

# امکان‌سنجی استفاده از ذرات میکرو حباب‌های پایدار با خواص رئولوژی کنترل شده در حفاری مخازن کم فشار

عزت‌اله کاظم‌زاده\*، محمد سلیمانی و جلال جمالی

پژوهشکده مهندسی نفت، پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۵/۱۷

## چکیده

حفاری مخازن کم فشار، با مشکلات فنی و اقتصادی زیادی همراه است، به‌گونه‌ای که توسعه این میداين را غیراقتصادی می‌نماید. یکی از عمده مشکلات حفاری این چاه‌ها، هرزروی‌های کنترل‌ناپذیر در شکاف‌ها می‌باشد. امروزه در تکنولوژی‌های نوین حفاری از میکرو حباب‌های پایدار با قطر بین ۱۰ تا ۱۰۰  $\mu\text{m}$  به‌همراه پلیمر جهت رفع این مشکل استفاده می‌گردد. خصوصیات منحصر به فرد سیال پایه آبی شامل میکرو حباب، یک اتصال درونی الاستیک، سفت و غیر جامد در شبکه حفرات و شکستگی‌ها ایجاد می‌کند که باعث می‌شود نفوذ عمقی با استفاده از حباب‌های ریز هوا به حداقل برسد. این انسداد میکرونی به سادگی با جریان معکوس مخزن، هنگامی که تولید شروع می‌شود، شسته شده و از بین می‌رود و باعث کاهش هزینه‌های مربوط به فرآیندهای تحریک چاه می‌گردد. این سیالات غیر نیوتنی بوده و گرانیروی ظاهری آنها در مقایسه با سیالات حفاری پایه آبی بیشتر است. رفتار آنها مشابه سیال حفاری شبه پلاستیک است و می‌توان آنها را با قانون توانی مدل کرد. نتایج تحقیقات در این مطالعه بر روی خصوصیات رئولوژیکی سیال پایه آبی شامل میکرو حباب با غلظت‌های متفاوتی از پلیمر و سورفکتانت نشان می‌دهد که با افزایش غلظت سورفکتانت، گرانیروی میکرو حباب‌ها و اندازه ریز حباب‌ها در صورت ثابت ماندن غلظت پلیمر افزایش می‌یابد. همچنین اندازه حباب‌ها با افزایش غلظت پلیمر در یک مقدار ثابت از سورفکتانت کاهش می‌یابد.

**کلمات کلیدی:** میکرو حباب‌های پایدار، حفاری مخازن کم فشار، سورفکتانت، پلیمر و سیالات حفاری

## مقدمه

- لایه نباید خیلی نازک باشد، در غیر این صورت تحت فشار شکننده خواهد بود.

- لایه محافظت کننده باید دارای حداقل گرانیروی باشد. مولکول‌های آب تمایل دارند که به خارج لایه و داخل محلول مایع نفوذ کنند که این مسئله موجب ناپایداری لایه می‌شود. نرخ انتقال از لایه متناسب با معکوس گرانیروی لایه می‌باشد. بنابراین، لازم است مواد خاصی جهت افزایش گرانیروی لایه اضافه گردد.

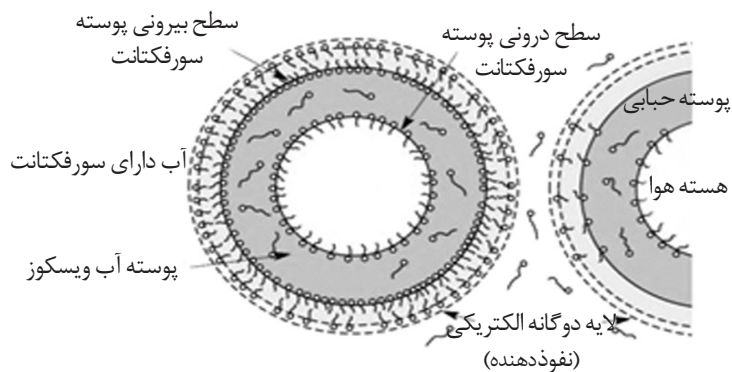
ساختارهای خاص میکرو حباب‌ها در سیالات حفاری پایه باعث می‌شود که این سیالات خواص رئولوژی مورد نیاز در صنعت سیالات حفاری را داشته باشند. پایداری یکی از ویژگی‌های مهم جهت استفاده از میکرو حباب‌ها در سیال حفاری می‌باشد. برای این منظور، لایه احاطه کننده حباب باید دارای خواص زیر باشد:

معمولی دارای یک مرز آب دوست می‌باشد. سبب برای اولین بار در سال ۱۹۷۱، مفهوم میکروحباب‌های گازی را ارائه نمود [۱] و سپس در سال ۱۹۸۷ مشخصات سیال شامل میکروحباب‌های گازی را با تمام جزئیات توصیف و کاربردهای احتمالی آن را منتشر کرد [۲]. همچنین بروکی [۳] در سال ۱۹۹۸ میکروحباب‌ها را به‌عنوان یک سیال در حفاری چاه‌های افقی معرفی کرد. از این سیستم به‌عنوان یک وسیله برای کنترل هرزروی گل و حداقل کردن آسیب سازند در نواحی دولومیتی حفره‌ای استفاده شده است.

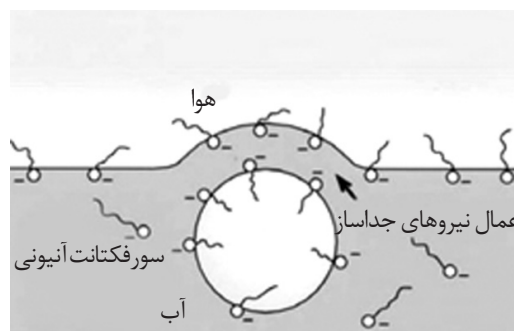
رمیرز و همکاران [۴] با استفاده از تکنولوژی میکرو حباب‌های حفاری، علاوه بر کنترل هرزروی، رفع مشکلات ناشی از وجود شیل در پایداری مخازن Lake Maracaibo که به مرحله بلوغ رسیده را گزارش نمودند.

ریسا و همکاران [۵] از سیستم میکروحبابی به منظور تکمیل مجدد و عملیات ترمیمی در ناحیه تاجین در میدان Roza Rica در شرق مکزیک استفاده نمودند.

ریز حباب‌ها در گل‌های پایه با استفاده از یک لایه پلیمر/سورفکتانت پایدار می‌شوند. این سیال حباب‌هایی با قطر تقریبی ۱۰ تا  $100 \mu\text{m}$  و یک هسته غالباً کروی است. سورفکتانت به میکروحباب‌ها خاصیت کلوییدی می‌دهد. برخلاف حباب معمولی که با استفاده از تک لایه سورفکتانت پایدار می‌گردد، میکروحباب‌ها از یک سورفکتانت سه لایه‌ای تشکیل شده است (شکل ۱). لایه داخلی متشکل از مولکول‌های سورفکتانت، هسته تشکیل شده از هوا را پشتیبانی کرده و آن را از لایه گرانرو جدا می‌کند. لایه خارجی که لایه گرانرو را مورد حمایت قرار می‌دهد، به سمت خارج آب گریز و به سمت داخل، آب دوست است. به دلیل اینکه این حباب در تماس با حجم کلی آب می‌باشد، باور بر این است که یک لایه دیگر وجود دارد که در آن مولکول‌های سورفکتانت به سمت داخل، آب گریز و به سمت خارج، آب دوست هستند. در شکل ۲، یک کره از گاز که با استفاده از یک لایه نازک سورفکتانت، از فاز مایع جدا شده نشان داده شده است. یک میکروحباب دارای مرز بیرونی آب گریز است، در حالی که یک حباب



شکل ۱- ساختار پیشنهادی میکروحباب گاز کلوییدی [۲]



شکل ۲- ساختار یک حباب پایدار شده توسط سورفکتانت [۲]

شده (توسط مولکول‌های سورفکتانت) نفوذ می‌یابد. رنگ محلول میکروحباب گازی کلوییدی تشکیل شده، سفید شیری است.

#### تصویربرداری ریز حباب‌های میکروحباب

میکرو حباب‌ها توسط دوربین ویدیویی دیجیتال Sony Exware HAD متصل به یک میکروسکوپ نوری Salran IMM-420 تصویربرداری شده است.

#### تعیین خصوصیات رئولوژیکی سیالات

از ویسکومتر دوار Fann 35A با سرعت‌های چرخشی مختلف به منظور تعیین خصوصیات رئولوژی سیالات تهیه شده، مطابق روش استاندارد API استفاده شده است.

#### انتخاب مدل سیال پایه آبی شامل میکروحباب

رفتار سیالات با استفاده از رابطه نرخ برش و تنش برشی آنها مشخص می‌شود. نرخ برش و تنش برشی با استفاده از دستگاه ویسکومتر محاسبه گردید. جهت انتخاب بهترین مدل توصیفی، طبق روش متداول حرکت سیال، تنش‌های برشی محاسبه شده را بر حسب نرخ برش رسم نموده و از دو مدل معروف توانی و بینگهام پلاستیک استفاده شده است. در شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای استحکام برای ۱/۶۵ lb/bbl پلیمرزیستی با ۱ lb/bbl سورفکتانت با استفاده از دو مدل بینگهام پلاستیک و توانی رسم شده است. پارامترهای رئولوژیکی برای این فرمولاسیون در جدول ۱ آورده شده است. نتایج بیان‌گر رفتار سیال مطابق قانون توانی می‌باشد. مدل رئولوژیکی برای دیگر سیالات به طریق مشابه تعیین گردید. نتایج نشان می‌دهد سیالات پلیمری مورد استفاده رفتاری مطابق مدل توانی از خود نشان می‌دهند.

#### نتایج و بحث

##### تاثیر پلیمر و سورفکتانت بر روی رئولوژی

سیال پایه آبی شامل میکروحباب، رفتاری مطابق با مدل توانی دارد که خواص رئولوژی آن در غلظت‌های مختلف پلیمر و سورفکتانت در شکل‌های ۵ و ۶ رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، افزایش غلظت سورفکتانت باعث افزایش تنش برشی در یک نرخ برش خاص می‌شود.

نتایج کار ایشان نشان می‌دهد که می‌توان این سیستم را که از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه است، جایگزین سیستم‌های دیزلی نمود.

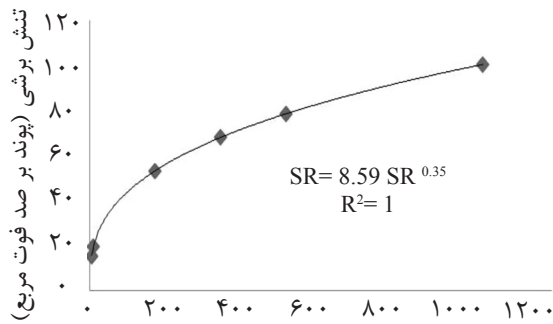
عربلو و همکاران [۶] از برگ‌های درخت خاصی به نام زیزیفس اسپاینا-کرایستی به عنوان یک سورفکتانت سازنده میکروحباب در تهیه سیال پایه آبی شامل میکروحباب استفاده نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد سورفکتانت زیستی طبیعی به‌دست آمده، به نحو مطلوبی قابلیت پخش میکروحباب را مشابه سایر سورفکتانت‌های تجاری دارا می‌باشد. همچنین نتایج تحقیقات صورت گرفته بر روی نمونه‌های ماسه سنگی برییا، بیان‌گر این مطلب است که استفاده از سیال پایه آبی شامل میکروحباب، صدمات سازند را به حداقل می‌رساند. به‌طوری‌که تراوایی بازگشتی بیش از ۸۰٪ گزارش شده است [۷]. همچنین محققینی نظیر ایوان و همکاران، خلیل و همکاران و کومالپاتی و همکاران در استفاده از میکروحباب‌های پایدار در صنعت حفاری تاکید نموده‌اند [۸-۱۰].

#### مراحل انجام کار

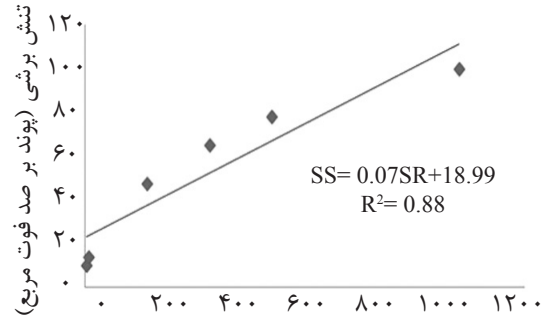
##### تهیه سیالات حفاری مورد استفاده

محلول پلیمر با آب به عنوان سیال حفاری پایه مورد استفاده قرار گرفته است. سیال پایه با مخلوط کردن پلیمر با غلظت متفاوت توسط مخلوط کن Hamilton Beach به‌دست آمد. محلول‌ها به مدت ۲۰ دقیقه با سرعت ۱۰۰۰۰ rpm به منظور جلوگیری از تشکیل لخته‌های گرانبه، تکان داده می‌شود.

محلول میکروحباب با استفاده از یک دیسک چرخشی با یک مخلوط سورفکتانت آنیونی، تولید می‌شود. در این بررسی دستگاه تولید کننده میکروحباب‌ها شامل ظرف یک لیتری و یک همزن مرکزی می‌باشد. همزن شامل یک دیسک چرخشی با قطر ۳ cm نصب شده در انتهای یک شفت (میله) در ارتباط با یک موتور الکتریکی است. مخلوط سورفکتانت و سیال پایه به مدت ۱۲۰ ثانیه، در سرعت ۸۰۰۰ rpm مخلوط گردید. با این عمل، هوا وارد سیال پایه‌ای می‌شود و سپس به درون حباب‌های ریز پایدار



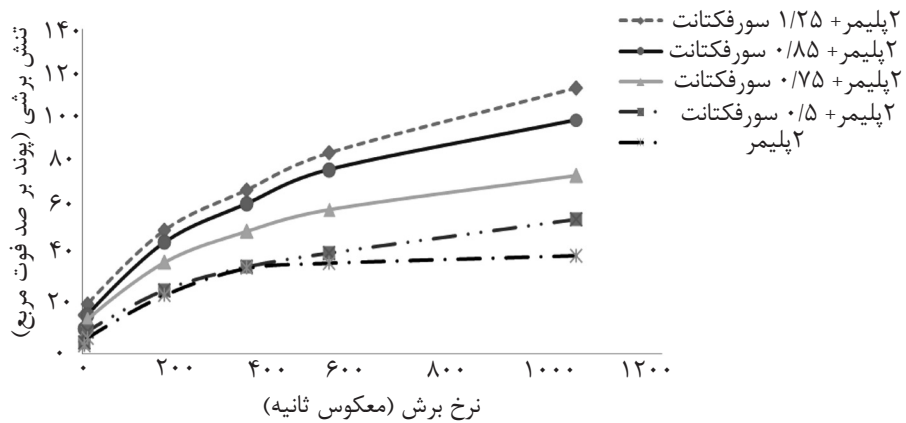
شکل ۴- نمودار مدل قانون توانی



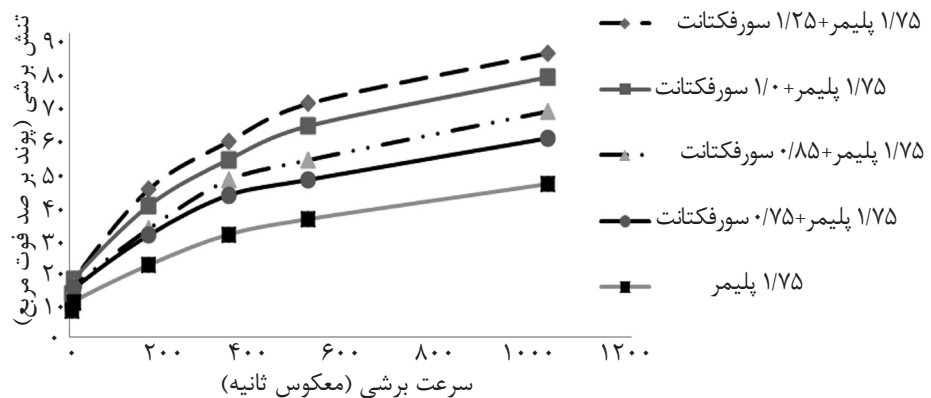
شکل ۳- نمودار مدل بینگهام پلاستیک

جدول ۱- نتایج اندازه گیری خواص رئولوژیکی سیال با پایه میکرو حباب (۱/۶۵ lb/bbl) پلیمر + ۱lb/bb سورفکتانت

چرخش (rpm)	(میزان انحراف عقربه) $\theta$	نرخ برشی ( $s^{-1}$ )	تنش برشی ( $lb/ft^2$ )
۳	۸	۵/۱۰۹	۸/۵۳۶
۶	۱۱	۱۰/۲۱۸	۱۱/۷۳۷
۱۰۰	۳۷	۱۷۰/۳	۳۹/۴۷۹
۲۰۰	۵۱	۳۴۰/۶	۵۴/۴۱۷
۳۰۰	۶۱	۵۱۰/۹	۶۵/۰۸۷
۶۰۰	۷۸	۱۰۲۱/۸	۸۳/۲۲۶



شکل ۵- تاثیر غلظت سورفکتانت بر روی رئولوژی برای سیال پایه میکرو حباب در غلظت ثابت ۲ lb/ bbl



شکل ۶- تاثیر غلظت سورفکتانت بر روی رئولوژی سیال پایه میکرو حباب در غلظت ثابت ۱/۷۵ lb/ bbl

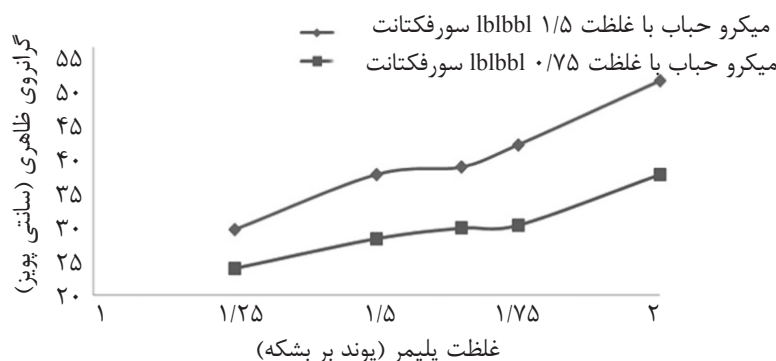
سنگ برای انسداد موثر حفرات در حین حفاری نقش بسیار مهمی دارند.

شکل ۸ تصاویری از سیالات میکروحبابی با غلظت‌های متفاوت از پلیمر و سورفکتانت را نشان می‌دهد. اندازه حباب‌ها با افزایش غلظت پلیمر برای یک مقدار ثابت از سورفکتانت، کاهش می‌یابد (شکل‌های ۸-الف و ۸-ب)، زیرا مقادیر بیشتر پلیمر، باعث افزایش ویسکوزیته سیال پایه می‌شود که کاهش نفوذ حباب‌ها به داخل محیط را در پی خواهد داشت. همچنین شکل‌های ۸-ج و ۸-د نشان می‌دهد اندازه حباب‌ها با افزایش غلظت سورفکتانت افزایش می‌یابد. این موضوع به خاطر افزایش ضخامت پوسته سورفکتانتی است که هسته میکروحباب‌های گازی کلوییدی را احاطه کرده است.

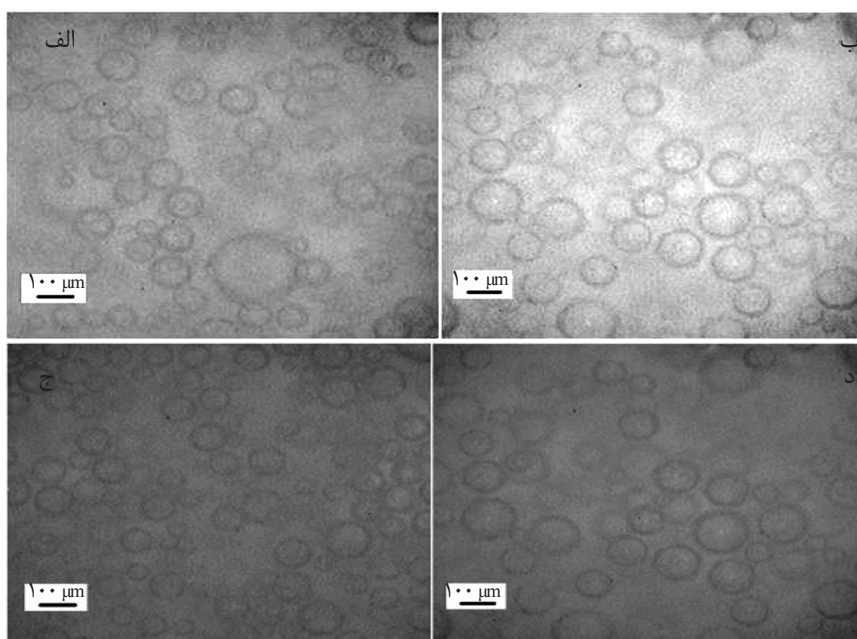
این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش مقدار حباب‌ها و یا افزایش احتمالی ضخامت پوسته سورفکتانتی احاطه کننده حباب‌ها باشد.

تاثیر غلظت پلیمر بر روی خواص رئولوژی سیال حفاری پایه در شکل ۷ رسم شده است. مطابق شکل در غلظت ثابت سورفکتانت، با افزایش غلظت پلیمر، ویسکوزیته ظاهری سیال حفاری پایه نیز افزایش می‌یابد.

**بررسی قطر ریز حباب‌ها:** تاثیر غلظت پلیمر و سورفکتانت در این مطالعه، بلافاصله پس از تولید میکروحباب‌ها با استفاده از یک دوربین ویدئویی دیجیتالی متصل به یک میکروسکوپ، از نمونه‌های ریز حباب تصویربرداری شد. اندازه حباب‌های کلوییدی مطابق با توزیع اندازه حفرات



شکل ۷- تاثیر غلظت پلیمر بر روی گرانروی ظاهری در غلظت‌های متفاوت سورفکتانت



شکل ۸- تاثیر غلظت پلیمر و سورفکتانت بر روی اندازه و قطر حباب‌های میکروحباب (الف) ۱/۶۵ lb/gal پلیمر و ۱ lb/gal سورفکتانت، (ب) ۲/۰۱ lb/gal پلیمر و ۱/۰۱ lb/gal سورفکتانت، (ج) ۱/۶۵ lb/gal پلیمر و ۰/۶ lb/gal سورفکتانت و (د) ۱/۶۵ lb/gal پلیمر و ۱ lb/gal سورفکتانت

### نتیجه‌گیری

- از سورفکتانت، کاهش می‌یابد.
- افزایش غلظت سورفکتانت باعث افزایش تنش برشی برای یک مقدار از نرخ برش ظاهری می‌گردد.
- افزایش غلظت پلیمر باعث افزایش گرانروی ظاهری می‌شود.
- نتایج تحقیقات انجام شده بر روی سیالات حفاری میکرو حباب‌های گازی در این مطالعه به شرح زیر می‌باشد:
- اندازه ریز حباب‌ها در یک غلظت ثابت از پلیمر، با افزایش غلظت سورفکتانت افزایش می‌یابد.
- اندازه حباب‌ها با افزایش غلظت پلیمر در یک مقدار ثابت

### مراجع

- 1] He X., China University of petroleum "The past, present and future of aphron base drilling fluid". SPE 141136-STU, SPE, Annual Technical and Exhibition Conference, Italy 2010.
- [2]. Sebba F., *Foams and biliquid foams-aphrons*, John Wiley and Sons, New York 1987.
- [3] 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, Feb., 18 – 19, 1998.
- [4]. Ramirez F., Greaves R, and Montilva J., "Experience using microbubbles – aphron drilling fluid in mature reservoirs of lake mracaibo", SPE 73710, presented at the SPE International Symrosium and Exhibition on Formation Damage Control, Lafayette, Louisiana, Feb. 20-21, 2002.
- [5]. Rea A. B., Alvis E. C., Paiuk B. P., Climaco J. M., Vallerjo M., Leon M., Leon E., and Injosa J., "Application of aphrons technology in drilling depleted mature fields", SPE 81082, Presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Port-of-Spain, Trinidad, West Indies, Apr. 27-30, 2003.
- [6]. Arabloo N., Pordel Shahri M., Zamani M., M., "Rheological and filtration loss characteristics of colloidal gas aphron based drilling fluids", Journal of the Japan Petroleum Institute, 55 (3), 2012.
- [7]. Growcock F. B., Belkin A., Fosdick M., Irving M., O' Connor B., and Brookey T., *Recent advances in aphron drilling fluid*, IADC/SPE Drilling Conference, Miami, FL, Feb. 21-23, 2006.
- [8]. Ivan C. D., Quintana J. L., and Blake L. D., *Aphron-Base Drilling Fluid: Evolving Technologies for Lost Circulation Control*, SPE 71377, SPE Annual Technical Conference, New Orleans, Louisiana, Sept. 30-Oct3, 2001.
- [9]. Khalil M., Mohamed Jan, B., Abdul Raman A. A., "Rheological and statistical evaluation of nontraditional light-weight completion fluid and its dependence on temperature" Journal of Petroleum Science and Engineering 77: 27-33 (2011).
- [10]. Kommalapati R. R., Roy, D., Valsaraj K. T., and Constant W. D., "Characterization of colloidal gas aphron suspensions generated from plant-based natural surfactant solutions". Sep. Sci. Technol., 31: 2317-2333, 1996.