

# تعیین بهینه پارامترهای ساخت سیال افرونی با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی و بررسی آزمایشگاهی خواص رئولوژیکی و آسیب سازند آن

احسان خامه‌چی\*، میلاد هاشمی، علی عزیزاده و سید آرمان حسینی

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۱۰/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۷/۲/۲۶

## چکیده

در حال حاضر، با توجه به کاهش دسترسی آسان به مخازن نفت خام، صنایع نفت و گاز بر تولید نفت سنگین و مخازن تخلیه شده تمرکز کرده‌اند. حفاری در مخازن کم فشار همراه با مشکلات فنی و اقتصادی زیادی است که بیشتر مشکلات شامل هرزروی‌های کنترل ناپذیر در شکاف‌ها و آسیب‌های جبران ناپذیر در لایه‌های تولیدی هستند. برای دستیابی به تکنولوژی حفاری مناسب، نوع سیال حفاری نقش بسیار مهمی خواهد داشت، به طوری که نفوذ هرچه بیشتر سیال حفاری در سازند سبب کاهش بهره‌دهی چاه خواهد شد. سیال میکروحبابی فعال سطحی چند لایه یا افرون‌ها در سال‌های اخیر به‌عنوان بخشی از سیالات حفاری پایه آبی و پایه روغنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند و اثر کاهش آسیب سازند، حین استفاده از آنها تا حدودی به اثبات رسیده است. باید توجه داشت که این سیالات به دلیل خاصیت پل‌بندی، برای حفاری مخازن تخلیه شده مناسب هستند. در این پژوهش به منظور تعیین شرایط بهینه پایداری فاکتورهای نوع پلیمر، غلظت پلیمر، غلظت سورفکتانت، pH، شوری، زمان و دور اختلاط با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی با آرایه  $L_{36}$  (دو پارامتر در دو سطح و پنج پارامتر در سه سطح) بهینه‌سازی شدند. سپس تاثیر غلظت پلیمر و سورفکتانت بر خواص رئولوژی بررسی شدند و پس از آن سیال بهینه برای انجام آزمایش‌های آسیب سازند انتخاب گردید و در نهایت تروایی بازگشتی سیال میکروحبابی با سیال پلیمری پایه مقایسه شده است. سیال میکروحبابی با غلظت ۳ lb/bbl زانتان گام و ۱ lb/bbl سورفکتانت SDBS، بیشترین پایداری و باثبات‌ترین خواص رئولوژی را از خود نشان داد. در بررسی فشارها در آزمایش‌های آسیب سازند، سیال میکروحبابی نسبت به سیال پایه پلیمری هم از لحاظ درصد تروایی بازگشتی و هم از لحاظ مسدودکنندگی، عملکرد بهتری داشت.

کلمات کلیدی: سیال میکروحبابی، پایداری سیال افرونی، رئولوژی سیال افرونی، آسیب سازند و روش

## تاگوچی

\*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی khamehchi@aut.ac.ir

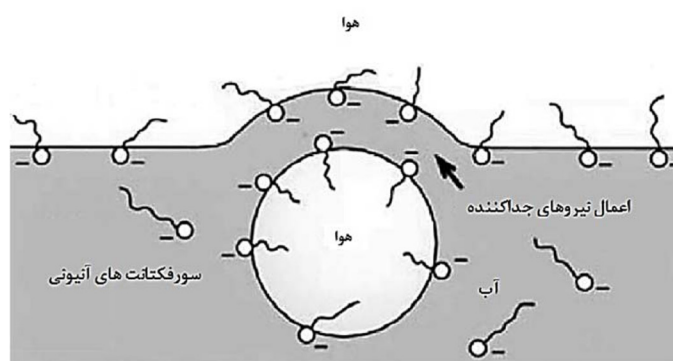
شناسه دیجیتال (DOI: 10.22078/pr.2018.3127.2442)

## مقدمه

حباب‌های ریزی هستند که اندازه آنها بین ۱۰ تا ۱۰۰  $\mu$  است [۳ و ۴].

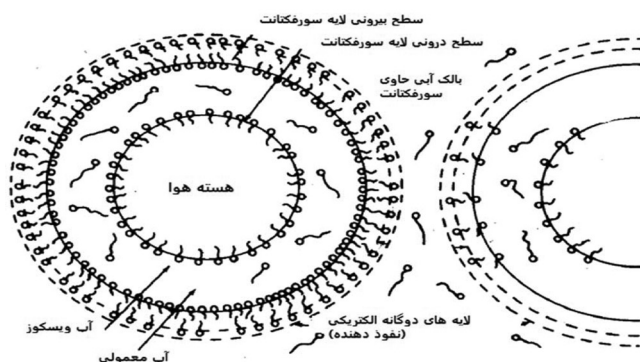
از نظر فیزیکی حباب شکل ۱، یک کره گازی است که توسط یک فیلم صابونی<sup>۵</sup> نازک از محیط پیرامون خود تفکیک شده است. بنابراین فوم می‌تواند به مجموع حباب‌های گاز که در یک ماتریکس آبی پیوسته نگهداری می‌شوند اطلاق شود. همانند فوم، افرون نیز یک هسته کروی دارد که توسط هوا پر شده است. در حالی که بر خلاف حباب‌های هوای رایج که توسط یک لایه سورفکتانت پایدار شده‌اند، قشر یا پوسته خارجی افرون شامل یک غشاء<sup>۶</sup> داخلی و یک غشاء خارجی است. پوسته خارجی یک افرون از سه لایه تشکیل شده است. مانند آنچه در شکل ۲ نشان داده شده است، لایه داخلی از مولکول‌های سورفکتانت تشکیل شده است که هسته تشکیل شده از هوا را پشتیبانی کرده و آن را از لایه گرانبه جدا می‌کند. لایه خارجی که لایه گرانبه را مورد حمایت قرار می‌دهد به سمت خارج آب گریز است و به سمت داخل آب دوست است [۵].

میکرو حباب‌های گازی کلئیدی (سیال میکرو حبابی فعال سطحی چند لایه<sup>۱</sup>) حاوی حباب‌های ریز پخش شده هستند که این سیستم میکرو حباب با سیستم حباب‌های معمولی متفاوت است. این تفاوت نه تنها در خصوص شکل و هندسه آنها بلکه از لحاظ خصوصیات رئولوژی، دوام<sup>۲</sup> و طول عمر و خصوصیات زهکشی<sup>۳</sup> نیز صادق است [۱]. سیستم حباب معمولی ضرورتاً یک سیستم گاز - مایع است که در آن فاز گاز در ساختارهای چندوجهی توسط لایه‌های نازک مایع احاطه می‌شوند. سیستم افرون سطح تماس مایع بیشتری را در اطراف فاز گاز احاطه می‌کند و حباب‌های ریز و تقریباً کروی شکلی را به وجود می‌آورند. حباب‌ها از نظر ترمودینامیکی ناپایدار هستند همچنین هنگامیکه از محیط متخلخل عبور می‌کنند باعث ایجاد یک گرادیان فشاری مشخص می‌شوند [۲]. افرون برای اولین بار توسط سبا معرفی شد و میکرو حباب‌های شبیه حباب با خصوصیات شبه کلئیدی و غیرقابل انعقاد<sup>۴</sup> را برای افرون تعریف کرد. افرون‌ها



شکل ۱ ساختار حباب معمولی [۴]

1. Micro-Bubble Surfactant Multi-layer (MBSML)
2. Longevity
3. Drainage Properties
4. Non-coalescing
5. Soapy Film
6. Shell



شکل ۲ ساختار میکروحباب ارائه شده توسط سبا [۴]

نیمه‌عمر<sup>۶</sup> افرون بود (نیمه عمرافرون مدت زمانی است که طول می‌کشد تا نیمی از مایعی که برای تشکیل افرون مورد استفاده قرار گرفته است زهکشی شود). آنها پی بردند که افزایش غلظت سورفکتانت‌های غیریونی، به واسطه افزایش نیروی چسبندگی داخلی، موجب افزایش نیمه عمر و پایداری میکروحباب می‌شود [۱۲].

ژو و همکاران بیان کردند که اگر غلظت سورفکتانت از غلظت بحرانی مایسل<sup>۷</sup> بیشتر شود حداکثر پایداری رقم خواهد خورد. در اثر تزریق سورفکتانت انرژی لازم جهت تشکیل سطح میان دو فاز کاهش می‌یابد و در نتیجه سیال تشکیل شده دارای پایداری بیشتری می‌شود. به این صورت که اگر سورفکتانت در غلظتی بالاتر از غلظت مسیل بحرانی استفاده شود، علاوه بر پایداری بیشتر، سیستم میکروحباب حاصل شده از نظر اندازه کاملاً یکنواخت بوده ولی اندازه میکروحباب‌ها بسیار کوچک‌تر از حالتی خواهد شد که از غلظت میسل بحرانی فراتر باشد [۱۳]. عربلو از سورفکتانت‌های گیاهی تحت عنوان برگ‌های درختی به اسم زیزیفس اسپینا-کرایستی به دلیل کاهش آلودگی محیطی در تهیه سیال پایه آبی میکروحبابی استفاده کرد و خواص رئولوژیکی و ثبات آن را به‌طور تجربی بررسی نمود [۱۴].

سیالات حفاری میکروحبابی به دلیل داشتن دو مشخصه مهم سبب کاهش نفوذ سیال به داخل سازند و کاهش آسیب سازند می‌گردد. اول اینکه سیال پایه‌ای دارای ویسکوزیته بالا و رقت برشی<sup>۱</sup> پایین است (LSRV<sup>۲</sup> بالا)، بالا بودن ویسکوزیته سیال سبب کاهش نرخ نفوذ سیال به سازند می‌شود. دوم اینکه سیال دارای حباب‌های ریز بسیار پایدار و منعطف است که برای عایق<sup>۳</sup> کردن سازند در برابر هجوم سیال حفاری ضروری هستند و با ایجاد پل داخلی<sup>۴</sup> همانند LCM<sup>۵</sup> عمل می‌کند. با شروع حفاری، میکروحباب‌ها در جبهه سیال حرکت کرده و با تجمع بر دیواره سنگ سبب انسداد حفرات سنگ می‌شوند؛ این حباب‌ها به راحتی در اثر تولید از چاه، برداشته می‌شوند [۵-۱۰].

برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ ودبرن و امیری به مطالعه بر روی خصوصیات افرون از جمله میانگین سایز حباب‌های افرون و نرخ زهکشی در محلول‌های افرونی پرداختند. آنها پی بردند که با گذر زمان، اندازه و شکل میکروحباب‌های افرون تغییر کرده و از حالت کروی به چند وجهی تبدیل شده و اندازه آنها بزرگ‌تر می‌شود [۱۱].

سیو و پانگارکار در مورد پایداری سیالات افرونی، اثر pH، زمان میکس کردن، انتخاب سورفکتانت و ویسکوزیته را روی پایداری افرون مورد مطالعه قرار دادند و آنالیز دقیقی از پایداری میکروحباب به عمل آوردند. ملاک پایداری در مطالعه آنها

1. Shear Thinning

2. Loe-shear-rate-viscosity

3. Seal

4. Inreal Bridge

5. Lost Circulating Materials

6. Half Life

7. Critical Micelle Concentration

توازن و مدل‌سازی ریاضی حرکت افرون کلونیدی گازی در محیط متخلخل، به این نتیجه دست یافتند که حضور میکروحباب‌ها، تهاجم سیال به محیط متخلخل را کنترل می‌کند [۱۸-۲۲].

پایداری با زمان از مهم‌ترین ویژگی‌های سیالات حفاری افرونی محسوب می‌شود که می‌تواند بر خواص مطلوب رئولوژیکی و کنترل هرزروی در این نوع سیالات تأثیر گذار باشد. در این پژوهش در ابتدا چون تعداد پارامترهای مورد بررسی بر ثبات سیال افرون زیاد هستند، از طراحی آزمایش به روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی تب<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. بعد از انجام آزمایش‌ها تأثیر پارامترهای مختلف از جمله، شوری سیال پایه، غلظت پلیمر، نوع پلیمر، غلظت سورفکتانت، مدت زمان همزدن، سرعت همزدن و pH بر پایداری سیال افرونی تولید شده بررسی می‌شود. در مرحله بعد با ثابت نگه داشتن تمامی فاکتورها در حالت بهینه به بررسی تأثیر غلظت پلیمر و سورفکتانت بر خواص رئولوژی پرداخته شد و در آخر آسیب سازند و تراوایی بازگشتی آن نسبت به سیال پایه پلیمری مقایسه می‌شود. هدف از انجام آزمایش‌های آسیب سازند بررسی قابلیت انسداد سیال افرونی در محیط متخلخل و بررسی تراوایی بازگشتی است.

### مراحل انجام کار

آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. آزمایشات دسته اول برای بررسی ثبات سیال تولید شده و دسته دوم به منظور بررسی خواص رئولوژیکی و آسیب سازند طراحی شدند.

### روش طراحی آزمایش تاگوچی

برای به‌دست آوردن شرایط بهینه پایداری سیال افرونی از طراحی آزمایش به روش تاگوچی با آرایه

امیری و صادقی پایداری افرون‌های کلونیدی گازی در حضور نانو ذرات مورد بررسی دادند. آنها به این نتیجه رسیدند که نانو ذرات مونت موریلونیت بر پایداری افرون‌های کلونیدی گازی تأثیر می‌گذارند و همچنین نانو ذرات باعث کاهش غلظت بحرانی مایسل در یک محلول سورفکتانت می‌شود [۱۵].

شی و همکاران به مطالعه آزمایشگاهی اثرات غلظت سورفکتانت، غلظت پلیمر، دما و شوری بر اندازه حباب گاز افرون کلونیدی پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش رشد حباب با افزایش غلظت سورفکتانت، غلظت پلیمر و کاهش دمای کاهش می‌یابد، در حالی که با کاهش شوری، کاهش پیدا می‌کند و سپس افزایش می‌یابد [۱۶].

شادی‌زاده و همکاران با مطالعه آزمایشگاهی اثر غلظت دو سورفکتانت طبیعی جدید یعنی ریشه گیاه اشنان و برگ گیاه حنا بر پایداری میکروحباب افرونی را بررسی نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان دهنده اثر مطلوب سورفکتانت زیستی طبیعی بر قابلیت پخش میکروحباب همانند سایر سورفکتانت‌های تجاری است. همچنین این سورفکتانت‌ها به دلیل اثر مثبتی که بر پایداری میکروحباب و عدم اثرات زیان‌بار بر محیط زیست دارند گزینه مناسبی برای استفاده در صنعت حفاری هستند [۱۷].

خامه چی و همکاران، رفتار رئولوژیکی سیال افرونی را به صورت آزمایشگاهی و تحلیل داده‌ها مورد بررسی قرار دادند. ویسکوزیته سیال در دماهای مختلف ثبت گردید و با مدل‌های توانی، بینگهام پلاستیک و هرشل-بالکی مطابقت داده شد که مدل هرشل-بالکی دارای بیشترین دقت بود. همچنین به این نتیجه دست یافتند که چون ویسکوزیته سیال افرونی در نرخ برش پایین، خیلی زیاد است پس در آزمایش پایداری زهکشی استاتیک به دلیل اینکه سرعت رشد حباب‌ها کم است، سیال از پایداری بالایی برخوردار است. همچنین در سال ۲۰۱۷ بیان داشتند با استفاده از کوپل معادله حرکت با معادله

سورفکتانت به آن اضافه شود.

به منظور بررسی پایداری افرون از آزمایش زهکشی استاتیک<sup>۱</sup> استفاده شد. با خروج سیال ویسکوز از ساختار افرون، نرخ افزایش حجم اندازه حباب با گذر زمان بیشتر خواهد شد و لذا ناپایداری رقم خواهد خورد. در این آزمایش cc ۱۰۰ از نمونه آماده شده را درون استوانه مدرج ریخته و زمان تخلیه ۰/۱ از حجم کل (cc ۱۰) ثبت می‌شود.

پس از انجام آزمایش‌ها، داده‌های اندازه‌گیری شده پایداری وارد نرم‌افزار شدند و با توجه به نمودار سیگنال به نویز خروجی گرفته شده، شرایط بهینه پارامترهای مورد بررسی تعیین شد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در شکل ۳ مقادیر بهینه فاکتورها انتخاب می‌شود. به عنوان مثال در بررسی نوع پلیمر از سه پلیمر زانتان گام، صمغ طبیعی<sup>۲</sup> و Pac-R استفاده شده، پلیمر زانتان گام بهترین عملکرد را داشت. سرعت چرخش میکسر تاثیر بسیار کمی بر پایداری نهایی سیال داشت چون که افزایش دور تاثیری بر تعداد حباب‌های تولید شده ندارد و مقدار ۱۰۰۰۰ rpm برای بررسی خواص رئولوژی و آسیب سازند سیال افرونی انتخاب شد.

L<sub>36</sub> (دو پارامتر در دو سطح و پنج پارامتر در سه سطح) استفاده گردید. در این طراحی فاکتورها و تداخل‌های آنها در یک فرآیند به‌طور همزمان مورد مطالعه قرار می‌گیرند و اثر متغیرهای غیرقابل شناسایی بر فرآیند شناسایی می‌شوند و همچنین تعداد آزمایشات کاهش می‌یابند. مقادیر مختلف و فاکتورهای موردنظر برای تعیین بهینه فاکتورها و همچنین آرایش ارتوگنال طراحی آزمایش در جدول ۱ و ۲ آورده شده‌اند.

### تهیه سیال حفاری

به منظور تهیه سیستم میکرو حباب افرون ابتدا cc ۳۵۰ آب شیرین (معادل با یک بشکه در مقیاس آزمایشگاهی) را در لیوان مخصوص میکسر Hamilton Beach ریخته، سپس مقداری محلول ۱۰٪ کاستیک سودا جهت بالا بردن pH به آن اضافه کرده و میکس می‌شود. سپس پلیمر را به آرامی به آن اضافه کرده تا هیدراسیون آن به خوبی انجام شود. از آنجایی که اضافه کردن پلیمر به آب منجر به افزایش ویسکوزیته می‌شود، لذا بعد از ۲۰ min دمای سیال بالا می‌رود. بعد از تمام شدن زمان میکس کردن، لیوان را از میکسر جدا کرده تا دمای آن به دمای محیط برسد. بعد از سرد شدن نمونه می‌بایست

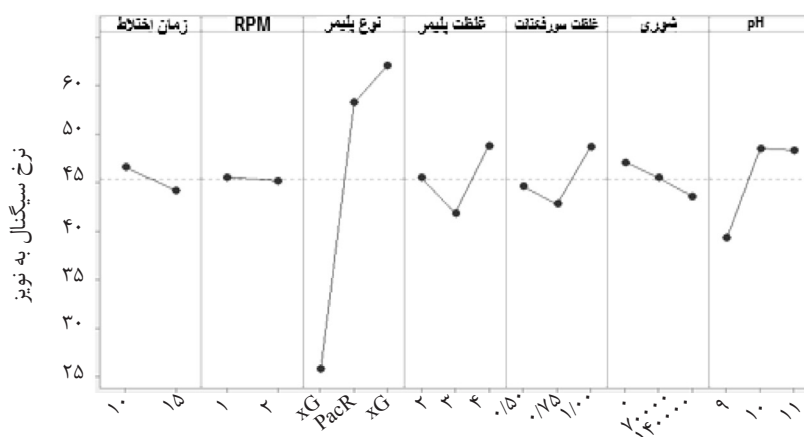
جدول ۱ سطوح انجام آزمایش‌ها جهت تعیین پایداری

سطح			پارامترها
-	۲۰	۱۵	زمان اختلاط (min)
-	۱۴۰۰۰	۱۰۰۰۰	RPM (دور در دقیقه)
NG <sup>۵</sup>	PacR <sup>۴</sup>	XG <sup>۳</sup>	نوع پلیمر
۴	۳	۲	غلظت پلیمر (lb/bbl)
۱	۰/۷۵	۰/۵	غلظت سورفکتانت (lb/bbl)
اشباع	نیمه اشباع	بدون نمک	شوری
۱۱	۱۰	۹	pH

1. Drainage Static Test
2. Natural Gum
3. Xanthan Gum
4. Polyanionic Cellulose Regular Viscosity
5. Natural Gum

جدول ۲ آزمایشات طراحی شده جهت تعیین پایداری سیال افرونی با روش تاگوچی

شماره آزمایش	زمان اختلاط (min)	RPM	نوع پلیمر	غلظت پلیمر (lb/bbl)	غلظت سورفکتانت (lb/bbl)	شوری سیال پایه	pH
۱	۱۵	۱۰۰۰۰	XG	۲	۰/۵	بدون نمک	۹
۲	۱۵	۱۰۰۰۰	NG	۳	۰/۷۵	نیمه اشباع	۱۰
۳	۱۵	۱۰۰۰۰	PacR	۴	۱	اشباع	۱۱
۴	۱۵	۱۰۰۰۰	XG	۲	۰/۵	بدون نمک	۱۰
۵	۱۵	۱۰۰۰۰	NG	۳	۰/۷۵	نیمه اشباع	۱۱
۶	۱۵	۱۰۰۰۰	PacR	۴	۱	اشباع	۹
۷	۱۵	۱۰۰۰۰	XG	۲	۰/۷۵	اشباع	۹
۸	۱۵	۱۰۰۰۰	NG	۳	۱	بدون نمک	۱۰
۹	۱۵	۱۰۰۰۰	PacR	۴	۰/۵	نیمه اشباع	۱۱
۱۰	۱۵	۱۴۰۰۰	XG	۲	۱	اشباع	۹
۱۱	۱۵	۱۴۰۰۰	NG	۳	۰/۵	اشباع	۱۰
۱۲	۱۵	۱۴۰۰۰	PacR	۴	۰/۷۵	بدون نمک	۱۱
۱۳	۱۵	۱۴۰۰۰	XG	۳	۱	بدون نمک	۱۱
۱۴	۱۵	۱۴۰۰۰	NG	۴	۰/۵	نیمه اشباع	۹
۱۵	۱۵	۱۴۰۰۰	PacR	۲	۰/۷۵	اشباع	۱۰
۱۶	۱۵	۱۴۰۰۰	XG	۳	۱	نیمه اشباع	۹
۱۷	۱۵	۱۴۰۰۰	NG	۴	۰/۵	اشباع	۱۰
۱۸	۱۵	۱۴۰۰۰	PacR	۲	۰/۷۵	بدون نمک	۱۱
۱۹	۲۰	۱۰۰۰۰	XG	۳	۰/۵	اشباع	۱۱
۲۰	۲۰	۱۰۰۰۰	NG	۴	۰/۷۵	بدون نمک	۹
۲۱	۲۰	۱۰۰۰۰	PacR	۲	۱	نیمه اشباع	۱۰
۲۲	۲۰	۱۰۰۰۰	XG	۳	۰/۷۵	اشباع	۱۱
۲۳	۲۰	۱۰۰۰۰	NG	۴	۱	بدون نمک	۹
۲۴	۲۰	۱۰۰۰۰	PacR	۲	۰/۵	نیمه اشباع	۱۰
۲۵	۲۰	۱۰۰۰۰	XG	۴	۰/۷۵	بدون نمک	۱۰
۲۶	۲۰	۱۰۰۰۰	NG	۲	۱	نیمه اشباع	۱۱
۲۷	۲۰	۱۰۰۰۰	PacR	۳	۰/۵	اشباع	۹
۲۸	۲۰	۱۴۰۰۰	XG	۴	۰/۷۵	نیمه اشباع	۱۰
۲۹	۲۰	۱۴۰۰۰	NG	۲	۱	اشباع	۱۱
۳۰	۲۰	۱۴۰۰۰	PacR	۳	۰/۵	بدون نمک	۹
۳۱	۲۰	۱۴۰۰۰	XG	۴	۱	اشباع	۱۰
۳۲	۲۰	۱۴۰۰۰	NG	۲	۰/۵	بدون نمک	۱۱
۳۳	۲۰	۱۴۰۰۰	PacR	۳	۰/۷۵	نیمه اشباع	۹
۳۴	۲۰	۱۴۰۰۰	XG	۴	۰/۵	اشباع	۱۱
۳۵	۲۰	۱۴۰۰۰	NG	۲	۰/۷۵	اشباع	۹
۳۶	۲۰	۱۴۰۰۰	PacR	۳	۱	بدون نمک	۱۰



شکل ۳ نمودار تاثیر سطوح مختلف فاکتورهای ساخت سیال بر پایداری

سیال را بالا می‌برد که عملاً پمپاژ سیال با مشکل مواجه می‌شود. و برای غلظت سورفکتانت چون که رفتار متفاوتی نشان داده است، برای انتخاب مقدار بهینه آن برای آزمایش‌های آسیب سازند از خواص رئولوژی سیال افرونی استفاده می‌شود. دلیل این رفتار تاثیر متقابل پارامترهای دیگر بر غلظت پلیمر است.

#### بررسی خصوصیات رئولوژیکی سیال

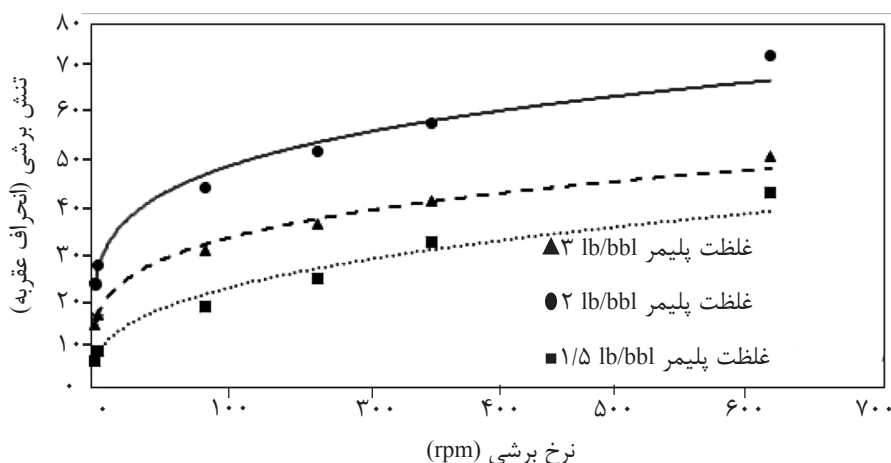
با استفاده از ویسکومتر Fann 35SA با سرعت‌های چرخشی مختلف خواص رئولوژی سیال افرونی از جمله ویسکوزیته پلاستیکی، ویسکوزیته ظاهری و نقطه واروی اندازه گیری شدند. رفتار سیالات با استفاده از رابطه تنش برشی و نرخ برش مشخص می‌شود.

#### تاثیر پلیمر و سورفکتانت بر خواص رئولوژی

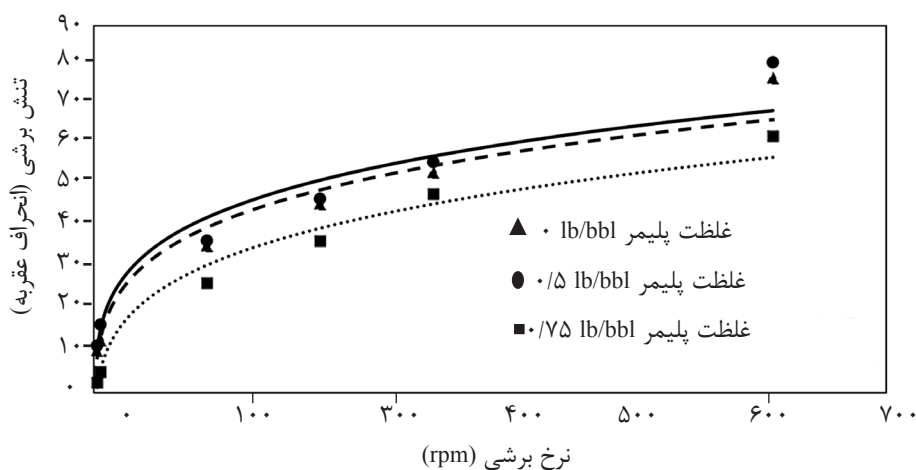
برای بررسی رئولوژی سیال افرونی از نمودار میزان انحراف ویسکومتر در نرخ‌های برشی مختلف در زیر آورده شده است.

با توجه به شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت پلیمر و یا سورفکتانت موجب افزایش تنش برشی (انحراف عقربه نشانگر ویسکومتر) در یک نرخ برش خاص می‌شود. که این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش تعداد حباب‌ها و یا افزایش احتمالی لایه سورفکتانتی و ویسکوز احاطه کننده حباب‌ها باشد. به‌طورکل تاثیر پلیمر بر خواص رئولوژی سیال خیلی محسوس‌تر از غلظت سورفکتانت است.

مدت زمان اختلاط بر پایداری نتیجه منفی داشت (به میزان خیلی کم) و پایداری سیال با افزایش زمان میکس شدن، کاهش یافت پس مقدار ۱۰ min در مراحل بعد استفاده شد. شوری سیال هم تاثیر منفی بر پایداری داشت. با افزودن نمک به سیال افرونی و ایجاد ناخالصی‌های یونی کشش سطحی افزایش می‌یابد. کشش سطحی در واقع نتیجه نیروهای واندروالسی میان مولکولی است و هر چه این نیروها قوی‌تر باشند، کشش سطحی نیز بیشتر می‌شود. افزایش ذره‌ای قطبی و یونی مانند سدیم کلرید به آب سبب می‌شود که جاذبه میان ذرات بیشتر شود، زیرا جاذبه میان ذرات یونی و مولکول‌های آب حاوی سورفکتانت، قویتر از جاذبه میان مولکول‌های آب به تنهایی است، بنابراین کشش سطحی در این محلول‌ها بیشتر از کشش سطحی محلول سورفکتانت و آب خالص است. هر چه کشش سطحی سیال بیشتر باشد تشکیل حباب‌های افرونی کاهش می‌یابد. و در نهایت مقدار pH تاثیر مهمی بر پایداری سیال داشت که مقدار pH برابر ۹ کمترین میزان پایداری و pH برابر ۱۰ و ۱۱ بیشترین پایداری را داشتند. با کاهش pH و اسیدی شدن محیط و واکنش یون هیدروژن با سورفکتانت‌ها، از قدرت سورفکتانت در حفظ هسته گازی و پایداری سیال افرونی کاسته می‌شود. برای غلظت پلیمر نیز باید توجه داشت که افزایش غلظت پلیمر زانتان به بیش از ۳ lb/bbl آنقدر ویسکوزیته



شکل ۴ تاثیر غلظت پلیمر زانتان گام بر رئولوژی برای سیال پایه میکروحباب در غلظت سورفکتانت ۱ lb/bbl



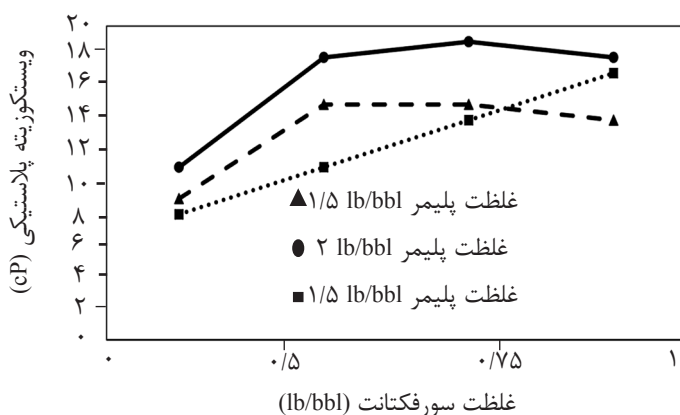
شکل ۵ تاثیر غلظت سورفکتانت بر رئولوژی برای سیال پایه میکروحباب در غلظت پلیمر ۳ lb/bbl

فعالیت می‌کند که این امر موجب پایداری سیال و میکروحباب‌های سیال افرونی می‌شود. افزایش پایداری حباب‌ها منجر به افزایش برهم‌کنش نیروهای الکتروشمیایی بین حباب‌ها می‌شود. این امر موجب افزایش نقطه واروی می‌شود که خود ناشی از برهم‌کنش‌های الکتروشمیایی در سیالات حفاری است. در غلظت‌های ۱/۵ و ۲ lb/bbl از پلیمر زانتان گام این رفتار سیال افرونی به خوبی قابل مشاهده است اما در غلظت ۳ lb/bbl از پلیمر به دلیل افزایش بیش از حد ویسکوزیته سیال پایه، غلظت سورفکتانت آنچنان نقشی در افزایش نقطه واروی ایفا نکرده است و یک روند افزایشی ناچیز داشته است.

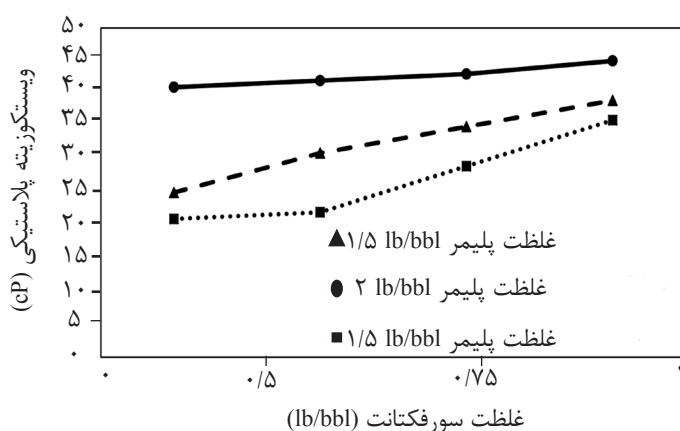
همچنین نمودار تغییرات ویسکوزیته پلاستیکی و نقطه واروی در حضور غلظت‌های مختلف سورفکتانت و پلیمر در شکل ۶ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۶ هم مشخص است با افزایش غلظت پلیمر در غلظت ثابت سورفکتانت ویسکوزیته سیال افزایش می‌یابد اما افزایش غلظت سورفکتانت از مقدار ۰/۵ تا ۱ lb/bbl تاثیر چندانی بر ویسکوزیته ندارد و در کل ثابت می‌ماند. با توجه به شکل ۷ با افزایش غلظت سورفکتانت، نقطه واروی سیال افرونی افزایش یافته است. افزایش غلظت سورفکتانت بدین معناست که سورفکتانت‌های بیشتری در سیستم سیال جهت پایداری نیروهای کشش سطحی اطراف حباب





شکل ۶ تغییرات ویسکوزیته پلاستیکی سیال افرونی در حضور غلظت‌های مختلف سورفکتانت و پلیمر زانتان گام



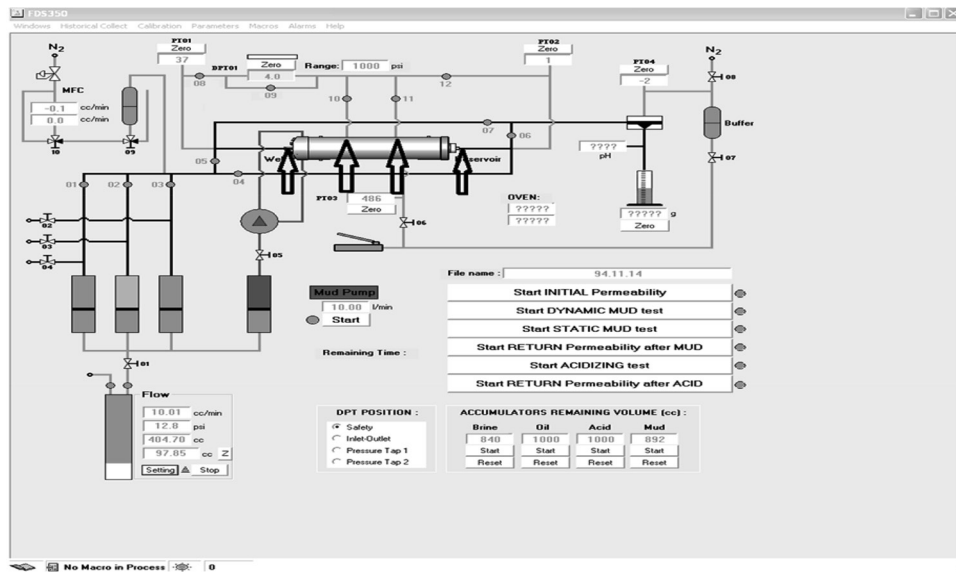
شکل ۷ تغییرات نقطه واروی با تغییر غلظت پلیمر زانتان گام و سورفکتانت

سیال پایه پلیمری آن‌ها در جدول ۳، در دو حالت دینامیک و استاتیک انجام شده است. تمامی سیالات تهیه شده در این مرحله بدون شوری و مقدار pH برابر با ۱۱ و همچنین به مدت ۱۰ min با ۱۰۰۰۰ rpm تهیه شده است.

سیالات نفوذکننده، مشابه با حالت واقعی درون چاه به صورت تماس با سطح نمونه در جریان بوده و محفظه نگه‌دارنده نمونه به گونه‌ای طراحی شده که هرزروی گل را نیز مشابه‌سازی می‌نماید. انجام آزمایش نفوذ دینامیک گل حفاری با نرخ چرخش گل ۵ L/min که با بهره‌گیری از تجهیزات جانبی و پمپ مخصوص امکان‌پذیر است، انجام شده است. آزمایش فیلتراسیون استاتیک گل حفاری نیز با اعمال فشار فراتعادلی موردنظر انجام شده است.

### بررسی آزمایشگاهی آسیب سازند

به منظور بررسی نفوذ سیال میکروحبابی در محیط متخلخل، از پنج مغزه کربناته (گرفته شده از سنگ یکسان) در دستگاه FDS350 استفاده شد. با توجه به اینکه نفوذ سیال در محیط متخلخل در دستگاه مورد استفاده قابل مشاهده نیست لذا جهت برآورد مقدار نفوذ در مغزه از تپ‌های فشاری که در طول مغزه تعبیه شده‌اند استفاده می‌شود. دستگاه دارای ۲ تپ فشاری در ابتدا و انتها و دو تپ روی مغزه است. محل این تپ‌های فشاری در شکل ۸ نشان داده شده است. در فرآیند نفوذ سیال میکروحبابی با بررسی تغییرات فشار نمایشی هر یک از تپ‌های فشاری عمق نفوذ نسبت به زمان برآورد می‌شود. آزمایشات نفوذ در اختلاف فشاری حدود ۲۵۰ تا ۳۰۰ psi بین ابتدا و انتهای مغزه با استفاده از سه ترکیب سیال افرونی طراحی شده و دو ترکیب از



شکل ۸ محل تپ‌های فشاری دستگاه آسیب سازند FDS350

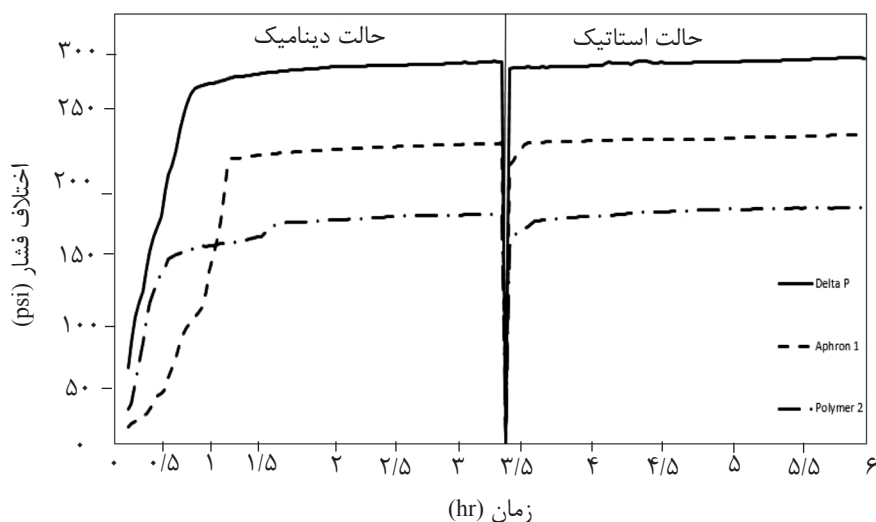
جدول ۳ خواص سیالات طراحی شده

pH	استحکام ژله ۱۰ S/10min	نقطه واروی (lb/100ft <sup>2</sup> )	ویسکوزیته پلاستیکی (cP)	غلظت سورفکتانت lb/bbl	غلظت پلیمر lb/bbl	شماره آزمایش
۱۱	۱۰ / ۹	۳۱	۱۴	۰/۵	۲	۱
۱۱	۹ / ۸	۲۵	۹	۰	۲	۲
۱۱	۱۷ / ۱۶	۴۰	۱۸	۱	۳	۳
۱۱	۱۳ / ۱۳	۴۲	۱۸	۰/۵	۳	۴
۱۱	۱۲ / ۱۱	۴۰	۱۱	۰	۳	۵

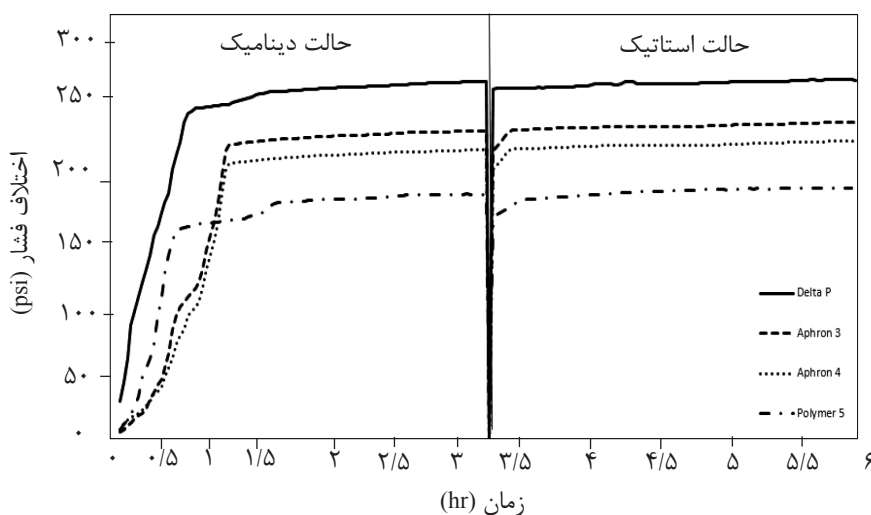
Aphron ۱ و Polymer ۲ مشخص شده، متفاوت است، به این صورت که برای سیال افرونی این افزایش اختلاف فشار دیرتر اتفاق افتاده است. که در نتیجه مسدودکنندگی حباب‌های افرون ایجاد شده است. در واقع با نفوذ سیال حفاری به داخل مغزه فشار دوسر مغزه افت پیدا می‌کند که پمپ تزریق گل با دبی‌های متغیر و با توجه به مقدار نفوذ، سعی در ثابت نگه داشتن مقدار اختلاف فشار دوسر مغزه را دارد. برای سیال افرونی بعد از گذشت ۴۵ min با ثابت شدن اختلاف فشار ( $\Delta P_1$ ) در مقدار ۲۱۵ psi می‌توان گفت که کل مغزه از افرون آغشته شده است، در حالی که برای سیال پایه پلیمری پس از گذشت ۳۰ min در مقدار ( $\Delta P_1$ ) برابر ۱۵۰ psi مغزه با سیال پلیمری آغشته شده است.

اختلاف فشار دوسر مغزه ( $\Delta P$ ) و اختلاف فشار چاه و تپ فشاری دوم (PT02) به عنوان  $\Delta P_1$  (که در شکل‌های ۹ و ۱۰ با شماره آزمایش مشخص شده است) بر حسب زمان برای هر تست در حالت دینامیک و استاتیک در زیر آورده شده است.

مدت زمان شبیه‌سازی حالت دینامیک و استاتیک هر کدام به مدت ۳ hr در نظر گرفته شده است. نوسان شدید بین حالت دینامیک و استاتیک در نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰ به دلیل توقف پمپ تزریق سیال حفاری ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل ۹ و ۱۰ دیده می‌شود در آغاز تست دینامیک، افزایش اختلاف فشار ابتدای مغزه و تپ فشار وسط مغزه ( $\Delta P_1$ ) برای دو حالت سیال افرونی و پلیمری که در شکل به ترتیب با عبارات



شکل ۹ نمودار اختلاف فشار بر حسب زمان برای آزمایش‌های اول و دوم



شکل ۱۰ نمودار اختلاف فشار بر حسب زمان برای آزمایش‌های سوم، چهارم و پنجم

سیال حفاری آورده شده است. با توجه به جدول ۲ با افزایش غلظت پلیمر، تراوایی بازگشتی مغزه کاهش یافته است. به این دلیل که مقدار پلیمر بیشتری درون مغزه نفوذ می‌کند و منجر به آسیب بیشتری می‌شود. هم‌چنین درصد بازیابی تراوایی سیال افرونی به طور میانگین حدود ۸۰٪ و برای سیال پلیمری حدود ۵۰٪ است که نشان می‌دهد با استفاده از سورفکتانت و ایجاد میکروحباب‌ها می‌توان تراوایی بازگشتی را به مقدار قابل قبولی افزایش داد.

این رفتار نشان‌دهنده عملکرد بهتر افرون در انسداد است. در کل تجزیه و تحلیل فشار در امتداد مغزه در طی آزمایش‌ها مقاومت بیشتری به جریان سیال افرونی در محیط متخلخل با تزریق بیشتر افرون نشان داد یا استدلالی مشابه در شکل ۱۰ نیز می‌توان گفت سیال افرونی نسبت به سیال پایه پلیمری (با غلظت پلیمرهای یکسان) از بازدارندگی بهتری برخوردار است.

#### تخمین درصد بازیابی تراوایی

در جدول ۴ مقادیر تراوایی بازگشتی و درصد بازیابی

جدول ۴ نتایج تراوایی بازگشتی

شماره آزمایش	غلظت پلیمر (lb/bbl)	غلظت سورفکتانت (lb/bbl)	تراوایی اولیه	تراوایی بازگشتی	درصد بازیابی تراوایی
۱	۲	۱	۷/۹۵	۷/۱۵	۹۰
۲	۲	۰	۸/۹۸	۴/۶۲	۵۱/۵
۳	۳	۱	۳۱/۳۲	۲۳/۰۴	۷۳/۶
۴	۳	۰/۵	۱۰/۰۶	۷/۰۳	۷۰
۵	۳	۰	۴/۹۵	۲/۴۶	۴۹/۷

### نتیجه گیری

در ورود هوا به سیستم بوده و با افزایش غلظت پلیمر که منجر به افزایش ویسکوزیته می شود، ممانعت بیشتری از ورود هوا به سیستم به عمل آورده و سیستم میکرو حباب کمتری به وجود خواهد آورد.

• درصد بازیابی تراوایی سیال افرونی به طور میانگین حدود ۸۰٪ و برای سیال پلیمری حدود ۵۰٪ است که نشان می دهد با استفاده از سورفکتانت و ایجاد میکرو حباب ها می توان تراوایی بازگشتی را به مقدار قابل قبولی افزایش داد.

• افزایش غلظت پلیمر خاصیت بازدارندگی بیشتری ایجاد می کند اما تراوایی بازگشتی را نیز کاهش می دهد.

نتایج آزمایش های انجام شده بر روی سیالات حفاری میکرو حبابی گازی در این مطالعه به شرح زیر است. سرعت چرخش میکسر و مدت زمان اختلاط تاثیر بسیار کمی بر پایداری سیال داشت. شوری سیال تاثیر منفی بر پایداری داشت و در نهایت مقدار pH تاثیر مهمی بر پایداری سیال داشت و مقدار pH=۹ کمترین میزان پایداری را می دهد و pH برابر ۱۰ و ۱۱ بیشترین پایداری را دارد. • غلظت پلیمر ویسکوز کننده مهم ترین عامل در کنترل نفوذ و آسیب سازند سیالات افرونی است. • با افزایش غلظت پلیمر، از میزان واروی به دست آمده در سیستم میکرو حباب افرون کاسته می شود. یعنی افزایش غلظت پلیمر یک عامل کنترل کننده

### مراجع

- [1]. Spinelli L. S., Neto G. R., Freire L. F. A., Monteiro V., Lomba R., Michel R. and Lucas E. "Synthetic based aphrons: correlation between properties and filtrate reduction performance," Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, Vol. 353, pp. 57-63, 2010.
- [2]. Oliveira R. C. G., Oliveira J. F. and Moudgil B.M., "Optimizing micro-foam rheology for soil remediation," Progr. Colloid Polym. Sci., Vol. 128, pp. 298-302, 2004.
- [3]. Sebba F., "An improved generator for micron-sized bubbles," Chem. Ind. Vol. 3, pp. 91-92, 1985.
- [4]. Sebba F. "Foams and biliquid foams – aphrons," John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1987.
- [5]. Belkin A., Irving M., O'Connor R., Fosdick M., Hoff T. and Growcock F. B., "How aphron drilling fluids work," SPE Paper 96145, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA, 9-12 October, 2005.
- [6]. Growcock, Frederick B., Belkin A., Fosdick M., Irving M. and Brookey T., "Recent advances in aphron drilling fluid technology," SPE Drilling & Completion 02/22, Vol. 22, Issue 02, pp. 74-80, June 2007.
- [7]. Brookey T., Rea A. and Roe T., "UBD and beyond: aphron drilling fluids for depleted zones," Presented at IADC

World Drilling Conference, Vienna, Austria, Jun. 25-26, 2003.

- [8]. Growcock F. B., Simon G. A., Rea A. B., Leonard R. S., Noello E. and Castellan R., "Alternative aphron-based drilling fluid," IADC/SPE 87134, Presented at the 2004 IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Mar. 2-4, 2004.
- [9]. Brookey T., "Micro-bubbles, new aphron drill-in fluid technique reduces formation damage in horizontal wells," SPE 39589, Presented at the SPE International Symposium on Formation Damage Control, February 18 – 19, 1998.
- [10]. Growcock F. B., Belkin A. and Irving M., O'Connor R., Fosdick M. and Hoff T., "How aphron drilling fluids work," SPE 96145, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, October 9-12, 2005
- [11]. Amiri M. C. and Woodburn E. T., "A method for the characterization of colloidal gas Aphron dispersions," Trans IChemE, 68, Part A, pp. 154-160, March. 1990.
- [12]. Save S. V. and Pangarkar V. G., "Characterization of colloidal gas aphrons," Chemical Engineering Communications, Vol. 127, pp. 35-54, 1993.
- [13]. Xu Q., Nakajima M., Ichikawa S., Nakamura N., Roy P., Okadome H. and Shiina T., "Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization," Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 332, pp. 208–214, 2009.
- [14]. Arabloo Nareh'ei M. Pordel Shahri M. and Zamani M., "Preparation and characterization of colloidal gas aphron based drilling fluids using a plant-based surfactant," SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition held in Al-Khobar, Saudi Arabia, 8–11 April 2012.
- [15]. Amiri M. H. Sadeghialiabadi C., "Evaluating the stability of colloidal gas aphrons in the presence of montmorillonite nanoparticles," Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects 457, pp. 212–219, 2014.
- [16]. Shi S., Wang Y., Li Z. and Zhao Ch., "Laboratory investigation of the factors impact on bubble size, pore blocking and enhanced oil recovery with aqueous colloidal gas aphron," J. Petrol. Explor. Prod. Technol., DOI 1007/10/s13202-015-0193-7, 2015
- [17]. Ahmadi M. A., Galedarzadeh M. and Shadizadeh S. R., "Colloidal gas aphron drilling fluid properties generated by natural surfactants: Experimental investigation," Journal of Natural Gas Science and Engineering Vol. 27, pp. 1109-1117, 2015.
- [18]. Alizadeh A. and Khamehchi E., "Modeling of micro-bubble surfactant multi-layer drilling fluid stability based on single bubble behavior under pressure and temperature in a deviated gas well," Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 26, pp. 42-50, 2015.
- [19]. Alizadeh A. and Khamehchi E., "A model for predicting size distribution and liquid drainage from micro-bubble surfactant multi-layer fluids using population balance," Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015.
- [20]. Alizadeh A. and Khamehchi E., "Numerical and experimental investigation of micro-bubble fluid infiltration in porous media," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017.
- [21]. Alizadeh A. and Khamehchi E., "Mathematical modelling of the colloidal gas aphron motion through porous medium, including colloidal bubble generation and destruction," Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [22]. Khamechi E., Tabibzadeh Sh. and Alizadeh A., "Rheological properties of Aphron based drilling fluids," Petrol. Explor. Develop. Vol. 43, Issue 6, pp. 1076-1081, Dec. 2016.