Chemical Research & Nanomaterials(CRN)
crn.shiraz.iau.ir
پژوهش های شیمیایی و نانومواد

شبیه‌سازی تزریق نانوسیالات پایه آبی به مخازن نفتی با استفاده از روش خطوط جریان

نرگس میلانی نسب، بهزاد وافری*

دانشکده مهندسی شیمی و مواد، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

چکیده: هدف اصلی تمام روش‌های شبیه‌سازی مخازن، پیش‌بینی عملکرد جریان و میزان بازیافت نفت است. اکثر شبیه‌سازهای تجاری معادلات حاکم بر رفتار مخزن را با روش تفاضل محدود حل می‌کنند. برای حل معادلات سه‌بعدی جریان در محیط متخلخل با روش تفاضل محدود به یک سری شبکه نیاز است که ابعاد آنها بر روی نتایج شبیه‌سازی تاثیرگذار است که به آن پراکندگی عددی اطلاق می‌گردد. در ضمن، در مدل‌های پیچیده که تعداد بلوک‌های شبکه زیاد است، مدت زمان زیادی برای اجرای شبیه‌سازی نیاز می‌شود. برای از بین بردن اثر اندازه بلوک و همچنین افزایش سرعت شبیه‌سازی، روش خطوط جریان (Stream line method) پیشنهاد شده‌است که در مهندسی و مدیریت مخازن هیدروکربوری کاربرد زیادی دارد. روش خطوط جریان می‌تواند مسیر جریان سیال در مخزن، راندمان تزریق، حجم فضای خالی، و ضریب تخصیص چاه به منظور تعیین حجم سیال انتقال یافته بین چاه های تزریقی و تولیدی را شبیه‌سازی نماید. علاوه بر این در سال‌های اخیر مطالعات زیادی بر روی تاثیر تزریق نانوسیالات بر ویژگی‌های مخازن نفتی و میزان ازدیاد برداشت از آن‌ها انجام شده‌است. از آنجایی که روش خط جریان تاکنون برای شبیه‌سازی تزریق نانوسیال در مخازن نفتی مورد استفاده قرار نگرفته است، در این تحقیق تاثیر تزریق نانوسیال آب–سیلیکا بر معادلات جریان فازها بررسی شده‌است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تزریق نانوسیال به مخزن موثرتر از تزریق آب خالص بوده و تولید نفت را افزایش می‌دهد. علاوه بر این مشاهده شد که نوع نفت موجود در مخزن (سبک و سنگین) تاثیر چشم‌گیری بر روی نتایج شبیه‌سازی ندارد.

واژگان کلیدی: ازدیاد برداشت نفت، شبیه‌سازی، تزریق نانوسیال، روش خطوط جریان

behzad.vaferi@gmail.com

۱- مقدمه

مخازن کربناته با عمر بالا درصد بالایی از مخازن هیدروکربوری ایران و جهان را تشکیل می‌دهند. به منظور ادامهٔ تولید از این نوع مخازن، روش‌های ازدیاد برداشت از مخازن هیدروکربوری اهمیت زیادی پیدا کرده‌اند[۱–۳]. از طرفی روش‌های سنتی ازدیاد برداشت از جمله تزریق آب در همهٔ شرایط قادر به بهبود تولید از این مخازن نیستند[۴]. از این رو، روش‌های نوین ازدیاد برداشت مانند تزریق نانوسیالات به درون مخازن هیدروکربوری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار شده‌اند[۵–۷].

نانوسیالات از پراکنده‌کردن یکنواخت و همگن ذرات نانو در سیالات معمولی مثل آب (تحت عنوان سیال پایه شناخته می‌شوند) سنتز می‌شوند[۸]. با پیشرفت علم نانوتکنولوژی، استفاده از نانوذرات در بخش‌های مختلف صنعت نفت از جمله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۱/۱۲/۱۷
تاریخ پذیرش : ۱۴۰۲/۱/۱۸

ازدیاد برداشت از مخازن نفتی مورد توجه قرار گرفته است[۹-۱۰]. قبل از انجام عملیات ازدیاد برداشت مبتنی بر تزریق نانوسیالات، درک صحیح از مکانیزم‌های چگونگی تاثیر این سیالات بر افزایش تولید نفت جهت موفقیت آمیز بودن طرح ضروری می‌باشد. علاوه بر این، با پیشرفت علوم مبتنی بر کامپیوتر و افزایش قدرت پردازش آنها این امکان فراهم شده‌است که حتی شبیه‌سازی مدل‌های مخزن بسیار پیچیده نیز با دقت قابل قبولی انجام شود[۱۱].

روش خطوط جریان یک تکنیک کاربردی است که می‌تواند رفتار مخازن هیدروکربوری را در شرایط عملیاتی مختلف شبیه‌سازی کند[۱۲]. روش خطوط جریان دارای یکسری قابلیت‌های کلیدی است که محققین را قادر می‌سازد نواقص روش‌های محاسباتی سنتی در شبیه‌سازی عملکرد مخازن هیدروکربوری را برطرف کند. عملکرد بهتر روش خطوط جریان در مقایسه با روش‌های سنتی مخصوصا در شبیه‌سازی رفتار مخازن پیچیده و پدیده‌هایی که اثرات جابجایی سیال در آنها وجود دارد بهتر نمایان می‌شود[۱۳]. از نقطه نظر میزان حافظه مورد نیاز برای انجام محاسبات نیز روش خطوط جریان بر روش‌های سنتی برتری دارد، زیرا این روش صرفاً یک خط جریان را در هر بازه زمانی در حافظه نگه می‌دارد[۱۳].

همت اسفه و همکاران در سال ۲۰۱۹ از روش تفاضل محدود برای مدل‌سازی تزریق نانوسیالات در محیط متخلخل با هدف افزایش بازیابی نفت استفاده کردند. در این مطالعه، تأثیر میزان جریان نانوسیال کسر حجمی نانوذرات و تخلخل محیط بر روند بازیابی نفت بررسی شده‌است[۱۴]. اوگولو و همکاران در سال ۲۰۱۲ عملکرد نه نوع نانوذره در در چهار سیال پایه را بر ازدیاد برداشت نفت بررسی کردند[۱۵]. مکانیسم های تغییر ترشوندگی سنگ، کاهش کشش سطحی، کاهش ویسکوزیته نفت، کاهش نسبت تحرک و تغییرات نفوذپذیری به عنوان عوامل افزایش بازیافت نفت شناسایی شده‌است. الامین و همکاران در سال ۲۰۱۳ یک مدل ریاضی را برای توصیف رفتار نانوذرات پایه آبی در جریان دو فازی نفت-آب محیط متخلخل ارائه دادند[۱۶]. در این مدل، فشار مویینگی منفی و همبستگی نفوذپذیری نسبی خنثی متناسب با سیستم ترشوندگی خنثی در نظر گرفته شده‌است. در این تحقیق، تاثیر نانوذرات بر عملکرد فرآیند بازیافت نفت نیز بررسی شده‌است. سپهری و همکاران در سال ۲۰۱۹ اثر ذرات نانو بر روی خواص سنگ کربناته و سیال را بصورت آزمایشگاهی بررسی کردند[۱۷]. علاوه بر این، تزریق نانوسیال به منظور افزایش بازیافت نفت در این تحقیق شبیه‌سازی و مدل‌سازی شده‌است. نتایج شبیه سازی عددی بیان می‌کند که تغییر ترشوندگی از نفت‌دوست به آب‌دوست به دلیل وجود نانوذرات می‌تواند منجر به هشت تا ده درصد افزایش بازیافت نفت در مقایسه با سیلاب‌زنی طبیعی آب شود .علاوه‌بر این روش خطوط جریان برای شبیه‌سازی تزریق امتزاجی متناوب آب و گاز[۱۸]، تزریق امتزاجی گاز CO_2 در مخازن گاز میعانی[۱۹]، تزریق پلیمر عیرنیوتنی[۲۰]، فرآیند آشام در مخازن شکافدار طبیعی[۲۱]، و جریان دوفازی در محیط متخلخل شکافدار[۲۲] استفاده شده‌است.

شبیه‌سازی مخزن بر مبنای خطوط جریان در سالهای اخیر در صنعت نفت و گاز مورد توجه قرار گرفته است، به نحوی که به عنوان روشی موثر و تکمیل کننده روش‌های سنتی مدل‌سازی مخزن نظیر تفاضل محدود پذیرفته شده‌است. شبیه‌سازی فرآیند ازدیاد برداشت مبتنی بر تزریق نانوسیالات با روش خطوط جریان مهم‌ترین نوآوری تحقیق حاضر محسوب می‌شود. در این تحقیق بصورت خاص تاثیر تزریق نانوسیال سیلیکا-آب بر روی معادلات حرکت فازها در مخزن بررسی شده و همچنین توزیع اشباع سیالات بر اساس خطوط جریان تخمین زده می‌شود.

۲- روش خطوط جریان

خطوط جریان به خطوطی اطلاق می‌شود که در یک لحظه خاص بر بردار سرعت مماس هستند. از آنجایی که این خطوط خصوصیات جریان سیال در مخزن را توصیف می‌کنند، به کمک آنها می‌توان نحوه جابجایی سیال در بخش‌های مختلف مخزن را آنالیز کرد. به دلیل سادگی و شفافیت در نمایش ویژگی‌های سیال، خطوط جریان در صنعت نفت و گاز کاربرد فراوانی پیدا کرده‌است.

در شبیه‌سازی بر مبنای خطوط جریان، معادلات سه‌بعدی سیال با چندین معادله یک بعدی در راستای خطوط جریان تقریب زده می‌شود. ایده اصلی شبیه‌سازی مبتنی بر خطوط جریان جداسازی

تاثیر ناهمگنی زمین‌شناسی از محاسبات حرکت سیال است. از نظر ریاضی این عمل با بکارگیری زمان پرواز خطوط جریان، به عنوان متغیر مختصات، اجرا می‌شود. در واقع مسئله به یک سیستم مختصاتی جدید منتقل می‌شود که در آن تمامی خطوط جریان مستقیم بوده و زمان پرواز جایگزین فاصله شده‌است. علاوه بر این، تاثیر ناهمگنی در زمان پرواز و منحنی مسیر خطوط جریان لحاظ می‌شود.

مراحل شبیه‌سازی بر پایه خطوط جریان را می‌توان که به صورت زیر ارائه داد.

با کمک معادله (۱)، زمان شبیه‌سازی به n گام زمانی برای هر فاز (Δt^n) تقسیم‌بندی می‌شود.

$$t^{n+1} = t^n + \Delta t^n \qquad (۱)$$

– در ابتدا زمان t^n از روش IMPES برای گسسته‌سازی معادلات فازها و محاسبه فشار میدانی در سیستم شبکه استفاده می‌شود.

– از معادله دارسی برای محاسبه سرعت در هر جهت از سطح شبکه استفاده می‌شود.

– خط جریان از چاه تزریقی به سمت چاه تولیدی رسم شده و پارامترهای خواص سیال و توزیع اولیه اشباع برای هر نقطه از خط جریان محاسبه می‌شود. نانوذره بر خواص سیال تزریقی از جمله دانسیته و ویسکوزیته‌ی آن و همچنین خواص سنگ مخزن از جمله ترشوندگی تاثیرگذار است.

– محاسبات در امتداد هر خط جریان انجام می‌شود، و توزیع اشباع در امتداد خط جریان در گام زمانی بعدی Δt^{n+1} (در حرکتی رو به جلو) بدست می‌آید.

– میانگین پارامترهای خواص در طول خط جریان در هر شبکه و توزیع اشباع در سیستم شبکه برای زمان بعدی t^{n+1}محاسبه می‌شود. از آنجایی که نانوذره بر نحوه حرکت سیالات در مخزن تاثیر دارد، بنابراین بر روی توزیع اشباع آنها نیز تاثیرگذار است.

– اگر رویدادهایی که می‌تواند باعث تغییر توزیع در طول خط جریان شود اتفاق بیفتد (به عنوان مثال باز یا بسته بودن چاه، تغییر چاه، جابجایی لایه یا حفاری در چاه) خط جریان نیازمند به روز رسانی و تکرار رویه مراحل اول تا پنجم است. در غیر این صورت توزیع خط جریان نیازمند تغییر نیست و فرم خط جریان برای حل پارامترهای نسبی استفاده می‌شود.

فرآیند بالا تا پایان محاسبات ادامه داده می‌شود. نتایج آن برای مقایسه و تطبیق تاریخچه ارائه می‌شود. فلوچارت شبیه‌سازی عددی با استفاده از خطوط جریان در شکل ۱ ارائه شده‌است[۲۳]. محققین علاقه‌مند به روش خطوط جریان می‌تواند جزییات بیشتر مربوط به این روش را در منابع مربوطه دنبال کنند [۲۴].

۳- نتایج و بحث

در این بخش تلاش می‌شود معادلات حاکم بر جریان آب خالص و نانوسیالات در محیط متخلخل با استفاده از کدنویسی در فضای نرم‌افزار Matlab به کمک مجموعه کد MRST-2020a حل شده و نتایج مربوطه شبیه‌سازی شوند.

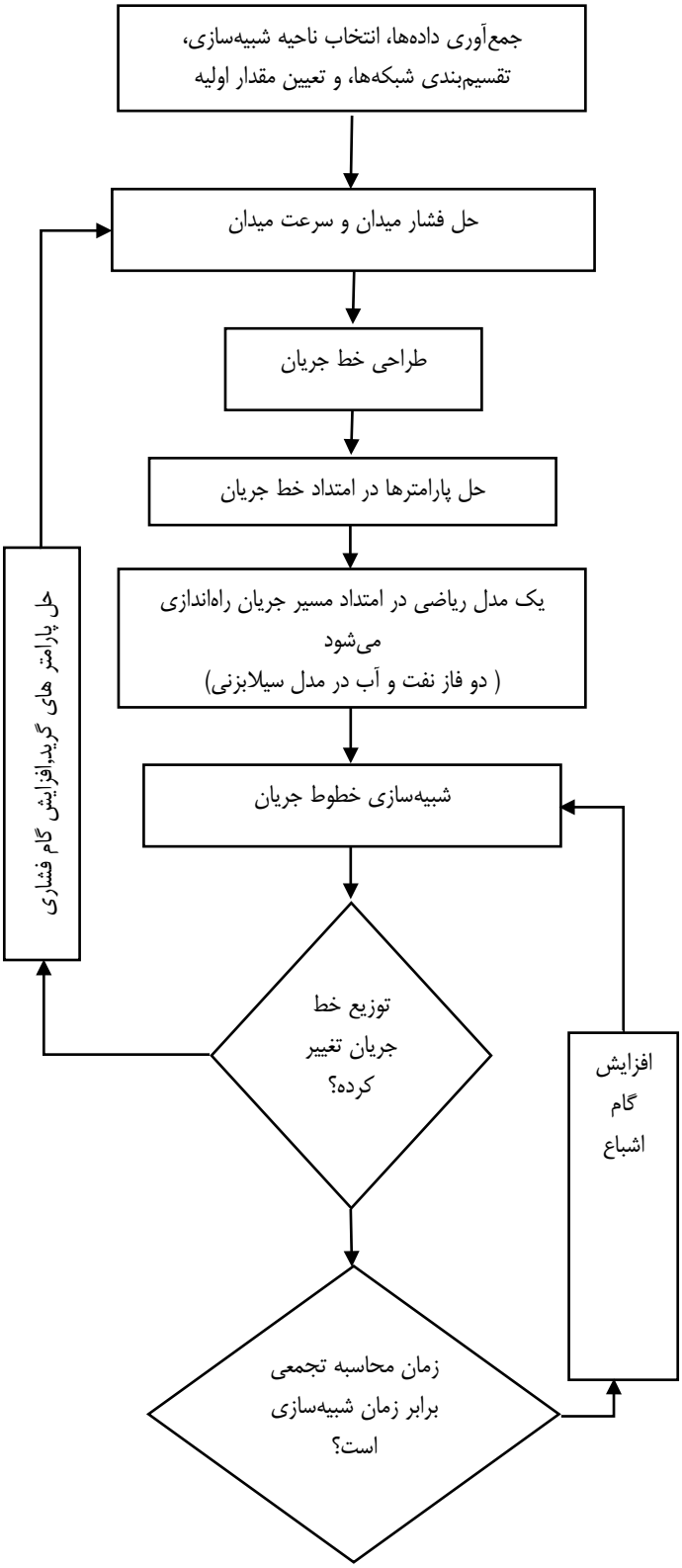
۳-۱- شبیه‌سازی تزریق آب خالص و نانوسیال در مخزن دارای نفت سبک، سنگ آب‌دوست

نتایج شبیه‌سازی تزریق آب خالص (دانسیته ۹۹۸/۲ kg/m^3 و ویسکوزیته ۰/۸۹ cp) و نانوسیال آب–سیلیکا (غلظت ۰/۲۳ درصد حجمی) در مخزن نفت سبک دارای سنگ آبدوست بر پایه خطوط جریان به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌است. سیال مخزن نفت با API برابر با ۳۲/۷ و ویسکوزیته ۰/۵۷ cp در نظر گرفته شده‌است.

این شکل‌ها میزان پیشروی جبهه سیال تزریقی از سمت چاه تزریقی به سمت چاه تولیدی و میزان توزیع اشباع سیال در مخزن نفتی دارای نفت سبک، سنگ آبدوست را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که پیشروی نانوسیال تزریقی خیلی بیشتر از تزریق آب خالص است.

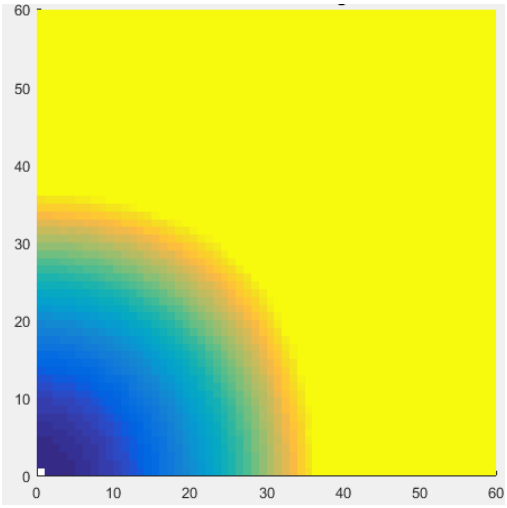
۳-۲- شبیه سازی تزریق آب خالص و نانوسیال در مخزن دارای نفت سنگین، سنگ نفت‌دوست

نتایج شبیه‌سازی تزریق آب خالص و نانوسیال در مخزن نفت سنگین (API برابر با ۱۹/۸ و ویسکوزیته ۲/۲۲ cp) دارای سنگ

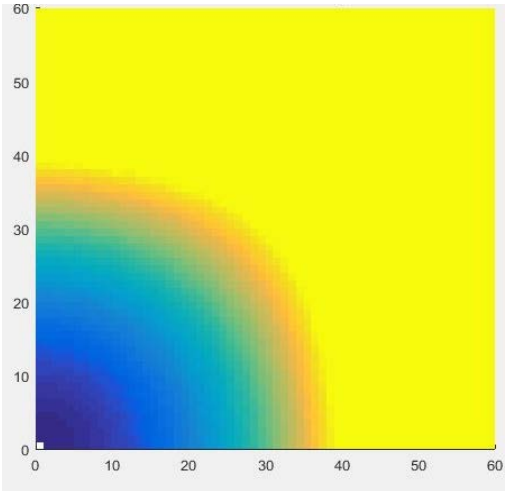


شکل ۱. پروسه شبیه‌سازی عددی به کمک روش خطوط جریان[۵]

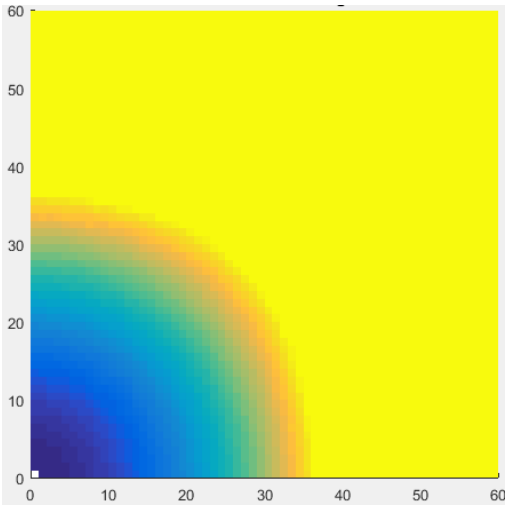
نفت‌دوست با کمک روش خطوط جریان به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده‌است. با مقایسه نتایج دو شبیه‌سازی می‌توان



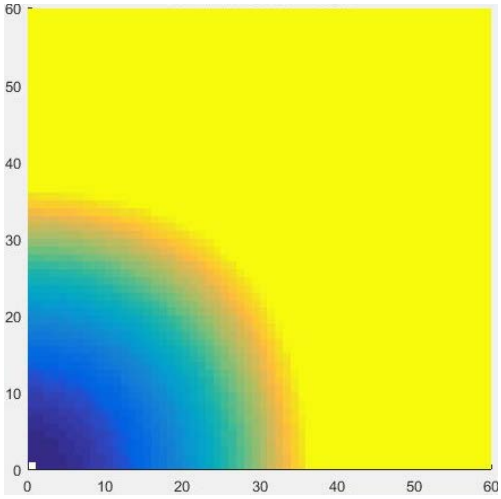
شکل ۲. شبیه‌سازی تزریق آب خالص در مخزن نفت سبک، سنگ آبدوست



شکل ۳. شبیه‌سازی تزریق نانوسیال در مخزن نفت سبک، سنگ آبدوست



شکل ۴. شبیه‌سازی تزریق آب خالص در مخزن نفت سنگین دارای سنگ نفت‌دوست بر پایه روش خطوط جریان



شکل ۵. شبیه‌سازی تزریق نانوسیال در مخزن نفتی نفت‌دوست بر پایه روش خطوط جریان

دریافت که پیشروی جبهه تزریقی نانوسیال از چاه تزریقی به سمت چاه تولیدی تقریبا همانند آب خالص است.

٤- نتیجه گیری

در این تحقیق از روش خطوط جریان برای شبیه‌سازی تزریق آب خالص و نانوسیالات آب-سیلیکا در مخازن حاوی نفت سبک و سنگین در حالت نفت‌دوست و آب‌دوست استفاده شد که نتایج کلیدی به شرح ذیل می‌باشد:

-شبیه‌سازی بر پایه خطوط جریان می‌تواند الگوی جریان، میزان پیشروی و توزیع سیال تزریقی را نشان دهد.

-پیشروی نانوسیال آب-سیلیکا تزریقی در مخزن در حالت آب‌دوست بیشتر از حالت نفت‌دوست است.

-پیشروی نانوسیال و آب خالص در مخزن در حالت نفت‌دوست تقریباً مشابه است.

– نوع نفت موجود در مخزن (سبک و سنگین) تاثیر چشم‌گیری بر روی نتایج شبیه‌سازی ندارد.

مراجع

1. K. Mogensen, S. Masalmeh, J. Pet. Sci. Eng., 195, 107889 (2020).

2. S. Zendehboudi, M. A. Ahmadi, A. R. Rajabzadeh, N. Mahinpey, I. Chatzis, Can. J. Chem. Eng., 91(8), 1439-1449(2013).

3. Z. X. Xu, S. Y. Li, B. F. Li, D. Q. Chen, Z. Y. Liu, Z. M. Li, Pet. Sci., 17, 990-1013 (2020).

4. E. W. Al-Shalabi, K. Sepehrnoori, M. Delshad, (2013, April). Mechanisms behind low salinity water flooding in carbonate reservoirs. In SPE Western Regional & AAPG Pacific Section Meeting 2013 Joint Technical Conference. OnePetro.

5. M. Mahmoudpour, P. Pourafshary, J. Pet. Sci. Eng., 196, 107662(2021).

6. M. R. Aghajanzadeh, P. Ahmadi, M. Sharifi, M. Riazi, J. Pet. Sci. Eng., 178, 700-710 (2019).

7. I. Nowrouzi, A. Khaksar Manshad, A. H. Mohammadi, ACS omega, 7(26), 22161-22172(2022).

8. S. U. S. Choi, J. A. Eastman Heat Transfer Enhancement using Nanofluids. In International mechanical engineering congress and exhibition (1995).

9. M. Almahfood, B. Bai, J. Pet. Sci. Eng., 171, 196-210 (2018).

10. M. S. Alnarabiji, M. M. Husein, Fuel, 267, 117262 (2020).

11. L. Li, M. Khait, D. Voskov, A. Abushaikha, (2020, December). Parallel framework for complex reservoir simulation with advanced discretization and linearization schemes. In SPE Europec. OnePetro.

12. M. J. Blunt, K. Liu, M. R. Thiele, Pet. Geosci., 2(3), 259-269 (1996).

13. K. A. Lie, (2019). An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). Cambridge University Press.

14. M. H. Esfe, S. Esfandeh, J. Mol. Liq., 301, 112094 (2020).

15. N. A. Ogolo, O. A. Olafuyi, M. O. Onyekonwu, (2012, April). Enhanced oil recovery using nanoparticles. In SPE Saudi Arabia section technical symposium and exhibition. OnePetro.

16. M. F. El-Amin, S. Sun, A. Salama, (2013, March). Enhanced oil recovery by nanoparticles injection: modeling and simulation. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. OnePetro.

17. M. Sepehri, B. Moradi, A. Emamzadeh, A. H. Mohammadi, OGST - Revue d'IFP Energies nouvelles, 74, 5 (2019).

18. M.R. Thiele, R. P. Batycky, L. K. Thomas, (2002, September). Miscible WAG simulations using streamlines. In Paper presented at 8th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery—Freiberg (Vol. 3, p. 6).

19. C.J. Seto, K. Jessen, F.M. Orr (2003, February). Compositional streamline simulation of field scale condensate vaporization by gas injection. In SPE Reservoir Simulation Symposium. OnePetro.

20. A.M. AlSofi, M. J. Blunt, SPE Journal, 15(04), 895-905 (2010).

21. A. Al-Huthali, A. Datta-Gupta, J. Pet. Sci. Eng., 43(3-4), 271-300 (2004).

22. M. Ahmadpour, M. Siavashi, M.H. Doranehgard, J. Cent. South Univ., 23, 2630-2637(2016).

23. Y. Jun, (2011). Streamline numerical well test interpretation: theory and method. Gulf Professional Publishing.

24. K.A. Lie, (2019). An introduction to reservoir simulation using MATLAB/GNU Octave: User guide for the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST). Cambridge University Press.

Chemical Research & Nanomaterials(CRN)
crn.shiraz.iau.ir
پژوهش های شیمیایی و نانومواد

Simulation of water-based nanofluids injection into oil reservoirs using the streamline method

N. Milaninasab, B. Vaferi*

Department of Chemical Engineering, Shiraz Branch, Shiraz, Iran

Abstract: The main goal of all reservoir simulators is to predict the flow performance and oil recovery factor. Most commercial simulators solve the equations governing reservoir behavior with the finite difference approach. To solve the three-dimensional equations of flow in a porous media with the finite difference method, the grid dimension has an effect on the simulation results (i.e., divergence). In addition, the simulation of complex reservoirs with a large number of network blocks needs a long computational time. In order to eliminate the effect of block size and increase the speed of simulation, the streamline method has been proposed, which is widely used in the management of hydrocarbon reservoirs. The streamline method can monitor the flow direction in the reservoir, injection efficiency, pore volume, and well allocation coefficient to determine the volume of fluid transferred between injection and production wells. Also, in recent years, many studies have been conducted on the effect of nanofluid injection on the characteristics of oil reservoirs and the increase in oil recovery. Since the streamline method has not been used to simulate the nanofluid injection in oil reservoirs, in this research the effect of water-silica nanofluid injection on the flow equations of phases has been investigated. The simulation results showed that nanofluid injection into the reservoir is more effective than pure water injection and increases oil production. Moreover, it was observed that the reservoir oil type (light and heavy) has an insignificant effect on the simulation results.

Keywords: Enhanced oil recovery, Simulation, Nanofluid injection, Streamline method

*Correspondent Author Email: *behzad.vaferi@gmail.com*