

بررسی و شبیه‌سازی عملکرد تزریق فوم در مخازن شکاف‌دار و در مقیاس ماکرو

سجاد راجی^{۱*}، دانشگاه صنعت نفت ■ محمدرضا مهدیانی^۱، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

یکی از روش‌های عملیاتی و رایج ازدیاد برداشت، تزریق گاز است که با چالش‌هایی مثل نیاز به تأمین منابع کافی گاز جهت تزریق به مخزن و بازده روبش^۲ پایین مواجه است. به همین دلیل و جهت بهبود مشکلات مذکور، می‌توان از روش‌های دیگر از جمله تزریق فوم استفاده کرد. در این روش فوم که از دو فاز گاز و آب تشکیل شده به جای گاز به مخزن تزریق می‌شود. با این روش برخی مشکلات تزریق گاز از جمله بازده روبش ضعیف آن بهبود می‌یابد. با توجه به مطالعات اندک در زمینه‌ی بررسی عملکرد روش‌های مختلف تزریق فوم در این مطالعه به کمک شبیه‌سازی عملکرد سه روش تزریق فوم در یک مخزن شکاف‌دار بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند و بهترین و مؤثرترین روش با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف (به‌خصوص اقتصادی و نه فقط صرف افزایش تولید) انتخاب شده است. روش تزریق پیوسته‌ی فوم به‌عنوان شتاب‌دهنده‌ی تولید نفت و روش تزریق دوره‌ای فوم-آب به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی ضریب بازیافت پیشنهاد می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۸/۱۹

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۸/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۱۰/۲۶

واژگان کلیدی:

تزریق گاز، ازدیاد برداشت، بازده

رویش، فوم، مخزن شکاف‌دار،

شتاب‌دهنده‌ی تولید نفت،

تقویت‌کننده‌ی ضریب بازیافت

مقدمه

کردند. نتایج نشان داد که تزریق فوم در مخزن نفتی روشی مؤثر برای بهبود بازیافت نفت است. اصلی‌ترین دلیل این امر مطلوب‌تر بودن نسبت تحرک‌پذیری در این حالت نسبت به حالت تزریق غیرامتزاجی گاز است. به‌طور کلی غلظت سورفکتانت بر افزایش تولید نفت مؤثر است. ویژگی مهم دیگری که در کاربرد فوم مشاهده شد وجود یک غلظت بحرانی بود که در غلظت‌های بیش از آن، افزایش بازیافت نفت مقدار محدودی است. این مطلب نشان می‌دهد که غلظت‌های کم سورفکتانت در مقایسه با غلظت‌های زیاد، باعث افزایش چشم‌گیر تولید نفت می‌شود [۵]. در ۲۰۱۵ Almaqabali و همکارانش با شبیه‌سازی عددی دوبعدی و سه‌بعدی تزریق فوم در مخزن کربناته نتیجه‌گیری کردند که در سنگ‌های کربناته‌ی شکاف‌دار می‌توان از فوم به‌عنوان عاملی مسدودکننده استفاده کرد که در این روش ازدیاد برداشت، فوم با مسدود کردن مسیرهایی با تراوایی زیاد باعث انحراف جریان به لایه‌های کمتر جاروب شده می‌گردد و در نتیجه سبب افزایش بازیافت نفت می‌شود [۶].

باتوجه به اهمیت روزافزون ازدیاد برداشت از مخازن شکاف‌دار و وجود روش‌های مختلف و همچنین هزینه‌بر بودن آن، انتخاب روش مناسب ازدیاد برداشت برای افزایش بازیافت نفت امری اجتناب‌ناپذیر است. امروزه تزریق گاز روشی فراگیری در ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز است. همان‌گونه که گفته شد با توجه به کم بودن بازده روبش در روش تزریق گاز، تزریق فوم گزینه‌ی مناسبی برای بهبود این مشکل است. در این مقاله ابتدا سه روش مختلف تزریق فوم بررسی شده است. سپس با شبیه‌سازی این روش‌ها در مطالعه‌ی موردی توسط نرم‌افزار اکلیپس نتایج از جوانب مختلف بررسی و

امروزه تزریق گاز یکی از روش‌های متداول ازدیاد برداشت است که هدف اصلی آن متحرک کردن^۳ نفت و کاهش اشباع نفت باقیمانده است. بازده میکروسکوپی در تزریق گاز زیاد است؛ چراکه علاوه بر کاهش گرانیوی نفت، باعث تورم^۴ آن نیز می‌شود. اما روش تزریق گاز، با وجود زیاد بودن بازده میکروسکوپی، بازده روبشی کمی دارد که علت آن پدیده‌ی زبانه‌ای شدن^۵ و جدایش گرانشی^۶ به‌دلیل ناهمگونی^۷ سنگ، چگالی و گرانیوی گاز است [۷]. این مشکل می‌تواند توسط تزریق سورفکتانت به‌همراه گاز و در نتیجه تشکیل فوم حل شود.

در ۱۹۹۶ Rossen مطالعه‌ی روی فیزیک و فرآیندهای فیزیکی فوم و تزریق آن انجام داد و به این نتیجه رسید که تزریق فوم در مقایسه با گاز، جابجایی جارویی (ماکروسکوپی) را افزایش می‌دهد [۲]. در ۱۹۹۸ Bertin و همکارانش توسط ماسه‌ی تراوا که یک مغزه‌ی ماسه‌سنگی را احاطه کرده بود محیط متخلخل ناهمگنی با نسبت تراوایی ۷۰ به ۱ ساختند و طبق آزمایش‌های انجام شده نتیجه‌گیری کردند که در غیاب فوم، مقدار کمی گاز به لایه‌ی کم‌تراوا یعنی مغزه‌ی ماسه‌سنگی جریان می‌یابد. اما هنگام حضور فوم، مقدار قابل توجهی از گاز تزریقی به سمت این لایه منحرف می‌شود و در آن جریان می‌یابد [۳]. در ۲۰۱۰ Nguyen و Srivastava مطالعه‌ی روی عملکرد آلکالین-سورفکتانت-گاز (ASG)^۸ در یک مغزه‌ی کربناته انجام دادند و نتیجه‌گیری کردند که تزریق فوم از پتانسیل بالقوه‌ی جهت ازدیاد برداشت به‌خصوص در سنگ‌های کربناته‌ی شکاف‌دار کم‌تراوا برخوردار است [۴]. در ۲۰۱۴ Romero و Fejoli جریان سه‌بعدی، چندفازی و گذرای فوم را در یک مخزن نفتی افقی آنالیز

* نویسنده‌ی عهد ه‌دار مکاتبات (Sajjad_raji@ut.ac.ir)

محلول در آنست. فوم در واقع مجموعه‌ی واحدهای گاز است که بین لایه‌های نازکی از فاز آبی به نام لاملا محبوس شده است [۷]. سورفکتانت در فاز مایع فوم‌ها جهت تثبیت پراکندگی گاز در مایع حل شده است.

فوم به‌عنوان یک روش ازدیادبرداشت، دو هدف اصلی مسدودسازی^۹ و کنترل تحرک‌پذیری^{۱۰} است. مسدودسازی نزدیک به چاه‌های تزریقی و تولیدی با هدف مسدود کردن لایه‌های غیرتولیدی و با تراوایی زیاد جهت افزایش بازده روبش انجام می‌شود. هدف استفاده از فوم کنترل تحرک‌پذیری، کاهش تحرک‌پذیری گاز از طریق افزایش گرانشی آن و کاهش تراوایی نسبی است. کاهش تحرک‌پذیری گاز باعث حداقل شدن پدیده‌ی انگشتی شدن و صعود گاز به بالای مخزن^{۱۱} می‌گردد [۲]. شکل ۱- تفاوت بین تزریق گاز و تزریق فوم را نشان می‌دهد.

۲- شبیه‌سازی مدل مخزنی برای تزریق فوم

مخزن مورد مطالعه هشت لایه دارد و شکاف‌دار است. مدل مورد استفاده، مدل ساده‌شده‌ی یک مخزن واقعی بوده که در آن ده چاه حفر شده است. شش تا از این چاه‌ها تولیدی و مابقی تزریقی هستند. تعداد گریدهای مدل ۱۶×۱۵×۲۰ است. اندازه‌ی گریدها در جهت محور X و Y، ۹۰۰ فوت و در جهت محور Z متغیر در نظر گرفته شده است. نفت در جای مخزن تقریباً ۴/۲۲۵×۱۰^۶ بشکه محاسبه شده است. شکل ۲- مکان چاه‌ها را در این مخزن نشان می‌دهد. فشار اولیه‌ی مخزن ۳۶۷۱ پام بوده است.

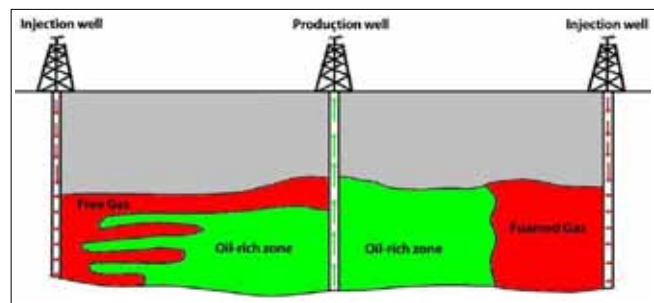
با توجه به شکل ۲- چاه‌های تولیدی ۱- تا ۶ باز هستند که طی این مدت تولید می‌کنند و چاه‌های ۷- تا ۱۰ چاه‌های بسته هستند که تزریق توسط آنها انجام می‌شود و تولید ندارند. جدول ۱- تخلخل و تراوایی میانگین ماتریکس و شکاف را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه در واقعیت مخازن ناهمگون هستند، برای شبیه‌سازی بهتر و نزدیک‌تر به واقعیت شرایط مخزن با استفاده از نرم‌افزار پترل اثر ناهمگونی در تخلخل و تراوایی لحاظ شده است. جداول ۲- تا ۴ به ترتیب خواص نفت و گاز را نشان می‌دهد. به دلیل در دسترس نبودن داده‌های خواص سیال مخزن مورد نظر از داده‌های مدل‌های آماده‌ی نرم‌افزار اکلپس استفاده شده است.

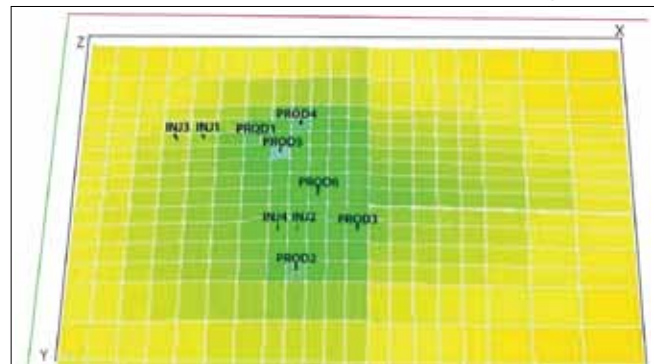
تحلیل شده تا بهترین روش تزریق فوم در مخزن مورد مطالعه معرفی گردد.

۱- فرآیند ازدیادبرداشت به کمک تزریق فوم

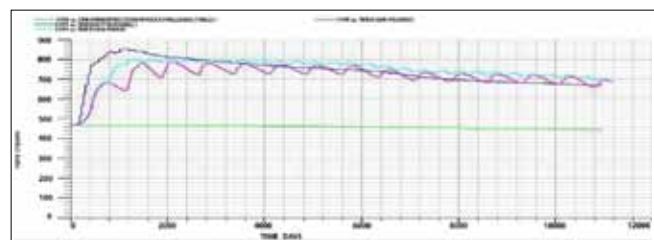
فوم سیالی است که از دو فاز گاز و آب تشکیل شده و خواص آن ترکیبی از این دو است. بدین معنی که چگالی فوم به چگالی گاز نزدیک است اما گرانشی آن بسیار بیشتر از گاز بوده و تراوایی نسبی آن کمتر از تراوایی نسبی فاز گاز است. همچنین از لحاظ خصوصیات ترشوندگی، رفتار آن مطابق رفتار ترشوندگی آب و سورفکتانت



شکل ۱ | طرح‌واره مقایسه‌ی تزریق فوم و تزریق گاز [۸]



شکل ۲ | نمای کلی مخزن و مکان چاه‌ها



شکل ۳ | نرخ تولید نفت بر حسب زمان

جدول ۲ | خواص نفت

گاز محلول (Mscf/stb)	فشار حباب (پام)	ضریب حجمی (rb/stb)	گرانروی (cp)
۰	۱۴/۷	۱/۰۰۰	۵/۵۲
۰/۴۰۳	۲۴۶۴	۱/۲۳۳	۱/۲۷
۰/۷۶	۵۰۱۴	۱/۳۸۱	۱/۱۱
	۶۰۱۴	۱/۳۷۱	۱/۵۱

جدول ۱ | تخلخل و تراوایی میانگین ماتریکس و شکاف

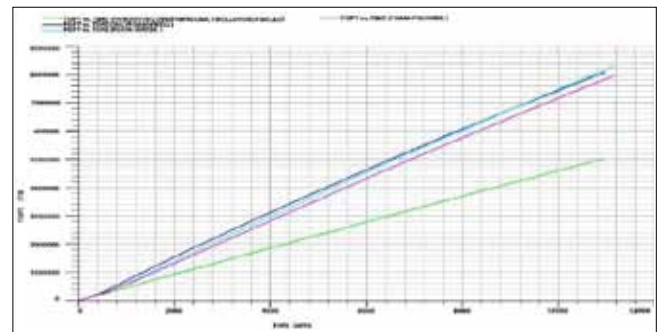
شکاف		ماتریکس	
تخلخل	تراوایی (میلی‌دارسی)	تخلخل	تراوایی (میلی‌دارسی)
۰/۰۰۲	۵۰۰	۰/۰۷۱۵	۱/۲

۳- برنامه‌ی توسعه‌ی مخزن

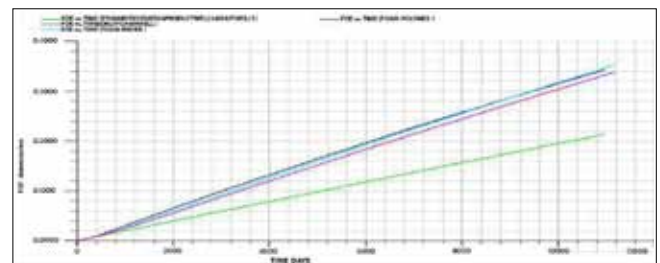
ابتدا تولید طبیعی این مخزن به مدت سی سال از شش چاه تولیدی که توسط کنترل فشار ته‌چاهی تولید می‌کردند شبیه‌سازی شد. با توجه به برتری تزریق فوم نسبت به تزریق گاز (به‌خصوص در مخازن شکافدار)، تزریق فوم جهت افزایش تولید نفت انتخاب گردید. تزریق فوم به سه روش تزریق پیوسته‌ی فوم، تزریق دوره‌ای فوم-آب^{۱۲} و تزریق دوره‌ای فوم-پلیمر^{۱۳} شبیه‌سازی شد. برای هر روش همزمان با آغاز دوره‌ی تولید طبیعی به مدت سی سال فوم تزریق گردید. تزریق پیوسته‌ی فوم به چهار چاهی که در زمان تولید طبیعی بسته بودند انجام شد. تزریق دوره‌ای فوم-آب و همچنین فوم-پلیمر نیز به صورت دوره‌های شش‌ماهه برنامه‌ریزی گردید. در این دو روش، دو چاه به‌عنوان چاه تزریق فوم و دو چاه به‌عنوان چاه تزریق آب یا پلیمر انتخاب شدند. در شش‌ماهه‌ی اول سال، تزریق فوم و در شش‌ماهه‌ی دوم سال تزریق سیال کمکی به فوم صورت گرفت. با توجه به شرایط و مکان چاه، نرخ تولید از هر چاه متغیر انتخاب شده است. فوم و آب در هر مرحله‌ی تزریق، با نرخ ۵۰۰ بشکه در روز تزریق شده‌اند.

۴- بحث

هدف کلی این مطالعه بررسی و مقایسه‌ی سه روش تزریق فوم در مخزن شکافدار و یافتن بهترین روش از بین آنهاست. مهم‌ترین عامل برتری یک روش نسبت به دیگر روش‌ها، صرفه‌ی اقتصادی آنست. به عبارت



شکل ۳ | تولید تجمعی نفت در روش‌های مختلف تزریق فوم



شکل ۴ | ضریب بازیافت نفت در روش‌های مختلف تزریق فوم

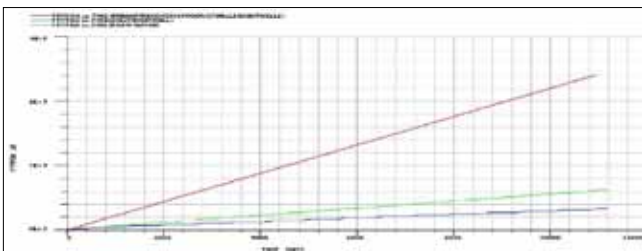
دیگر ممکن است یک روش تولید نفت بیشتری داشته باشد اما از لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه نباشد. بنابراین با وجود افزایش قابل‌ملاحظه‌ی تولید نفت، روش مناسبی جهت ازدیادبرداشت نیست. با توجه به شکل-۳ که نرخ تولید نفت از مخزن را با روش‌های مختلف تزریق و همچنین مقدار افزایش نرخ تولیدی نسبت به حالت تولید طبیعی را نشان می‌دهد می‌توان تزریق پیوسته‌ی فوم را به‌عنوان شتاب‌دهنده‌ی تولید (به‌خصوص در دو سال اول تزریق) معرفی کرد که برای تولید در زمان کوتاه مناسب است. اما در درازمدت کاهش نرخ تولیدی نفت آن قابل‌ملاحظه است.

شکل-۴ تولید تجمعی نفت در هر روش تزریق را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در ابتدای دوره‌ی تزریق، تولید تجمعی نفت در تزریق پیوسته‌ی فوم از دو روش دیگر بیشتر است اما در درازمدت تولید تجمعی نفت در تزریق دوره‌ای فوم-آب با تزریق پیوسته‌ی فوم برابر می‌شود و در اواخر دوره‌ی مقدار آن تزریق دوره‌ای فوم-آب بیشتر از تزریق پیوسته‌ی فوم است.

شکل-۵ نیز نمودار ضریب بازیافت نفت را در هر روش نشان می‌دهد. طبق روند تغییرات تولید تجمعی نفت و در نتیجه ضریب بازیافت می‌توان تزریق دوره‌ای فوم-آب را به‌عنوان یک تقویت‌کننده‌ی ضریب بازیافت معرفی کرد.

علت افزایش تولید تجمعی و در نتیجه بیشتر بودن ضریب بازیافت تزریق دوره‌ای فوم-آب نسبت به تزریق پیوسته‌ی فوم (با توجه به شکل-۳)، کاهش چشمگیر نرخ تولید نفت در روش تزریق پیوسته و همچنین تغییرات محدود نرخ تولید نفت در روش تزریق دوره‌ای فوم-آب است. در ضمن باید به این نکته توجه داشت که در روش تزریق پیوسته‌ی فوم، مقدار مصرف فوم به‌مراتب بیشتر است که طبق مسائل اقتصادی، یک امتیاز منفی برای این روش تزریق محسوب می‌شود (شکل-۶). همان طوری که مشخص است در روش

۳ خواص گاز		
فشار (پام)	ضریب حجمی (rb/stb)	گرانروی (cp)
۱۴/۷	۲۷/۷۱	۰/۰۱۳۸
۵۰۱۴	۰/۶۹۴۵۷	۰/۰۲۶۲



شکل ۵ | مقدار مصرف فوم روش‌های مختلف تزریق

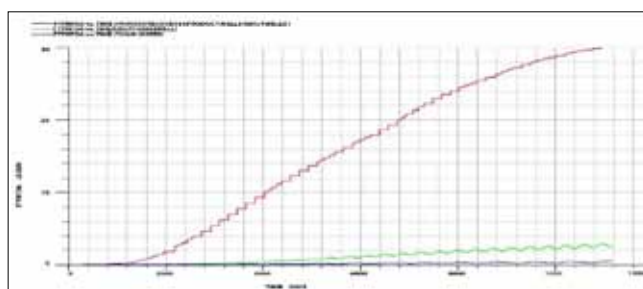
مقدار قابل توجهی از فوم تأثیری ناچیز بر تولید نفت داشته است.

نتیجه‌گیری

- روش تزریق با توجه به شرایط اقتصادی و هدف انتخاب می‌شود. روشی که بیشترین ضریب بازیافت را دارد لزوماً گزینه‌ی مناسبی برای اجرا نیست. تأمین و هزینه‌ی مواد تزریقی و تجهیزات مورد نیاز عملیات تزریق نیز در انتخاب روش مناسب نقش دارند.
- در کوتاه‌مدت، روش تزریق پیوسته‌ی فوم روش مناسب‌تری است؛ چراکه به‌عنوان شتاب‌دهنده‌ی تولید عمل می‌کند.
- برای تولید صیانتی از مخزن در درازمدت، روش تزریق دوره‌ای فوم-آب پیشنهاد می‌شود که به‌عنوان تقویت‌کننده عمل می‌کند و در درازمدت به آرامی ضریب بازیافت را افزایش می‌دهد.
- انتخاب روش شتاب‌دهنده‌ی تولید تنها هنگام قیمت‌های زیاد نفت در بازار جهانی پیشنهاد می‌شود.
- برای جلوگیری از رسیدن غلظت فوم به غلظت بحرانی، بررسی غلظت فوم تزریقی در چاه و مخزن ضروری است و تنها بررسی غلظت هنگام تزریق در چاه کافی نیست. ■

تزریق دوره‌ای فوم-پلیمر علاوه بر تزریق فوم، پلیمر نیز تزریق شده اما این روش چه از لحاظ عملکرد و چه از لحاظ اقتصادی روش مطلوبی نیست.

با توجه به شکل ۶-انتظار می‌رود تولید فوم در روش تزریق پیوسته بیشتر از دو روش دیگر باشد که شکل ۷-نشان‌دهنده‌ی این موضوع است. اما اختلاف تولید در روش تزریق پیوسته‌ی فوم با تزریق دوره‌ای فوم-آب بیش از حد انتظار است. با توجه به نزدیکی چاه‌های تزریقی به هم علت این امر افزایش غلظت فوم در مخزن است که احتمالاً غلظت فوم از غلظت بحرانی بیشتر شده و در نتیجه



شکل ۷ | مقدار فوم تولیدی روش‌های مختلف تزریق

پانویس‌ها

1. mahdiani@aut.ac.ir
2. Sweep Efficiency
3. Mobilize
4. Swelling
5. Viscous Fingering
6. Gravity Segregation
7. Heterogeneity
8. Alkaline-Surfactant-Gas(ASG)
9. Plugging
10. Mobility Control
11. Gravity Override
12. Water Assisted Foam
13. Polymer Assisted Foam

منابع

- [1] Ydstebø, T. Enhanced Oil Recovery by CO₂ and CO₂-Foam in Fractured Carbonates. Master Thesis in Reservoir Physics, Department of Physics and Technology, University of Bergen, June 2013.
- [2] Rossen, W.R. Foam in Enhanced Oil Recovery, in Foams: Theory Measurement and Application. 1996.
- [3] Bertin, H.J., Apaydin, O.G., Castanier, L.M., and Kovscek, A.R. Foam Flow in Heterogeneous Porous Media: Effect of Crossflow. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, USA, 1998.
- [4] Srivastava, M., and Nguyen, Q.P. Application of Gas for Mobility Control in Chemical EOR in Problematic Carbonate Reservoirs. SPE Improved Oil Recovery Symposium. Tulsa, Oklahoma, USA: Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [5] Fejoli, R.F., and Romero O.J. Critical Concentration of Foam and Enhanced Oil Recovery. SPE Heavy and Extra Heavy Oil Conference, Medellin, Colombia, 2014.
- [6] AlMaqbali, A., Agada, S., Geiger S., Haugen, A., and Fernø M.A. Modelling Foam Displacement in Fractured Carbonate Reservoirs. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, Abu Dhabi, UAE, 2015.
- [7] خسروی، مریم، تزریق فوم درمان مناسب چالش‌های تزریق گاز در مخزن‌های شکاف‌دار، پژوهشکده‌ی ازدیادبرداشت از مخازن نفت و گاز، ۱۳۹۴
- [8] Farajzadeh, R., Andrianov, A., and Zitha, P.L.J. Foam Assisted Enhanced Oil Recovery at Miscible and Immiscible Conditions. Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition, Kuwait City, Kuwait: Society of Petroleum Engineers. 2009.
- [9] Nguyen, Q.P. Dynamics of Foam in Porous Media. PhD Dissertation, Delft University, Netherlands, 2004.
- [10] Pei, H., Zhang, G., Ge, j., Wang, j., Ding, B., and Liu, X. Investigation of Polymer-Enhanced Foam Flooding with Low Gas/Liquid Ratio for Improving Heavy Oil Recovery. Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2010.
- [11] Farzaneh, S.A., and Sohrabi, M. A Review of the Status of Foam Applications in Enhanced Oil Recovery. EAGE Annual Conference and Exhibition Incorporating SPE, London, United Kingdom, 2013.
- [۱۲] ارسطو، عادل، غفوری، امین، خرم، مریم، ازدیادبرداشت، تلاش جهانی برای برداشت بیشینه‌ی نفت. ماهنامه‌ی اکتشاف و تولید، ۱۳۹۱. شماره‌ی-۹۱، تیر ماه