, *Mechanisms of foam generation in glass-bead packs.* SPE reservoir engineering, 1988. **3**(02): p. 573-585.

41. Roof, J., *Snap-off of oil droplets in water-wet pores.* Society of Petroleum Engineers Journal, 1970. **10**(01): p. 85-90.

42. Kovscek, A. and C. Radke, *Fundamentals of foam transport in porous media*. 1993, Lawrence Berkeley Lab., CA (United States).

43. Dicksen, T., G.J. Hirasaki, and C.A. Miller. *Conditions for foam generation in homogeneous porous media*. in *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. 2002. Society of Petroleum Engineers.

44. Li, Q., *Foam generation and propagation in homogeneous and heterogeneous porous media*. 2006.

45. Osterloh, W. and M. Jante Jr. *Effects of gas and liquid velocity on steady-state foam flow at high temperature*. in *SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium*. 1992. Society of Petroleum Engineers.

46. Alverez, J., H. Rivas, and W. Rossen. *A unified model for steady-state foam behavior at high and low foam qualities*. in *IOR 1999-10th European Symposium on Improved Oil Recovery*. 1999.

47. Khatib, Z., G. Hirasaki, and A. Falls, *Effects of capillary pressure on coalescence and phase mobilities in foams flowing through porous media.* SPE reservoir engineering, 1988. **3**(03): p. 919-926.

48. Yaghoobi, H. *Laboratory investigation of parameters affecting CO2-foam mobility in sandstone at reservoir conditions*. in *SPE Eastern Regional Meeting*. 1994. Society of Petroleum Engineers.

49. Chang, S.-H. and R.B. Grigg. *Effects of foam quality and flow rate on co2-foam behavior at reservoir conditions*. in *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. 1998. Society of Petroleum Engineers.

50. Hirasaki, G. and J. Lawson, *Mechanisms of foam flow in porous media: apparent viscosity in smooth capillaries.* Society of Petroleum Engineers Journal, 1985. **25**(02): p. 176-190.

51. Patton, J., S. Holbrook, and W. Hsu, *Rheology of mobility-control foams.* Society of Petroleum Engineers Journal, 1983. **23**(03): p. 456-460.

52. Lee, H., J. Heller, and A. Hoefer, *Change in apparent viscosity of CO2 foam with rock permeability.* SPE reservoir engineering, 1991. **6**(04): p. 421-428.

53. Osei-Bonsu, K., P. Grassia, and N. Shokri, *Investigation of foam flow in a 3D printed porous medium in the presence of oil.* Journal of colloid and interface science, 2017. **490**: p. 850-858.

54. Osei-Bonsu, K., N. Shokri, and P. Grassia, *Fundamental investigation of foam flow in a liquid-filled Hele-Shaw cell.* Journal of colloid and interface science, 2016. **462**: p. 288-296.

55. Ma, K., et al., *Visualization of improved sweep with foam in heterogeneous porous media using microfluidics.* Soft Matter, 2012. **8**(41): p. 10669-10675.

56. Blauer, R., B. Mitchell, and C. Kohlhaas. *Determination of laminar, turbulent, and transitional foam flow losses in pipes*. in *SPE California Regional Meeting*. 1974. Society of Petroleum Engineers.

57. Liu, Y., R. Grigg, and R.K. Svec. *Foam mobility and adsorption in carbonate core*. in *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*. 2006. Society of Petroleum Engineers.

58. Yin, G., R.B. Grigg, and Y. Svec. *Oil recovery and surfactant adsorption during CO2-foam flooding*. in *Offshore Technology Conference*. 2009. Offshore Technology Conference.

59. Bernard, G.G. and W. Jacobs, *Effect of foam on trapped gas saturation and on permeability of porous media to water.* Society of Petroleum Engineers Journal, 1965. **5**(04): p. 295-300.

60. Friedmann, F. and J. Jensen. *Some parameters influencing the formation and propagation of foams in porous media*. in *SPE California Regional Meeting*. 1986. Society of Petroleum Engineers.

61. Apaydin, O.G. and A.R. Kovscek, *Surfactant concentration and end effects on foam flow in porous media.* Transport in porous media, 2001. **43**(3): p. 511-536.

62. Casteel, J. and N. Djabbarah, *Sweep improvement in CO2 flooding by use of foaming agents.* SPE reservoir engineering, 1988. **3**(04): p. 1,186-1,192.

63. Novosad, J., B. Maini, and A. Huang, *Retention of foam-forming surfactants at elevated temperatures.* Journal of Canadian Petroleum Technology, 1986. **25**(03).

64. Grigg, R.B. and A.A. Mikhalin. *Effects of flow conditions and surfactant availability on adsorption*. in *International Symposium on Oilfield Chemistry*. 2007. Society of Petroleum Engineers.

65. Liu, Y., R.B. Grigg, and R.K. Svec. *CO2 foam behavior: influence of temperature, pressure,*

and concentration of surfactant. in *SPE Production Operations Symposium*. 2005. Society of Petroleum Engineers.

66. Chen, Y., et al., *CO2-in-water foam at elevated temperature and salinity stabilized with a nonionic surfactant with a high degree of ethoxylation.* Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015. **54**(16): p. 4252-4263.

67. Khalil, F. and K. Asghari, *Application of CO-foam as a means of reducing carbon dioxide mobility*. Journal of Canadian petroleum technology, 2006. **45**(05).

68. 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. Society of Petroleum Engineers.

69. Turta, A.T. and A.K. Singhal, *Field foam applications in enhanced oil recovery projects: screening and design aspects.* Journal of Canadian Petroleum Technology, 2002. **41**(10).

70. Kuehne, D.L., et al., *Design and evaluation of a nitrogen-foam field trial.* Journal of Petroleum Technology, 1990. **42**(04): p. 504-512.

71. Aarra, M. and A. Skauge, *Status of foam applications in North Sea reservoirs.* paper, 2000. **22**: p. 19-22.

72. Blaker, T., et al. *Foam for gas mobility control in the Snorre field: the FAWAG project*. in *SPE annual technical conference and exhibition*. 1999. Society of Petroleum Engineers.

73. Skauge, A., et al. *Foam-assisted WAG: experience from the Snorre field*. in *SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium*. 2002. Society of Petroleum Engineers.

74. Hou, Q., et al. *Studies on foam flooding EOR technique for daqing reservoirs after polymer flooding*. in *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. 2012. Society of Petroleum Engineers.

75. Li, Z., et al. *Enhance foam flooding pilot test in chengdong of shengli oilfield: laboratory experiment and field performance*. in *International Petroleum Technology Conference*. 2009. International Petroleum Technology Conference.

76. Sheng, J., *Enhanced oil recovery field case studies*. 2013: Gulf Professional Publishing.

77. Farajzadeh, R., et al., *Foam–oil interaction in porous media: implications for foam assisted enhanced oil recovery.* Advances in colloid and interface science, 2012. **183**: p. 1-13.

78. Berg, J.C., *An introduction to interfaces & colloids: the bridge to nanoscience*. 2010: World Scientific.

79. Zeng, Y., et al., *Role of gas type on foam transport in porous media.* Langmuir, 2016. **32**(25): p. 6239-6245.

80. Wei, P., et al., *Research on nitrogen foam for enhancing oil recovery in harsh reservoirs.* Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017. **157**: p. 27-38.

81. Pang, Z., H. Liu, and L. Zhu, *A laboratory study of enhancing heavy oil recovery with steam flooding by adding nitrogen foams.* Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015. **128**: p. 184-193.

82. Zhanxi, P., et al., *Study on nitrogen foam anti-water-coning technology for conventional heavy oil reservoir.* Acta Petrolei Sinica, 2007. **28**(5): p. 99.

83. Bai, Y., et al., *Experimental Investigation of Nanolaponite Stabilized Nitrogen Foam for Enhanced Oil Recovery.* Energy & Fuels, 2018. **32**(3): p. 3163-3175.

84. Ward, C., *NAPL removal surfactants, foams, and microemulsions*. 2016: CRC Press.

85. Adebanjo, F.O. and O. Olusegun, Evaluating *the application of foam injection as an enhanced oil recovery in unconsolidated sand.* Journal of Petroleum and Gas Engineering, 2015. **6**(2): p. 22-37.

۷- پیوست الف

۷-۱- عدم قطعیت

عدم قطعیت یعنی تخمیل احتمالی خطا (از آنجایی که همواره مقدار دقیق خطا را نداریم، خطا را با عدم قطعیت گزارش می‌دهیم). عدم قطعیت نمود کمی کیفیت نتیجه اندازه گیری است. یعنی تا چه حد اندازه گیری، نشان دهنده مقدار واقعی مورد اندازه گیری شده است.

۷-۱-۱- اندازه گیری عدم قطعیت

میانگین حسابی یا متوسط[۱]، نوعی سنجش گرایش به مرکز است و عبارت است از مجموع مقادیر موجود در مجموعه داده‌ها تقسیم بر تعداد آن‌ها. برای محاسبه میانگین حسابی از رابطه (۷-۱) استفاده می‌شود.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad ۱-۷$$

در آمار، انحراف معیار[۲] یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند، در حالیکه انحراف معیار بزرگ، بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است. انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است. محاسبه انحراف معیار از رابطه (۷۷-۲) قابل انجام است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \qquad ۲-۷۷$$

در نهایت اندازه‌گیری عدم قطعیت برای کمیت x_i ، در n بار تکرار آزمایش از معادله () محاسبه می‌شود[۴۹].

$$\sigma_E = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \qquad ۳-۷۷$$

---

[1] Arithmetic mean

[2] Standard deviation

۷-۱-۲- روش فاصله اطمینان

با توجه به معرفی پارامترهای آماری در بخش ۶-۴، فاصله اطمینان و حد بالا و پایین این فاصله، به‌صورت رابطه (۷۷-۴) نمایش داده می‌شود.

$$\mu = \bar{x} \pm (B \times \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) \qquad ۴-۷۷$$

که در آن B ضریب تعمیم است. این پارامتر از جدول[1] () با ستون عمودی (تعداد تکرار آزمایش -۱) و ستون افقی (میزان دقت محاسبات) انتخاب می‌شود.

[1] T table

جدول ۱-۷ جدول تعیین ضریب تعمیم

t Table

cum. prob	$t_{.50}$	$t_{.75}$	$t_{.80}$	$t_{.85}$	$t_{.90}$	$t_{.95}$	$t_{.975}$	$t_{.99}$	$t_{.995}$	$t_{.999}$	$t_{.9995}$
one-tail	**0.50**	**0.25**	**0.20**	**0.15**	**0.10**	**0.05**	**0.025**	**0.01**	**0.005**	**0.001**	**0.0005**
two-tails	**1.00**	**0.50**	**0.40**	**0.30**	**0.20**	**0.10**	**0.05**	**0.02**	**0.01**	**0.002**	**0.001**
df											
1	0.000	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.000	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.000	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.000	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.000	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.000	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.000	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.000	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.000	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.000	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.000	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.000	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.000	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.000	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.000	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.000	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.000	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.000	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.000	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.000	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.000	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.000	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.000	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.000	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.000	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.000	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.000	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.000	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.000	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.000	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.000	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.000	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.000	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.000	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
z	0.000	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	0%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
					Confidence Level						

میانگین حسابی یا متوسط[1]، نوعی سنجش گرایش به مرکز است و عبارت است از مجموع مقادیر موجود در مجموعه داده ها تقسیم بر تعداد آنها. برای محاسبه میانگین حسابی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

که در آن x مقدار داده ها و n تعداد تکرار یک آزمایش است.

در آمار، انحراف معیار[2] یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند؛ در حالی که انحراف معیار بزرگ، بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها است .انحراف معیار برابر با ریشه دوم واریانس است. محاسبه انحراف معیار از رابطه زیر انجام می‌گردد:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

---

[1] Arithmetic Mean

[2] Standard Deviation

Abstract:

Recently, oil can be considered as one of the most important energy resources. Hence, experts and engineers are aimed at exploiting more resources by means of Tech-savvy generations. Foam injection is well known as an efficient method among enhance oil recovery theories. In this research, augmentation oil recovery by foam injection is utterly expressed in micro scale. Micro models are used in porous media due to better perception of direct flow. Microfluidic is defined as Lab-On-Chip that clarifies the knowledge of using and controlling a very little amount of liquid in very small devices. Microfluidic researches are focused on mixture and analysis of liquid flow. Microfluidics is served because of high quality, lacking of need to experimental samples and low cost. In this study, foam is pre-generated by flow-focusing microfluidic device as well as injection of Nitrogen gas at the same time by surfactant solution (SDS and TTAB) and injected into oil-wet and oil-saturated microfluidic device filled by paraffin. The quality of injected foam into the micro model can be changed by flow rate and gas pressure that in this practice, the foam is used by pressure and flow rate 300ml bar and 0.2 ml liter per hour, respectively. Solution of water-salt as a base fluid as well as SDS and TTAB surfactants are used that results indicate the decrease in the surface tension and oil-wet of microfluidc device in the presence of surfactant. Instability is caused by fingering in fluid injection that foam injection improves oil swiping in the micromodel, thus it brings significant enhancement in oil extraction.

Key words: Enhance oil recovery, Microfluidics, Surfactant, Foam injection, Micro model, Flow focusing.

Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Modeling of the Enhanced Oil Recovery by foam injection

By:

Hamid Reza Zanganeh

Supervisor(s):

Dr. Mohsen Nazari

September 2018