مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1396، دوره 17، شماره 10، ص‌ص 281-291

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

شبیه‌سازی و مدل‌سازی حمل کنده‌ها در حفاری چاه با فوم

علی جعفری نژاد[1]، ابراهیم حاجی دولّو[2*]، سید سعید بحرینیان[3]

1- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

* اهواز، صندوق پستی 61355، hajidae@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 07 تیر 1396

پذیرش: 15 شهریور 1396

ارائه در سایت: 05 آبان 1396

کلید واژگان:

دوفاز

تراکم‌پذیر

غیرنیوتنی

حفاری

چکیده

حفاری زیر تعادلی و حفاری با فشار کنترل شده با فوم به‌علت مزایای زیاد آن مورد توجه شرکت‌های نفتی جهان قرار گرفته است. از مزایای این روش، تولید نفت و گاز از سازند در حین حفاری، سرعت بالای حفاری، طولانی‌تر شدن عمر مته، انتقال بهتر کنده‌ها و کاهش آسیب به سازند است. در این پژوهش حمل کنده‌ها در حفاری با فوم مورد بررسی قرار گرفته است که در آن فوم به‌صورت یک سیال تک‌فاز، همگن، تراکم پذیر و غیرنیوتنی قانون توانی در نظر گرفته شده و فرضیات و معادلات حاکم بر مدل دو سیالی گذرا در دستگاه اویلر-اویلر برای جریان سیال-ذره (فوم و کنده‌ها) بیان شده است. برای گسسته‌سازی معادلات از روش بالادست استفاده شده است و نتایج حاصل از حل عددی در قالب تغییرات فشار، سرعت، غلظت کنده‌ها، کیفیت و چگالی فوم در طول چاه بیان شده‌اند. تاثیر سرعت حفاری، میزان تزریق گاز و مایع، شکل و اندازه‌ی کنده‌ها، پس‌فشار، ورود سیالات سازندی و تولید نفت و گاز بر غلظت کنده‌ها و فشار ته چاه بررسی شده است. فشار ته چاه با افزایش پس‌فشار، اندازه‌ی کنده‌ها، سرعت حفاری و افزایش دبی تزریق گاز و مایع، افزایش یافته و با کاهش آن‌ها کاهش می‌یابد. غلظت کنده‌ها در طول چاه با افزایش دبی تزریق گاز و مایع کاهش یافته و با افزایش اندازه‌ی کنده‌ها، سرعت حفاری و پس‌فشار، افزایش می‌یابد. برای صحت‌سنجی، نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های میدانی حاصل از حفاری چاه FR-1 واقع در ایالت سانتاکاترینای برزیل مقایسه شده که حدود 16.5 درصد خطا داشته است.

Modeling and simulation of cuttings transfer during well drilling with foam

Ali Jafarinezhad, Ebrahim Hajidavalloo*, Seyed Saeed Bahrainian

Department of Mechanical Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
* P.O.B. 61355, Ahvaz, Iran, hajidae@scu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 28 June 2017
Accepted 06 September 2017
Available Online 27 October 2017

Keywords:
Two phase
Compressible
Non-Newtonian
Drilling

ABSTRACT

Underbalanced drilling and managed pressure drilling with foam have been gained attention of the world oil companies due to its many benefits. The advantages of this method include oil and gas production during drilling, high-speed drilling, drill bit life increase, better cutting transfer and reduced formation damage. In this paper cutting handling by foam was investigated in which foam was assumed to be a homogeneous, single-phase, compressible and non-Newtonian fluid whose rheological properties can be well described by power law model. The assumptions and governing equations of transient two-fluid model were expressed in Euler-Euler coordinate for fluid-particle (foam-cuttings). The upstream method is used to discretizing the equations and the results of the numerical solution are reported in the form of pressure, speed, cutting concentration, quality and density of the foam logs along the well. The impact of back-pressure, ROP, injection rate of gas and liquid, shape and size of cuttings, water influx and oil production on cutting concentration and bottom-hole pressure have been investigated. With increasing parameters such as back-pressure, liquid and gas flow rate, size of the cuttings and ROP, bottom hole pressure and cutting concentration increases. Cutting concentration decreases with increasing liquid and gas flow rate and increases by increasing back-pressure, cutting size and ROP. For validating, the results of the numerical solution are compared with field data obtained from well FR-1 located in the Santa Catarina state of Brazil which show about 16.5 percent errors.

1- مقدمه

جهت حفاظت از مخازن هیدروکربنی، کاهش هزینه‌ها و افزایش تولید چاه، حفاری زیر تعادلی و حفاری با فشار مدیریت شده مورد علاقه شرکت‌های جهان است. حفاری زیر تعادلی به یک کاربرد عمومی در سرتاسر جهان تبدیل شده که معمولا برای مخازن با فشار پایین، سازندهای آسیب دیده و تجهیزات حساس به آب مورد استفاده قرار می‌گیرد [1]. هوا، انواع گازها، سیالات هوازده، مه و فوم، برای حفاری زیر تعادلی مورد استفاده قرار می‌گیرند اما از این میان فوم به علت دانسیته‌ی پایین و ویسکوزیته‌ی بالا مزیت‌های ویژه‌ای دارد. سیال فوم شامل آب، مواد شیمیایی و گاز است و از مایع به شکل پیوسته و قطرات ناپیوسته گاز تشکیل شده است. نحوه‌ی مدل‌سازی جریان

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Jafarinezhad, E. Hajidavalloo, S. S. Bahrainian, Modeling and simulation of cuttings transfer during well drilling with foam, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 281-291, 2017 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

فوم مسئله‌ی اساسی در طراحی‌های هیدرولیکی به‌منظور پیش‌بینی دقیق فشار ته چاه و همچنین بهینه‌سازی پارامترهای قابل کنترل برای حمل بهتر کنده‌ها است.

برای مدل‌سازی می‌توان فوم را به‌صورت یک سیال تک‌فاز، تراکم‌پذیر و غیرنیوتنی که از قانون توانی تبعیت می‌کند، در نظر گرفت [2]. فوم می‌تواند با پمپ کردن آب، گاز و مواد شیمیایی در لوله ونتوری و یا یک لوله مارپیچ[1] و یا با عبور از یک محیط متخلخل تولید شود. از جمله مزایای این روش حفاری تولید نفت و گاز از سازند در حین حفاری، سرعت بالای حفاری، طولانی‌تر شدن عمر مته و انتقال بهتر کنده‌ها است. کنترل فشار ته چاه و حمل مناسب کنده‌ها با تنظیم دقیق میزان تزریق گاز و مایع و پس فشار، انجام می‌شود.

1-1- رئولوژی جریان فوم

رئولوژی[2] مطالعه تغییر شکل سیالات است و رئولوژی جریان فوم موضوع تعداد زیادی از مقالات بوده است که نکات زیر از بررسی و مرور نتایج این مقالات به‌دست آمده است [4,3].

* فوم یک مخلوط نسبتا پیچیده از گاز و مایع بوده که خواص رئولوژیکی آن وابسته به کیفیت فوم (نسبت حجم گاز به حجم کل فوم)، دما، فشار و تنش برشی می‌باشد.
* فوم یک سیال پیزوپلاستیک یا بینگهام پلاستیک است.
* ویسکوزیته‌ی فوم براساس کیفیت فوم و ویسکوزیته‌ی فاز مایع تعیین می‌شود.
* ویسکوزیته‌ی ظاهری فاز مایع با افزایش تنش برشی، کاهش می‌یابد.
* در تنش برشی ثابت با افزایش کیفیت فوم ویسکوزیته‌ی آن افزایش می‌یابد. البته با افزایش کیفیت تا 98 درصد ویسکوزیته‌ی فوم دچار یک کاهش ناگهانی شده در نتیجه ظرفیت حمل کنده در آن کاهش پیدا می‌کند.
* براساس کیفیت فوم چهار نوع رژیم مختلف برای آن مشاهده شده است. 1- رژیم حباب پراکنده برای کیفیت بین 0 تا 54 درصد، فوم در این حالت مانند یک سیال نیوتنی عمل می‌کند. 2- حباب‌های به هم چسبیده در کیفیت 54 تا 74 درصد، 3- حباب‌های تغییر شکل یافته در کیفیت 74 تا 97 درصد و 4-رژیم مه آلود برای کیفیت بالای 97 درصد.
* یک مدل جامع که بتوان آن را بهترین مدل برای افت فشار معرفی کرد، در کیفیت‌های کاربردی (بین 55 تا 95 درصد) وجود ندارد.

تمیزکاری چاه (حمل کنده‌ها) یکی از پارامترهای اصلی موثر بر هزینه، زمان و کیفیت حفاری جهت‌دار، عمودی و چاه‌های چند جانبه است. در حالی که تمیزکاری نامناسب چاه باعث مشکلات هزینه‌بری مانند گیرکردن لوله، پوشیده شدن زود هنگام مته، کاهش سرعت حفاری، ایجاد شکست در سازند و نیروی درگ و اصطکاک زیاد می‌شود.

ویسکوزیته‌ی فوم چندین برابر ویسکوزیته فاز مایع بوده و نسبت به سرعت تزریق فوم و کیفیت (f_g) آن بسیار حساس است. در "شکل 1" آزمایش‌های جریان در گستره‌ی بزرگی از کیفیت فوم در دبی ثابت نشان داده شده است. ویسکوزیته‌ی فوم در کیفیت‌های پایین به صورت آرام افزایش می‌یابد ($f_g < f_{gth1}$)، در محدوده‌ی ($f_{gth1} < f_g < f_{gth2}$) افزایش ناگهانی پیدا می‌کند و در محدوده ($f_{gth1} < f_g$) دچار کاهش ناگهانی می‌شود [5].

گاج‌بهای[3] [6] نقشه‌ی جریان فوم که در "شکل 2" آورده شده را به‌دست آورد. در این شکل f_g^* یک مقدار بحرانی از کیفیت فوم است که زیر این مقدار فوم دارای یک ترکیب پایدار و همگن، به صورت جریان پلاگ[4] و یا الگوی جریان جداشده[5] است و بالای این مقدار جریان شامل یک الگوی جریان تکراری به شکل جریان اسلاگ[6] است. در این شکل سرعت‌های ظاهری به صورت زیر تعریف شده‌اند.

$$U_g = \frac{Q_g}{A_p} \quad (1)$$

$$U_w = \frac{Q_w}{A_p} \quad (2)$$

2-1- سوابق پژوهشی در مورد حمل کنده‌های حفاری با فوم

حمل کنده‌ها به‌وسیله‌ی پارامترهای زیادی مانند زاویه‌ی انحراف، مشخصات لوله حفاری، سرعت زاویه‌ای و خارج از مرکزیت لوله، سرعت حفاری، مشخصات کنده‌ها (اندازه، شکل و تخلخل)، دبی سیال حفاری، سرعت سیال، رژیم جریان، نوع سیال و مشخصات غیر نیوتنی سیال حفاری کنترل می‌شود.

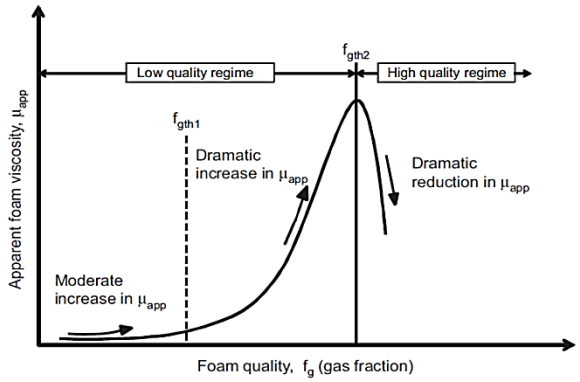

Fig. 1 Change off viscosity off foam [5]

شکل 1 تغییرات ویسکوزیته نسبت به کیفیت [5]

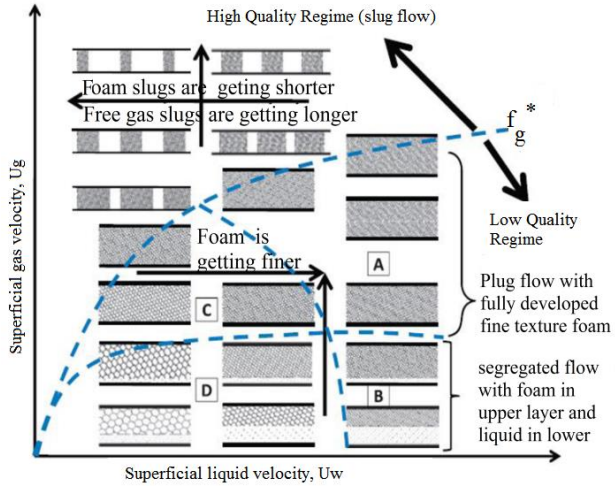

Fig. 2 Foam flow map[6]

شکل 2 نقشه جریان فوم [6]

[1] Coiled tubing
[2] Rheology
[3] Gajbhiye
[4] Plug
[5] Seprated
[6] Slug

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

کراگ و میتچل [7] از معادله‌ی بوکینگهام-رینر برای مدل‌سازی جریان فوم با در نظر گرفتن چگالی، کیفیت، سرعت سیال و کنده‌ها استفاده کردند و از الگوریتم‌های تکراری افت فشار را محاسبه نمودند.

در دهه‌ی هشتاد ماکادو وایکوکو [8] و اکپوبیری و ایکوکو [9] مدلی نیمه تجربی برای حمل کنده‌ها در حفاری با هوا، مه و فوم در چاه‌های عمودی ارائه کردند. اکپوبیری و ایکوکو از الگوریتم‌های تکراری برای محاسبات آنالیز حجمی و محاسبه‌ی فشار تزریق در سیالات قانون توان، استفاده کردند. ایشان اولین کسانی بودند که تاثیر اصطکاک کنده‌ها با دیواره چاه را در مدل خود وارد کردند. معادله دیفرانسیل مدل آن‌ها به‌صورت زیر بود.

$$-\frac{dp}{dx} = \left(C_f\rho_f + C_s\rho_s\right)\frac{g}{g_c} + \left(f_s + f_{Ff}\right)\frac{2\rho_f {u_f}^2}{g_c D_h} \quad (3)$$

ماکادو و ایکوکو [8] ضریب اصطکاک فاز جامد را به صورت زیر بیان نمودند.

$$f_s = \frac{39.36}{\mathrm{Re}_f^{0.9907}}\left(\frac{u_f^2}{g d_p}\right)^{0.0296}\left(\frac{\rho_s}{\rho_f}\right)^{0.1403}\mathrm{Re}_s^{0.3844} \quad (4)$$

هریس و همکاران [10] پیشنهاد دادند که ترکیب فوم و کنده‌ها به صورت همگن در نظر گرفته شود. آن‌ها در هنگام محاسبه خواص مخلوط، کنده‌های حفاری را به عنوان فاز داخلی و غلظت کنده‌ها را به صورت کسر حجمی کنده‌ها به کل سیال محاسبه کردند. این روش افت فشار کمتری نسبت به روش‌های قبلی پیش‌بینی کرد.

لیو و مدلی [11] براساس مدل لورد [12] و اسپورکر و همکاران [13] یک مدل پایای یک بعدی ارائه نمودند. در مدل آن‌ها گاز و کنده‌ها به صورت فاز داخلی و همگن در نظر گرفته شده‌اند. آن‌ها از خواص مخلوط برای حل معادله‌ی انرژی استفاده کردند. ایشان برپایه‌ی این مدل برنامه‌ای کامپیوتری به نام فوم[1] تولید کردند که به کمک مدل‌های قبلی، داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های میدانی صحت‌سنجی شده است.

اووِید [14] مدلی یک بعدی، پایا و همگن ارائه داد. تفاوت عمده کار او با اوکپوبیری و ایکوکو این بود که اووید تاثیر ورود سیالات از سازند به چاه را در نظر گرفت.

والکائو و اکونماید [15] مدلی براساس ترکیب آنالیز حجمی و روش فاز داخلی ثابت برای جریان فوم و ماسه ارائه دادند. ترکیب این دو روش اساس محاسبات جریان فوم و جامد را تشکیل می‌دهد.

جئو و همکاران [16] مدلی تحلیلی برای محاسبه‌ی فشار ته چاه در حفاری انحرافی با فوم بیان کردند. آن‌ها نشان دادند که برخلاف مدل‌های قبلی با توجه به تراکم‌پذیری فوم، غلظت کنده‌ها در نقاط مختلف چاه متفاوت است. مدل آن‌ها بسیار شبیه به مدل اوکپوبیری و ایکوکو بود با این تفاوت که اصطکاک ذرات جامد با دیواره در نظر گرفته نشده است؛ بنابراین فشار ته چاه به‌دست آمده از مدل آن‌ها به‌صورت کلی کمتر از مدل اکپوبیری و ایکوکو است.

پیله‌وری و همکاران [17] در سال 1999 با بررسی سوابق پژوهشی در مورد حمل کنده‌های حفاری بیان کردند به علت پیچیدگی موضوع یک مدل جامع و اثبات شده در آن زمان وجود نداشته است و نیاز به تحقیقات آزمایشگاهی و میدانی بیشتری وجود دارد. بعد از ایشان، چندین مدل تجربی مکانیزم نگر[2] برای حمل کنده‌ها ارائه شده است.

لی و کرو [3] در سال 2003 مدلی یک بعدی و گذرا برای حمل کنده‌ها در حفاری با فوم برای چاه‌های عمودی ارائه نمودند. آن‌ها مدل خود را با هدف پیش‌بینی بیشترین مقدار حمل کنده‌ها توسعه داده و با استفاده از روش‌های عددی حل نمودند. در حل آن‌ها تاثیر پارامترهایی مانند، هندسه‌ی چاه، نرخ حفاری، خواص سیال فوم، دبی تزریق گاز و مایع و دبی ورود سیالات سازندی در نظر گرفته شده است.

پاک‌نژاد [18] در سال 2005 یک برنامه کامپیوتری برای تعیین افت فشار در طول چاه توسعه داد. این برنامه جنبه‌های مختلف حفاری با فوم را مورد بررسی قرار می‌دهد و می‌تواند گراف‌ها و جداول مقایسه‌ای زیادی تولید نماید. در این برنامه تاثیر پارامترهایی از قبیل پس‌فشار، سرعت حفاری، اندازه‌ی و غلظت کنده‌ها، ورود سیالات سازندی، سرعت و نرخ تزریق گاز و مایع مورد بررسی قرار گرفته است.

ازبای‌اگلو [19] در سال 2006 به مطالعه و مدل‌سازی جریان فوم در مسیر سیال حفاری و افت فشار در مته حفاری پرداخت. او توانست با دقت بالایی خصوصیات فوم را محاسبه نموده و با استفاده از مدل دولایه با خطای کمتر از 20 درصد ارتفاع لایه‌ی کنده‌ها و افت فشار چاه را پیش‌بینی کنند.

اوساندو و کرو [20] در سال 2008 مدلی برای حمل کنده‌ها در حفاری با فوم در چاه‌های انحرافی به صورت یک بعدی و گذرا ارائه دادند. آن‌ها با حل عددی این مدل تاثیر عوامل مختلفی مانند، دبی تزریق گاز و مایع، سرعت حفاری، خصوصیات جریان فوم، هندسه و زاویه‌ی انحراف چاه و نرخ ورود سیالات سازندی را بر بازده حمل کنده‌های حفاری بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دبی تزریق گاز بازده حمل کنده‌ها افزایش و با افزایش دبی تزریق مایع کاهش یافته است. علاوه بر این نشان دادند که در حالت پایا غلظت کنده‌ها در ته چاه همواره بیشتر از بالای چاه است.

رضا روکی و همکاران [21] در سال 2013 به کمک حل عددی به مقایسه‌ی مدل‌های قانون توان، بینگهام پلاستیک و هر شل بالکلی برای بیان ویسکوزیته سیال فوم پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که مدل هرشل بالکلی به مقدار جزیی بهتر از سایر مدل‌ها خصوصیات جریان فوم را بیان می‌کند.

بحرینیان و صفاری [22] در سال 2015 به بررسی توزیع اندازه و شکل کنده‌های حفاری در سازند گچساران پرداختند. آن‌ها شکل و اندازه‌ی کنده‌ها را به کمک ضریب کرویت مورد بررسی قرارداده و سطح و حجم آن‌ها را با نرم‌افزارهای تصویربرداری محاسبه کردند. ایشان بیان کردند که چگالی کنده‌ها ($2.47\ (g/cm^3)$، بیشترین فراوانی کنده بین 1.2 و 2.6 میلی‌متر و ضریب کرویت بین 0.64 تا 0.74 به‌دست آمده است.

در تحقیق حاضر برای حل جریان فوم و کنده‌ها در حفاری چاه‌های عمودی از مدل دوسیالی گذرای تراکم‌پذیر استفاده شده و مدل قانون توان برای بیان ویسکوزیته‌ی سیال فوم مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق برای اولین بار تاثیر شکل و اندازه‌ی کنده‌ها در حفاری با فوم در نظر گرفته شده است، علاوه بر این برای افزایش دقت در تراکم‌پذیری فوم، از معادله‌ی بیتی بریجمان استفاده شده است. فوم از سر چاه وارد لوله مغزی شده و به سمت ته چاه پمپ می‌شود، بعداز گذشتن از نازل‌های مته به ته چاه برخورد کرده، کنده‌های حفاری را با خود حمل می‌کند و از طریق دالیز حفاری به سمت بالای چاه حرکت کرده و از چاه خارج می‌شود. نتایج حل با داده‌های میدانی حاصل از حفاری چاه FR-1 واقع در ایالت سانتا کاترینای برزیل مقایسه شده‌اند و حدود 16.5 درصد خطا داشته‌اند.

2- فرضیات و معادلات حاکم

فرضیات زیر برای مدل‌سازی جریان فوم در نظر گرفته شده است.

[1] FOAM
[2] Mechanistic

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

1- فوم یک سیال تک‌فاز، همگن، تراکم‌پذیر و غیرنیوتنی است که خواص رئولوژیکی آن به کمک مدل قانون توان بیان می‌شود.
2- فوم و کنده‌ها به صورت دوفاز سیال-جامد در نظر گرفته شده و با استفاده از مدل دوسیالی در دستگاه اویلر-اویلر مدل‌سازی شده است.
3- هندسه‌ی چاه به صورت دو استوانه‌ی هم مرکز با قطر ثابت در نظر گرفته شده است.
4- آب، نفت و گاز ورودی به چاه بلافاصله با فوم ترکیب شده و تشکیل یک فاز همگن می‌دهد.
5- قبل از شروع حفاری جریان فوم به صورت پایا و توسعه یافته در درون چاه وجود دارد.
6- فوم بعد از عبور از لوله حفاری و نازل‌های مته، کنده‌ها را از ته چاه با خود حمل کرده و به بیرون از چاه انتقال می‌دهد.

2-1- معادلات پیوستگی و مومنتوم

در این تحقیق مدل دوسیالی تک فشار برای بیان جریان مورد استفاده قرار گرفته است. معادله پیوستگی سیال به صورت زیر است.

$$\frac{\partial(\rho_f C_f)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_f u_f C_f)}{\partial x}=S_f \tag{5}$$

S_f در این معادله شامل آب، نفت و گاز است. معادله پیوستگی ذرات جامد نیز به صورت زیر است.

$$\frac{\partial(\rho_s C_s)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_s u_s C_s)}{\partial x}=0 \tag{6}$$

معادله مومنتم سیال به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\frac{\partial(\rho_f C_f u_f)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_f C_f {u_f}^2)}{\partial x}=-C_f\frac{\partial p}{\partial x}-C_f\rho_f g\cos\theta-\frac{1}{2}C_f f_f\rho_f {u_f}^2\frac{S}{A}+\frac{3C_s}{4d_p}\rho_f C_D\left(u_f-u_s\right)^2 \tag{7}$$

معادله مومنتم ذرات جامد به صورت زیر تعریف شده است.

$$\frac{\partial(\rho_s C_s u_s)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_s C_s {u_s}^2)}{\partial x}=-C_s\frac{\partial p}{\partial x}-C_s\rho_s g\cos\theta-\frac{1}{2}C_s f_s\rho_s {u_s}^2\frac{S}{A}+\frac{3C_s}{4d_p}\rho_f C_D\left(u_f-u_s\right)^2 \tag{8}$$

2-2- دانسیته و کیفیت فوم

کیفیت فوم به صورت نسبت حجم گاز به حجم کل فوم تعریف می‌شود.

$$\Gamma=\frac{V_g}{V_g+V_L} \tag{9}$$

چگالی فوم را می‌توان به صورت تابعی از کیفیت فوم به صورت زیر بیان نمود.

$$\rho_f=\Gamma\rho_g+(1-\Gamma)\rho_l \tag{10}$$

2-3- مدل تراکم‌پذیری

گازهای واقعی رفتار متفاوتی با گاز ایده‌آل از خود نشان می‌دهند.

معادله حالت گاز ایده‌آل $Z=\frac{P\bar{V}}{RT}=1$

معادله حالت گاز واقعی $Z=\frac{P\bar{V}}{RT}=1+\acute{B}(T)P+\acute{C}(T)P^2+\cdots$

این مسئله ما را ملزم به استفاده از جداول ترمودینامیکی و یا معادله‌ی حالتی که بتواند رفتار گازهای واقعی را مدل کند، می‌نماید. در این تحقیق از معادله‌ی بیتی بریجمان [23] برای مدل‌سازی رفتار تراکم‌پذیر گاز استفاده شده است.

$$V=\frac{RT}{P}+\frac{\beta}{RT}+\acute{\gamma}P+\acute{\delta}P^2 \tag{11}$$

$$\frac{\beta}{RT}=B_0-\frac{A_0}{RT}-\frac{c}{T^3} \tag{12}$$

$$\frac{\gamma}{RT}=-B_0 b-\frac{A_0 a}{RT}-\frac{B_0 c}{T^3} \tag{13}$$

$$\frac{\delta}{RT}=\frac{B_0 bc}{T^3} \tag{14}$$

$$\acute{\gamma}=\frac{1}{RT}\left[\frac{\gamma}{RT}-\left(\frac{\beta}{RT}\right)^2\right] \tag{15}$$

$$\acute{\delta}=\frac{1}{(RT)^2}\left[\frac{\delta}{RT}-\frac{3\beta\gamma}{(RT)^2}+2\left(\frac{\beta}{RT}\right)^3\right] \tag{16}$$

معادله‌ی بیتی-بریجمان زمانی که نیاز به دقت بالا باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادله علی‌رغم ظاهر آن مرتبه اول است و مزایای زیر را می‌توان برای آن برشمرد.

1- ثوابت عددی موجود در آن به‌صورت یکتا و در یک مرحله از داده‌های دما به‌دست می‌آیند.
2- به علت جبری بودن این معادله به ازای همه‌ی مقادیر دامنه دارای جواب حقیقی است.
3- این معادله در دامنه‌ی وسیعی از دما و فشار جواب‌هایی به خوبی داده‌های تجربی ارائه می‌کند.

2-4- ویسکوزیته‌ی فوم

در این تحقیق فوم به صورت یک سیال غیرنیوتنی که خصوصیات آن به خوبی توسط مدل قانون توان بیان می‌شود، در نظر گرفته شده است. سانقانی و ایکوکو [4] بررسی جامعی روی رئولوژی فوم انجام دادند و توانستند ثوابت قانون توانی شامل اندیس قانون توان و اندیس رفتار جریان را به‌صورت تجربی تعیین کردند. لی [24] در سال 2004 با برازش منحنی از میان داده‌های ارائه شده توسط سانقانی و ایکوکو [4][1] زیر را برای محاسبه‌ی ثوابت قانون به صورت تابعی از کیفیت فوم بیان نمود.

$$K=0.0074.e^{3.5163\Gamma} \qquad \Gamma\le 0.915$$
$$n=1.2085.e^{-1.9897\Gamma} \tag{17}$$
$$K=-2.1474.\Gamma+2.1569 \qquad 0.98>\Gamma>0.915$$
$$n=2.5742.\Gamma-2.1649 \tag{18}$$

معادلات (9) و (10) براساس کیفیت، دو ناحیه‌ی رفتار مختلف را برای فوم نشان می‌دهند. زمانی که کیفیت کمتر از 0.915 باشد K و n به صورت تابعی نمایی از کیفیت بیان می‌شوند و برای کیفیت‌های بالای 0.915 ، K و n به صورت تابعی خطی از کیفیت بیان می‌شوند. برای $\Gamma\le 0.915$ با افزایش کیفیت، ویسکوزیته‌ی ظاهری افزایش می‌یابد و فوم پایدار ایجاد می‌شود. برای $0.96>\Gamma>0.915$ فوم پایدار کم‌کم تبدیل به مه شده و ویسکوزیته‌ی آن نیز کاهش می‌یابد. برای $\Gamma\ge 0.96$ مه تشکیل می‌شود. بیشترین مقدار پیشنهاد شده برای کیفیت فوم 0.96 است که در عملیات حفاری باید از آن اجتناب شود [4].

3- سایر معادلات

به دلیل ویسکوزیته‌ی بالا و دانسیته‌ی پایین بیشتر فرایندهای حفاری با فوم در صورتی که کیفیت از 55 درصد کمتر نشود، در شرایط جریان آرام نیز به خوبی عملیات تمیزکاری چاه را انجام می‌دهند. در این حالت ضریب اصطکاک مودی مورد استفاده قرار می‌گیرد ($f=64/\mathrm{Re}$). برای جریان آشفته از مدل ارائه شده توسط مارتین استفاده شده است.

$$f_f=0.0454+0.645\mathrm{Re}_{\mathrm{gn}}^{-0.7} \tag{19}$$

در این رابطه Re از به صورت زیر محاسبه شده است.

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{gn}}=\frac{8^{1-n}\rho_f u_f^{2-n}d^n}{K\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n} \tag{20}$$

چِین [25] عبارتی برای ضریب درگ در سیالات قانون توان ارائه نمود که می‌تواند برای اجسام غیرکروی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

$$C_D = \frac{30.0}{N_{\mathrm{Rep}}} + \frac{67.289}{e^{5.03\psi}}$$
$$0.2 \le \psi \le 1.0 \qquad 0.001 < N_{\mathrm{Rep}} < 200{,}000 \tag{21}$$
$$N_{\mathrm{Rep}} = \frac{\rho_s u_s d_p}{10\mu} \tag{22}$$

4- شرایط اولیه و مرزی

در این تحقیق فرض شده که جریان پایای فوم قبل از شروع حفاری درون چاه ایجاد شده است بنابراین میدان فشار و سرعت و خصوصیات جریان محاسبه شده و به عنوان مقدار اولیه در نظر گرفته شده است.

اعمال صحیح شرایط مرزی تاثیر بسیار زیادی بر روی یک حل عددی دارد. در یک معادله‌ی هایپربولیک به تعداد مشخصه‌های مثبت، بایستی شرط مرزی در ورودی جریان و به تعداد مشخصه‌های منفی شرط مرزی فیزیکی در خروجی لوله تعیین شود، معادلات مورد بررسی دارای سه مشخصه‌ی مثبت و یک مشخصه‌ی منفی هستند. مطالعه‌ی کاملی بر مشخصه‌های مدل چهار معادله‌ای در مرجع [26] آورده شده است. در جریان‌های دوفازی در صنایع نفت و گاز، معمولا دبی فازهای مایع و جامد در ورودی و فشار در خروجی موجود هستند. ولی متاسفانه در شرایط واقعی تعیین شرط مرزی سوم در ورودی عملا امکان‌پذیر نیست و بایستی به‌گونه‌ای دیگر تعیین شود. با جمع کردن معادلات مومنتم سیال و جامد، نیروی درگ بین سیال و ذرات جامد حذف می‌شود. در شرایط پایا، با حذف ترم‌های مربوط به شتاب، معادله افت فشار در حالت پایا به صورت زیر به‌دست آمده است.

$$-\frac{\partial p}{\partial s} = C_s\rho_s g\cos\theta + C_f\rho_f g\cos\theta + \frac{1}{2}C_s f_s \rho_s {u_s}^2\frac{S}{A} + \frac{1}{2}C_f f_f \rho_f {u_f}^2\frac{S}{A} \tag{23}$$

با دانستن سرعت‌ها از شرط مرزی اول و دوم به کمک معادله‌ی فوق کسر حجمی کنده‌ها محاسبه شده و به عنوان شرط مرزی سوم مورد استفاده قرار گرفته است [26]. شبکه‌ی حل و شرایط مرزی در "شکل 3" نشان داده شده‌اند. در انتها باید توجه کرد که فقط برای حل جریان در دالیز حلقوی 4 شرط مرزی نیاز است که به کمک معادله (23) کامل شد.

5- روش حل عددی

در این تحقیق برای حل معادلات حاکم و تحلیل نتایج از کدنویسی در محیط متلب[1] استفاده شده است و معادلات حاکم به صورت اختلاف بالادست گسسته‌سازی شده‌اند. از گسسته‌سازی معادلات پیوستگی فوم و کنده‌ها عباراتی برای کسر حجمی‌ها به‌دست آمده است.

$$(C_s)_{i+1}^{n+1} = \frac{\frac{\Delta x}{\Delta t}A(\rho_s C_s)_{i+1}^{n} + A(\rho_s C_s u_s)_i^{n+1}}{\frac{\Delta x}{\Delta t}A(\rho_s)_{i+1}^{n+1} + A(\rho_s u_s)_{i+1}^{n+1}} \tag{24}$$
$$\left(C_f\right)_{i+1}^{n+1} = \frac{\frac{\Delta x}{\Delta t}\left(A\rho_f C_f\right)_{i+1}^{n} + \left(A\rho_f C_f u_f\right)_i^{n+1}}{\frac{\Delta x}{\Delta t}\left(A\rho_f\right)_{i+1}^{n+1} + \left(A\rho_f u_f\right)_{i+1}^{n+1}} \tag{25}$$

با گسسته‌سازی معادلات مومنتم فوم و کنده‌ها عبارتی برای سرعت به‌دست آمده است.

$$\begin{aligned}(u_s)_{i+1}^{n+1} = \frac{1}{E_{s_{i+1}}^{n+1}}\Big(&\frac{\Delta x}{\Delta t}(\dot m_s)_{i+1}^{n} + (\dot m_s u_s)_i^{n+1} \\ &+ (C_s A)_{i+1}^{n+1}\left(p_i^{n+1} - p_{i+1}^{n+1}\right) \\ &- \Delta x(C_s A\rho_s g\cos\theta)_{i+1}^{n+1} \\ &+ \Delta x(AB_V)_{i+1}^{n+1}\left(u_f\right)_{i+1}^{n+1}\Big)\end{aligned} \tag{26}$$
$$\begin{aligned}E_{s_{i+1}}^{n+1} = &\frac{\Delta x}{\Delta t}(A\rho_s C_s)_{i+1}^{n+1} + (\dot m_s)_{i+1}^{n+1} \\ &+ \Delta x(AB_V)_{i+1}^{n+1} + \Delta x C_1\end{aligned} \tag{27}$$

[1] Matlab

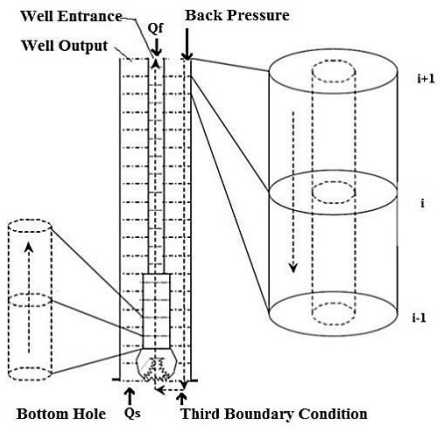

Fig. 3 Computational Grid

شکل 3 شبکه‌ی محاسباتی

$$\begin{aligned}\left(u_f\right)_{i+1}^{n+1} = \frac{1}{E_{f_{i+1}}^{n+1}}\Big(&\frac{\Delta x}{\Delta t}\left(\dot m_f\right)_{i+1}^{n} + \left(\dot m_f u_f\right)_i^{n+1} \\ &+ \left(C_f A\right)_{i+1}^{n+1}\left(p_i^{n+1} - p_{i+1}^{n+1}\right) \\ &- \Delta x\left(C_f A\rho_f g\cos\theta\right)_{i+1}^{n+1} \\ &- \Delta x(AB_V)_{i+1}^{n+1}(u_s)_{i+1}^{n+1}\Big)\end{aligned} \tag{28}$$
$$\begin{aligned}E_{f_{i+1}}^{n+1} = &\frac{\Delta x}{\Delta t}\left(A\rho_f C_f\right)_{i+1}^{n+1} + \left(\dot m_f\right)_{i+1}^{n+1} \\ &+ \Delta x(AB_V)_{i+1}^{n+1} + \Delta x E_1\end{aligned} \tag{29}$$

در سال 1998 کرو روش سیمپل ارائه شده توسط پتنکار را برای مدل دوسیالی تعمیم داد. در روش کرو ابتدا گرادیان فشار به کمک معادله افت فشار پایا تخمین زده شده، سپس با استفاده از معادله‌ی مومنتم میدان سرعت حل می‌شود. برای تکمیل فرایند حل تکراری به معادله‌ای برای تصحیح میدان فشار حدسی نیاز است. این معادله با قرار دادن معادله‌ی تصحیح سرعت در رابطه مجموع کسر حجمی‌ها به‌دست می‌آید [20].

5-1- معادله‌ی تصحیح سرعت

تغییرات سرعت ناشی از اختلاف فشار دو طرف یک گره را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود.

$$\left(\Delta u_f\right)_{i+1}^{n+1} = \left(\frac{\partial u_{f_{i+1}}^{n+1}}{\partial P_i^{n+1}}\right)\Delta P_i^{n+1} + \left(\frac{\partial u_{f_{i+1}}^{n+1}}{\partial P_{i+1}^{n+1}}\right)\Delta P_{i+1}^{n+1} \tag{30}$$
$$(\Delta u_s)_{i+1}^{n+1} = \left(\frac{\partial u_{s_{i+1}}^{n+1}}{\partial P_i^{n+1}}\right)\Delta P_i^{n+1} + \left(\frac{\partial u_{s_{i+1}}^{n+1}}{\partial P_{i+1}^{n+1}}\right)\Delta P_{i+1}^{n+1} \tag{31}$$

مشتقات موجود در معادلات (28) و (29) با مشتق‌گیری از معادلات مومنتم گسسته شده محاسبه شده و بعد از جاگذاری، معادلات تصحیح سرعت به صورت زیر به‌دست آمده اند.

$$\left(\Delta u_f\right)_i^{n+1} = \frac{A\left(C_f\right)_i^{n+1}\left(\Delta P_{i-1}^{n+1} - \Delta P_i^{n+1}\right)}{E_{f_i}^{n+1}} \tag{32}$$
$$(\Delta u_s)_i^{n+1} = \frac{A(C_s)_i^{n+1}\left(\Delta P_{i-1}^{n+1} - \Delta P_i^{n+1}\right)}{E_{s_i}^{n+1}} \tag{33}$$

5-2- معادله‌ی تصحیح فشار

با استفاده از بسط تیلور معادله‌ای برای تغییرات کسر حجمی سیال و جامد به صورت زیر به‌دست آمده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

$$(C_f)_{i+1}^{n+1} = (C_f{}^*)_{i+1}^{n+1} + \left(\frac{\partial C_{f_{i+1}}^{n+1}}{\partial u_{f_i}^{n+1}}\right)\Delta u_{f_i}^{n+1} + \left(\frac{\partial C_{f_{i+1}}^{n+1}}{\partial u_{f_{i+1}}^{n+1}}\right)\Delta u_{f_{i+1}}^{n+1} \quad (34)$$

$$(C_s)_{i+1}^{n+1} = (C_s{}^*)_{i+1}^{n+1} + \left(\frac{\partial C_{s_{i+1}}^{n+1}}{\partial u_{s_i}^{n+1}}\right)\Delta u_{s_i}^{n+1} + \left(\frac{\partial C_{s_{i+1}}^{n+1}}{\partial u_{s_{i+1}}^{n+1}}\right)\Delta u_{s_{i+1}}^{n+1} \quad (35)$$

مشتقات موجود در معادلات بالا با استفاده از معادلات پیوستگی گسسته شده محاسبه می‌شوند. معادله‌ی مجموع کسر حجمی‌ها به صورت زیر است.

$$(C_f)_{i+1}^{n+1} + (C_s)_{i+1}^{n+1} = 1 \quad (36)$$

با جاگذاری معادلات (32) و (33) در معادله‌ی (34) معادله‌ی تصحیح فشار به صورت زیر به‌دست آمده است.

$$L_i^{n+1}\Delta P_{i-1}^{i+1} - \left(L_i^{n+1} + U_i^{n+1}\right)\Delta P_i^{i+1} + \left(U_i^{n+1}\right)\Delta P_{i+1}^{i+1} = 1 - (C_f{}^*)_{i+1}^{n+1} - (C_s{}^*)_{i+1}^{n+1} \quad (37)$$

که در آن

$$L_i^{n+1} = \frac{(A\rho_f C_f)_{i+1}^{n}}{\frac{\Delta x}{\Delta t}(A\rho_f)_{i+1}^{n+1} + (A\rho_f u_f)_{i+1}^{n+1}} \cdot \frac{(AC_f)_i^{n+1}}{E_{f_i}^{n+1}} + \frac{(AC_s)_i^{n+1}}{\frac{\Delta x}{\Delta t}(A)_{i+1}^{n+1} + (Au_s)_{i+1}^{n+1}} \cdot \frac{(AC_s)_i^{n+1}}{E_{s_i}^{n+1}} \quad (38)$$

$$U_i^{n+1} = \frac{(A\rho_f)_{i+1}^{n+1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}(A\rho_f C_f)_{i+1}^{n} + (A\rho_f C_f u_f)_i^{n+1}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}(A\rho_f)_{i+1}^{n+1} + (A\rho_f u_f)_{i+1}^{n+1}\right)^2} \cdot \frac{(AC_f)_{i+1}^{n+1}}{E_{f_{i+1}}^{n+1}} + \frac{(A)_{i+1}^{n+1}\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}(AC_s)_{i+1}^{n} + (AC_s u_s)_i^{n+1}\right)}{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t}(A)_{i+1}^{n+1} + (Au_s)_{i+1}^{n+1}\right)^2} \cdot \frac{(AC_s)_{i+1}^{n+1}}{E_{s_{i+1}}^{n+1}} \quad (39)$$

برای حل ماتریس سه قطری حاصل از معادله‌ی بالا از الگوریتم حل توماس استفاده شده است. به منظور تصحیح میدان فشار جواب معادله‌ی فشرده‌ی تصحیح فشار به مقادیر قبلی فشار افزوده شده سپس معادلات کسر

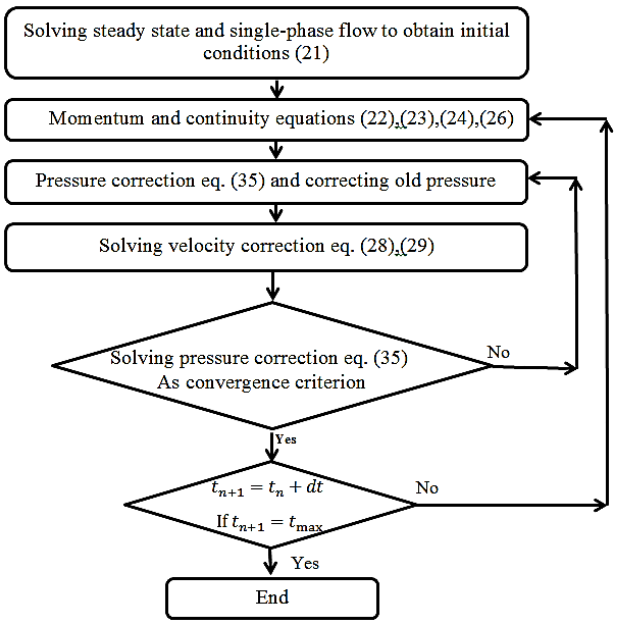

Fig. 4 solution algorithm of Crowe's method

شکل 4 الگوریتم حل روش کرو

حجمی و تصحیح سرعت حل شده‌اند. آنگاه معادلات مومنتم دوباره حل شده و میدان سرعت جدید به‌دست آمده است. آنگاه اگر معادله‌ی تصحیح فشار ارضا شد، گام زمانی بعدی حل می‌شود. این روند تا رسیدن به زمان نهایی ادامه داده شده است. با حل هم‌زمان معادلات حاکم و معادله تراکم‌پذیری و مجموع کسر حجمی‌ها، شش مجهول مورد بررسی که شامل پارامترهای زیر می‌شوند محاسبه شده‌اند.

$$[u_f \quad u_s \quad C_f \quad C_s \quad \rho_f \quad p] \quad (40)$$

6 - ارزیابی مدل با کارهای قبل

در جدول 1 نتایج حاصل از مقایسه‌ی این مدل با مقالات کرو ولی [3] و اکپوبیری و ایکوکو [9] آورده شده است. در این جدول برای هشت حالت مختلف که در آن‌ها پارامترهای کلیدی مانند، عمق چاه، سرعت حفاری (*ROP*)، پس‌فشار و دبی گاز و مایع تغییر کرده است، جریان سیال درچاه حل شده و با مدل‌های قبلی مقایسه شده است. در این مقایسه برای بیان میزان اختلاف موجود از پارامتر فشار ته چاه استفاده شده است و به صورت زیر درصد اختلاف نسبی محاسبه شده است.

$$\text{خطای نسبی} = \frac{\left|\left(\text{فشار ته چاه مدل حاضر}\right) - \left(\text{فشار ته چاه مدل قبلی}\right)\right|}{\left(\text{فشار ته چاه مدل قبلی}\right)} \times 100 \quad (41)$$

در برخی از مدل‌های ارائه شده‌ی قبلی جریان فوم و کنده‌ها به‌صورت همگن در نظر گرفته شده است. در جریان همگن فرض می‌شود که ذرات به صورت یکنواخت در کل سیال پراکنده شده‌اند علاوه بر این سرعت لغزش صفر و ضریب درگ بی‌نهایت در نظر گرفته می‌شود. به‌صورت کلی علل اختلاف موجود را می‌توان به‌صورت زیر بیان نمود.

1- اکپوبیری و ایکوکو از نیروی شتاب در معادله‌ی افت فشار صرف‌نظر کردند. اگر چه تاثیر این نیرو زیاد نیست اما باعث دست بالا تخمین زدن افت فشار می شود.

2- استفاده از فرض عدم لغزش بین کنده‌ها و فوم باعث کاهش غلظت کنده‌ها می‌شود، در نتیجه چگالی مخلوط کاهش می‌یابد، این امر باعث کمتر شدن افت فشار پیش‌بینی شده می‌شود.

3- مدل اصطکاک در نظر گرفته شده برای سیال فوم و کنده‌ها با دیواره اختلاف دارند.

4- در این تحقیق از مدل بیتی بریجمان برای پیش‌بینی تراکم‌پذیری گاز استفاده شده است که دارای دقت بسیار بالایی نسبت به سایر مدل‌ها است.

5- در مدل‌های قبلی اثر شکل و اندازه‌ی کنده‌ها در نظر گرفته نشده است.

پیدا کردن داده‌های میدانی از حفاری با فوم که بتوان از آن‌ها برای مقایسه‌ی نتایج مدل ارائه شده استفاده نمود، کار ساده‌ای نیست. داده‌های اندازه‌گیری شده از چاه FR-1 در ایالت سانتا کاترینای برزیل که با استفاده از فوم پایدار حفاری شده، برای ارزیابی مدل استفاده شده است [28]. داده‌های این چاه به همراه نتایج حل در جدول 2 آورده شده است. نتایج 16.5 درصد اختلاف با داده‌های واقعی را نشان می‌دهد.

7- نتایج و بحث

برای ارائه‌ی نتایج حل و مشاهده‌ی تاثیر عوامل مختلف بر غلظت کنده‌ها، فشار ته چاه، سرعت فوم، چگالی و همچنین ارائه نمودارهای مقایسه‌ای مانند

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

جدول 1 مقایسه نتایج مدل ارائه شده با مدل کرو و مدل اکپوبیری

Table 1 Comparison of this model with kuru's model and okpobiri's model

پارامتر	حالت 1	حالت 2	حالت 3	حالت 4	حالت 5	حالت 6	حالت 7	حالت 8
عمق چاه(ft)	4000	3000	2000	1000	4000	3000	2000	1000
ROP (ft/hr)	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3
پس فشار (kPa)	414	276	276	276	276	276	276	137
دبی تزریق گاز (m^3/h)	1006	702	576	392	1050	731	600	297
دبی تزریق مایع (m^3/h)	11.5	12.3	9.82	6.5	11.7	12.3	9.82	9.82
فشار ته‌چاه ایکوکو و اکپوبیری [9] (MPa)	5.24	3.9	1.67	1.14	5.55	4.15	2.49	1.21
فشار ته چاه کرو و لی [3] (MPa)	4.23	3.32	1.91	0.94	4.49	3.50	1.99	0.98
فشار ته چاه در مدل ارائه شده (MPa)	5.05	3.60	1.76	0.97	5.32	3.74	2.18	1.08
درصد خطای نسبی با مدل ایکوکو و اکپوبیری [9]	3.6	7.7	5.4	15	4.1	9.8	12.4	10.7
درصد خطای نسبی با مدل کرو و لی[3]	19.3	8.4	8.7	3.2	18.5	6.9	9.5	10.2

تاثیر نرخ حفاری، دبی تزریق گاز و مایع، اندازه و شکل کنده‌ها و پس‌فشار بر غلظت کنده‌ها و فشار ته چاه، یک مثال با استفاده از داده‌های جدول 2 حل شده است. نتایج حل در قالب "شکل‌های 4 الی 18" ارائه شده است.

در "شکل‌های 5 تا 8" به‌طورکلی حمل کنده‌ها در حفاری با فوم و حفاری با هوا با یکدیگر مقایسه شده است. "شکل 5 و 6" تغییرات غلظت کنده‌ها در طول چاه را تا رسیدن به حالت پایا برای حفاری با فوم و حفاری با هوا نشان می‌دهند. در این نمودارها سمت چپ مربوط به ته چاه و سمت راست بالای چاه را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها هر منحنی نشان دهنده‌ی کسر حجمی کنده‌ها در طول چاه در زمان تعیین شده است. در ابتدای بازه‌ی زمانی هیچ کنده‌ای در طول چاه وجود نداشته است، اما با گذر زمان کنده‌ها از ته چاه وارد شده و به همراه سیال به بیرون از چاه حمل شده‌اند. نمودار حالت پایا (250 s) نشان می‌دهد که غلظت کنده‌ها در طول چاه یکسان نبوده و در پایین چاه بیشتر از بالای آن بوده است زیرا سرعت سیال و کنده‌ها کاملا به یکدیگر وابسته بوده و در طول چاه تغییر می‌کند (تغییرات سرعت به علت تراکم پذیری است). با توجه به ثابت بودن دبی کنده‌ها (سرعت حفاری ثابت در نظر گرفته شده است)، هرچه سرعت کنده‌ها افزایش یافته است، کسر حجمی (غلظت) آن‌ها کاهش یافته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود غلظت کنده‌ها در حفاری با فوم خیلی کمتر از حفاری با هوا بوده است.

"شکل‌های 7 و 8" سرعت سیال و کنده‌ها را در حفاری با فوم و حفاری با هوا نشان می‌دهند. در حفاری با فوم اختلاف سرعت سیال و کنده‌ها بسیار کمتر از حفاری با هوا بوده و فوم در سرعت‌های دالیزی خیلی کمتر توانسته است کنده‌ها را با سرعت بیشتری حمل کرده و به خارج چاه منتقل کند. سرعت سیال در ته چاه کمترین مقدار را دارد و هرچه به سمت بالای چاه حرکت می‌کنیم سرعت سیال افزایش می‌یابد در نتیجه غلظت کنده‌ها در ته

جدول 2 داده ای میدانی چاه FR-1 [28]

Table 2 Field data of well FR-1 [28]

پارامتر	مقدار
قطر دالیز چاه (cm)	20
قطر داخلی (cm)	11.4
طول چاه (m)	305
دبی جرمی گاز (kg/h)	4.4861
دبی مایع (m^3/h)	35.46
اندازه کنده ها (cm)	1.9
فشار مخزن گاز (kPa)	241.3
پس فشار (kPa)	483
چگالی سیال معادل (ppg)	5.6-5.8
سرعت حفاری (m/hr)	8.23
فشار ته چاه اندازه گیری شده (MPa)	5.83-6.03
فشار ته چاه مدل (MPa)	5.45
درصد خطا	6.45 تا 9.16

جدول 3 داده های استفاده شده برای شبیه‌سازی

Table 3 the data used for simulation

پارامتر	مقدار
قطر دالیز چاه (cm)	20
قطر داخلی (cm)	11.4
طول چاه (m)	305
دبی جرمی گاز (kg/h)	1.6528
دبی مایع (m^3/h)	9.82
اندازه کنده‌ها (cm)	1.9
فشار مخزن گاز (kPa)	158.6
پس فشار (kPa)	276
چگالی فاز جامد (g/cm^3)	2.7
سرعت حفاری (m/hr)	18.3
اندازه ی کنده ها (cm)	1.9
گام زمانی (s)	0.1
گام مکانی (m)	2

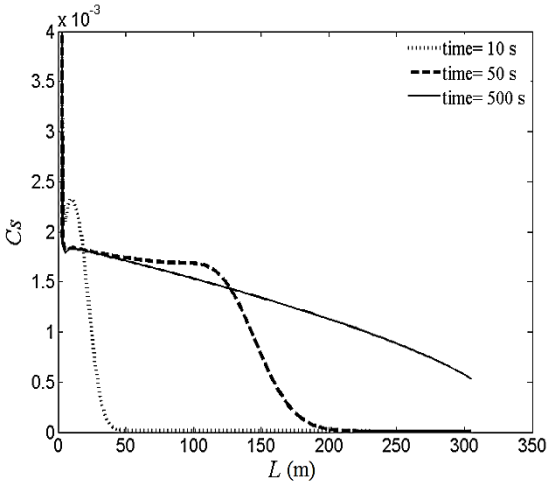

Fig. 5 cutting concentration in passing

شکل 5 غلظت کنده‌ها به صورت گذرا

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

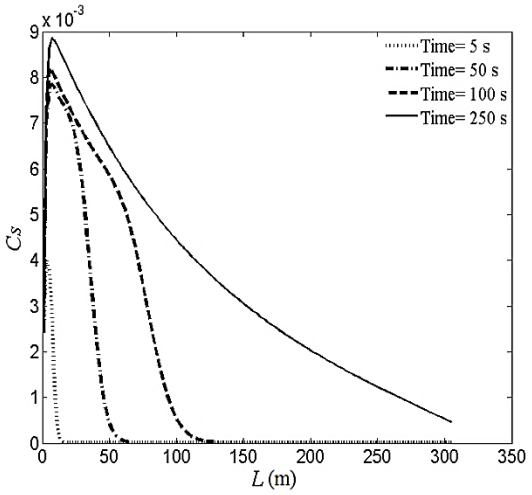

Fig. 6 cutting concentration in passing for air drilling

شکل 6 غلظت کنده‌ها به صورت گذرا در حفاری با هوا

چاه بیشترین مقدار و در بالای چاه کمترین مقدار را داشته است. در این نمودار سرعت ذرات جامد نیز رسم شده است. سرعت ذرات جامد کاملا متاثر از سرعت سیال بوده یعنی با افزایش سرعت سیال، سرعت کنده‌ها نیز افزایش یافته است، اما سرعت لغزش یعنی اختلاف سرعت سیال و ذرات مقدار ثابتی نبوده که می‌تواند ناشی از تغییر سرعت، تغییر کیفیت فوم و تغییر نیروهای درگ و اصطکاک وارد بر کنده‌ها باشد.

در ادامه تاثیر پارامترهای مختلف بر کسر حجمی کنده‌ها و میدان فشار چاه در قالب نمودارهای مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

"شکل‌های 9 و 10" تاثیر سرعت حفاری بر غلظت کنده‌ها و فشار ته چاه را نشان می‌دهند. "شکل 9" بیان می‌کند که با افزایش سرعت حفاری، غلظت کنده‌ها در طول چاه افزایش می‌یابد. "شکل 10" نشان می‌دهد که با افزایش سرعت حفاری فشار ته چاه به مقدار جزیی افزایش یافته است این افزایش فشار به علت افزایش چگالی مخلوط سیال و کنده‌ها بوده است. تغییرات سرعت حفاری باعث تغیر کسر حجمی کنده‌ها شده و تغییر کسر حجمی باعث تغییر چگالی و در پی آن تغییر فشار ته چاه می‌شود اما با توجه به این‌که تغییرات کسر حجمی کنده‌ها در حدود 10^{-3} است تاثیر چندانی بر چگالی مخلوط و در نتیجه فشار ته چاه نداشته است.

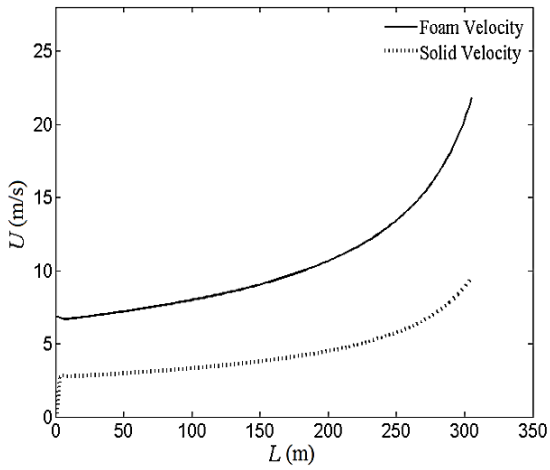

Fig. 7 shows foam cuttings velocity along the well

شکل 7 سرعت فوم و کنده‌ها در طول چاه

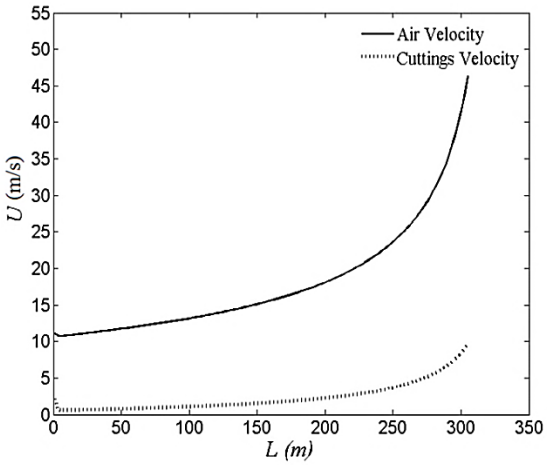

Fig. 8 shows air and cuttings vel $L(\mathrm{m})$ ong the well

شکل 8 سرعت هوا و کنده‌ها در طول چاه

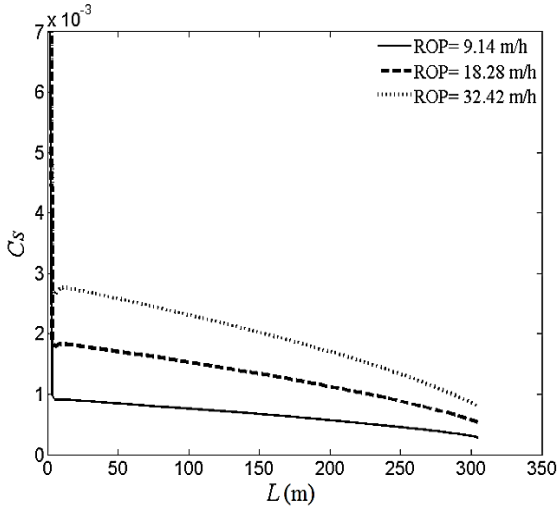

Fig. 9 shows the effect ROP on cutting concentration

شکل 9 تاثیر سرعت حفاری بر غلظت کنده‌ها

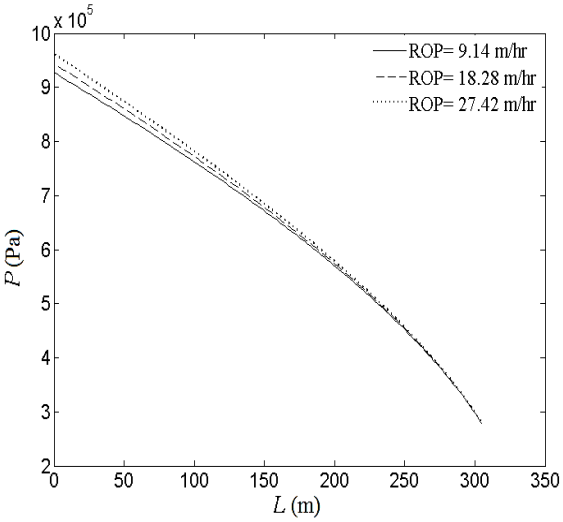

Fig. 10 shows the effect ROP on pressure distribution

شکل 10 تاثیر سرعت حفاری بر توزیع فشار

"شکل‌های 11 و 12" تاثیر تغییرات دبی تزریق گاز بر کسر حجمی کنده‌ها و میدان فشار چاه را نشان می‌دهد. با افزایش دبی تزریق گاز، سرعت فوم

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

افزایش یافته و حمل کنده‌ها بهتر انجام شده و کسرحجمی آن‌ها در طول چاه کاهش یافته است. "شکل 12" تاثیر تغییرات دبی تزریق گاز بر فشار ته چاه را به صورت گذرا نشان می‌دهد. با افزایش دبی تزریق گاز فشار ته چاه به صورت پیوسته افزایش می‌یابد. تغییرات دبی گاز ورودی باعث ایجاد تغییرات عمده در سرعت فوم در دالیز چاه شده و تاثیر زیادی بر افت‌های اصطکاکی دارد. با افزایش دبی تزریق گاز سرعت فوم در چاه افزایش یافته و افت فشار اصطکاکی بیشتر شده است در نتیجه فشار ته چاه افزایش یافته است.

"شکل‌های 13 و 14" تاثیر تغییرات دبی تزریق مایع بر کسر حجمی کنده‌ها و فشار ته چاه را به صورت گذرا نشان می‌دهد. افزایش دبی تزریق مایع باعث بهتر شدن ساختار فوم شده و ویسکوزیته و قدرت حمل کنده‌های آن را افزایش داده است بنابراین کسر حجمی کنده‌ها در طول چاه کاهش یافته است. با افزایش دبی تزریق مایع به چاه میزان مایع موجود در فوم افزایش یافته و چگالی آن بیشتر شده است. با افزایش چگالی فوم نیروهای هیدرواستاتیکی وارد بر ته چاه افزایش یافته و فشار ته چاه بیشتر شده است. همان‌طور که در "شکل 14" نشان داده شده است میزان تزریق مایع به چاه یک پارامتر کنترلی مناسب برای تنظیم فشار ته چاه است که به کمک آن

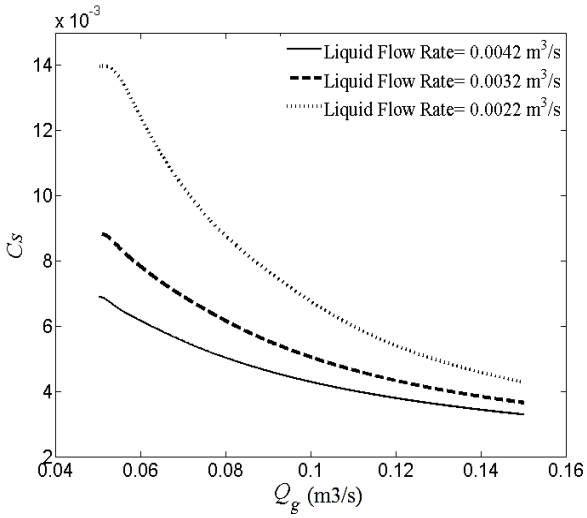

Fig. 11 Effect of gas injection rate on cutting concentration

شکل 11 تاثیر تغییرات دبی تزریق گاز بر کسر حجمی کنده‌ها به صورت گذرا

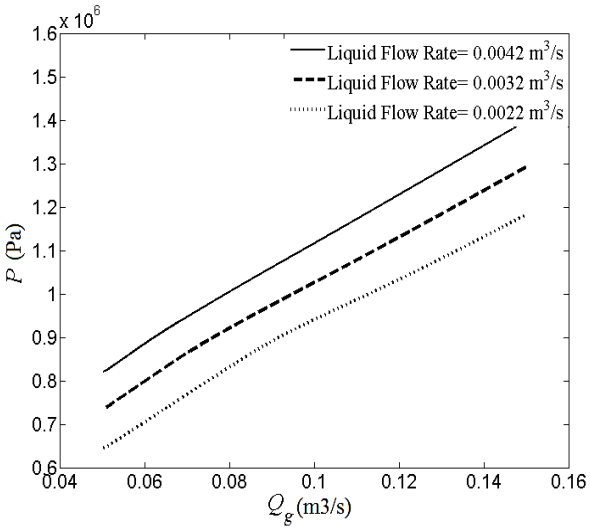

Fig. 12 Effect of gas injection rate on cutting con centration

شکل 12 تاثیر تغییرات دبی تزریق گاز بر فشار ته چاه به صورت گذرا

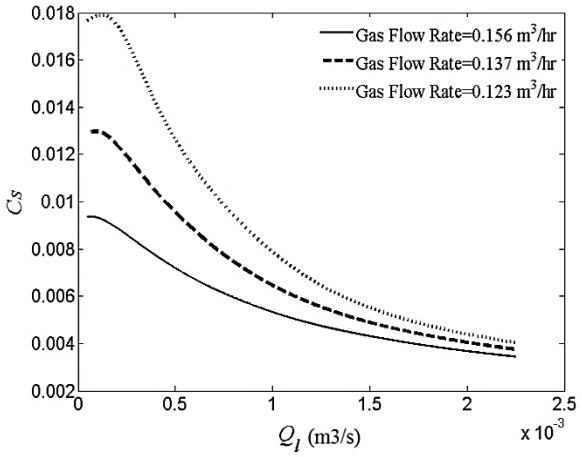

Fig. 13 Effect of liquid injection rate on cutting con centration

شکل 13 تاثیر دبی تزریق مایع بر کسر حجمی کنده‌ها به صورت گذرا

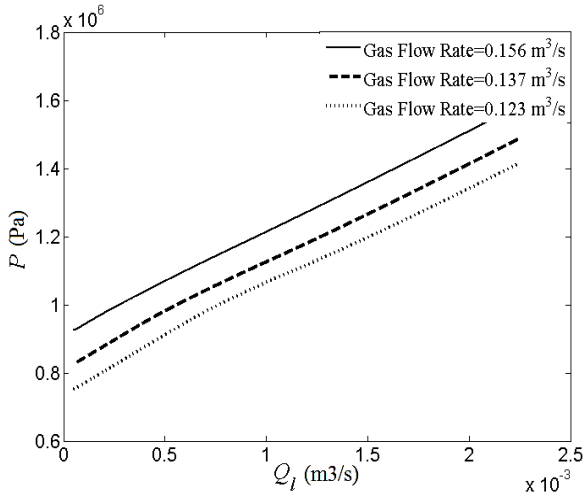

Fig. 14 Effect of liquid injection rate on pressure field

شکل 14 تاثیر دبی تزریق مایع بر فشار ته چاه به صورت گذرا

می‌توان تعادلی یا زیر تعادلی بودن حفاری را کنترل کرد.

"شکل 15" تأثیر اندازه‌ی کنده‌ها بر غلظت آن‌ها را بعد از رسیدن به حالت پایا، نشان می‌دهند. با افزایش اندازه‌ی کنده‌ها توانایی سیال برای حمل آن‌ها کمتر شده و غلظت فاز جامد افزایش یافته است. این افزایش به صورت جهشی بوده است، یعنی با دو برابر شدن قطر ذرات کسر حجمی آن‌ها چهار برابر شده است؛ بنابراین در سازندهایی که در آن‌ها اندازه‌ی کنده‌ها بزرگ‌تر است، باید پارامترهایی مانند سرعت حفاری که باعث افزایش کسر حجمی کنده‌ها می‌شوند، بهتر کنترل شوند.

"شکل 16" تاثیر ضریب شکل ذرات بر کسر حجمی آن‌ها را در طول چاه نشان می‌دهد. هرچه شکل ذرات به حالت کروی نزدیک‌تر شده، غلظت آن‌ها در طول چاه افزایش یافته است؛ یعنی حمل کنده‌های کروی مشکل‌تر از حمل ذرات غیرکروی بوده است.

"شکل 17" نمودار تغییرات چگالی فوم در طول چاه است. در این نمودار تاثیر تغییر پس‌فشار بر چگالی فوم نیز مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به تراکم‌پذیری و تغییرات فشار در طول چاه، در ته چاه چگالی بیشترین مقدار و در بالای‌چاه کمترین مقدار خود را دارد. باتوجه به معادله‌ی پیوستگی و ثابت بودن دبی تزریق گاز، با کاهش چگالی سرعت سیال افزایش می‌یابد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

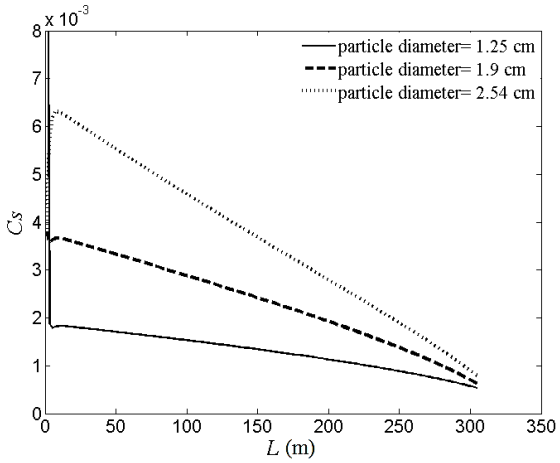

Fig. 15 shows the effect of the cutting size on concentration

شکل 15 تاثیر اندازه کنده‌ها بر غلظت کنده‌ها

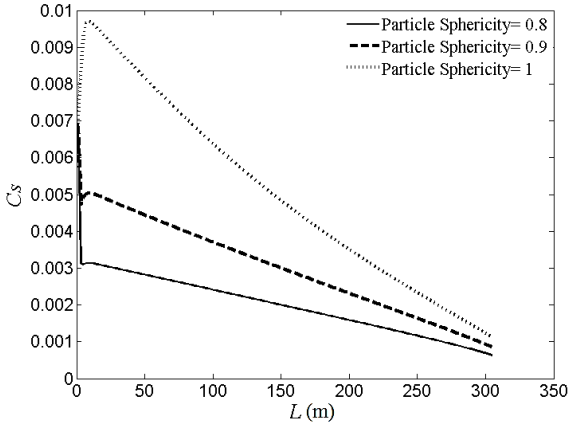

Fig. 16 showes the effect of sphericity on cutting concentration

شکل 16 تاثیر میزان کروی بودن بر غلظت کنده‌ها در طول چاه

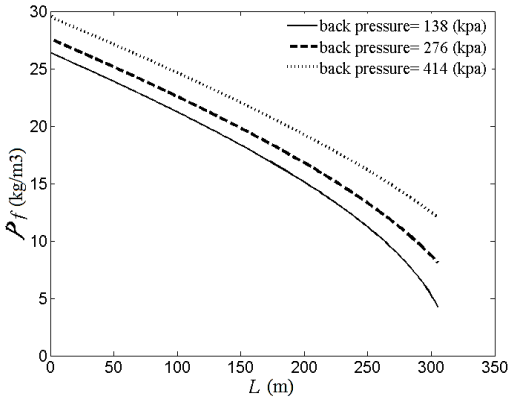

Fig. 17 foam density and compressibility during well

شکل 17 چگالی و تراکم‌پذیری فوم در طول چاه

"شکل 18" تاثیر ورود آب از سازند به چاه را بر میدان فشار چاه نشان می‌دهد. با افزایش ورود آب به چاه میزان مایع موجود در فوم افزایش یافته و چگالی آن بیشتر شده است. با افزایش چگالی فوم نیروهای هیدرواستاتیکی افزایش یافته و فشار ته چاه افزایش یافته است. PI اندیس تولید مخزن است که رابطه‌ی آن با دبی ورود سیالات به چاه به‌صورت زیر بیان شده است [2].

$$S_{\mathrm{L}} = \frac{\rho_{\mathrm{L}} PI_{\mathrm{L}} (P_{\mathrm{Re}} - P)}{A} \tag{42}$$

در حفاری زیر تعادلی به‌دلیل کمتر بودن فشار ته چاه از فشار مخزن، نفت و گاز از مخزن به چاه سرازیر می‌شود. وگل رابطه زیر را برای محاسبه‌ی میزان دبی نفت و گاز تولید شده پیشنهاد کرده است [27].

$$\frac{q}{q_{\max}} = 1 - 0.2\left(\frac{BHP}{P_{\mathrm{R}}}\right) - 0.8\left(\frac{BHP}{P_{\mathrm{R}}}\right) \tag{43}$$

در این معادله BHP فشار ته چاه، P_R فشار مخزن و $q_{\max}$ بیشترین دبی خروج نفت و گاز از مخزن با فرض صفر بودن فشار ته چاه است.

"شکل 19" تاثیر تولید نفت و گاز را بر میدان فشار چاه نشان می‌دهد. با ورود نفت به چاه میزان مایع موجود در فوم افزایش یافته و چگالی بیشتر شده است. با افزایش چگالی فوم نیروهای هیدرواستاتیکی افزایش یافته و فشار ته چاه افزایش یافته است. علاوه بر این با افزایش ورود نفت به سازند کیفیت فوم کاهش یافته است، اما با ورود گاز به چاه سرعت فوم در چاه افزایش یافته و افت فشار اصطکاکی و فشار ته چاه بیشتر شده است.

8- نتیجه‌گیری

1- یک مدل مکانیزم‌نگر گذرای یک بعدی برای حمل کنده‌ها در حفاری با فوم در چاه‌های عمودی ارائه شده و به صورت عددی با استفاده از الگوریتم سیمپل اصلاح شده حل شده است. نتایج حاصل با مدل‌های قبلی و گزارش‌های میدانی مقایسه شده و همخوانی خوبی را نشان داده است.

2- تاثیر اندازه و شکل کنده‌ها بر غلظت ذرات در طول چاه مورد بررسی

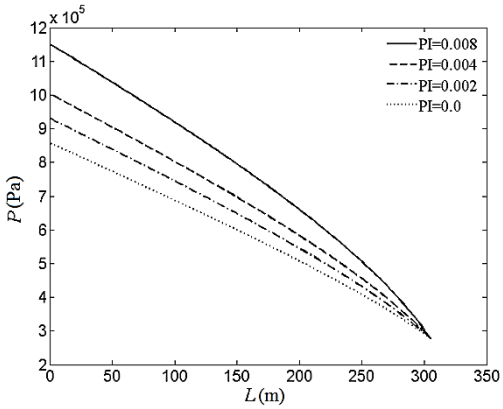

Fig. 18 effect of water influx on pressure field

شکل 18 تاثیر ورود آب از سازند بر میدان فشار چاه

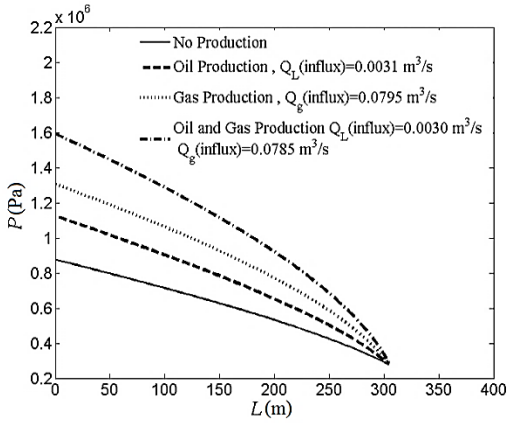

Fig. 19 Effect of oil and gas production on pressure field

شکل 19 تاثیر تولید نفت و گاز بر میدان فشار چاه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]

قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش قطر کنده‌ها غلظت ذرات به شدت در طول چاه افزایش یافته و حمل کنده‌ها مشکل‌تر شده است.

3- با شروع فرآیند حفاری فشار ته چاه آرام آرام افزایش می‌یابد و برای رسیدن به حالت پایا نیاز به گذشت زمان است. با افزایش سرعت حفاری این زمان افزایش می‌یابد.

4- با توجه به تراکم‌پذیری فوم، چگالی، کیفیت، ویسکوزیته و در نتیجه سرعت سیال و کنده‌ها در نقاط مختلف چاه تغییر کرده‌اند. سرعت سیال در ته چاه کمتر و در بالای چاه بیشتر می‌شود این امر باعث شده است که غلظت کنده‌ها در ته چاه بیشتر از بالای چاه شود.

5- با افزایش دبی تزریق مایع و گاز فشار ته چاه افزایش می‌یابد این مسئله ناشی از تغییر چگالی و سرعت فوم می‌باشد.

6- حفاری با فوم در مقایسه با حفاری با هوا می‌تواند در سرعت‌های دالیزی کمتر حمل کنده‌ها را به شکل بهتری انجام داده و غلظت کنده‌ها را در ته چاه کمتر کند.

7- هرچه شکل کنده‌های حفاری از حالت کروی فاصله می‌گیرد، حمل آن‌ها آسان‌تر شده و غلظت کنده‌ها در طول چاه کمتر شده است. یا به عبارتی دیگر هرچه شکل کنده‌ها کروی‌تر باشد حمل آن‌ها مشکل‌تر خواهد بود.

9- فهرست علائم

C_f	کسر حجمی فوم
C_s	کسر حجمی جامد
d_p	قطر ذرات جامد
D_h	قطر هیدرولیکی
f_f	ضریب اصطکاک فوم با دیواره
f_s	ضریب اصطکاک ذرات جامد با دیواره
K	اندیس رفتار
n	اندیس توان
N_{Rep}	عدد رینولز ذرات
R	ثابت جهانی گازها
Re	عدد رینولز
ROP	سرعت حفاری
u_f	سرعت فوم
u_s	سرعت جامد
P	فشار
S	مساحت دالیز حلقوی

علائم یونانی

Γ	کیفیت فوم
ρ	چگالی

زیر نویس‌ها

f	فوم
s	ذرات جامد

10- مراجع

[1] A. Shadravan, M. Khodadadian, A. Roohi, M. Amani, Underbalanced drilling in depleted formation achieves great success: case study, *The EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition*, Amsterdam, The Netherlands, 8-11 June 2009.

[2] O. Osunde, E. Kuru, Numerical modelling of cuttings transport with foam in inclined wells, *The Open Fuels & Energy Science Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 19-33, 2008.

[3] Y. Li, E. Kuru, Numerical modeling of cuttings transport with foam in vertical wells, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 44, No. 3, pp. 31-39, 2005.

[4] V. Sanghani, C. U. Ikoku, Rheology of foam and its implication in drilling and cleanout operations, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 362-371, September 1983.

[5] A. R. Edrisi, *Experimental and Modeling Study of Foam Flow in Pipes with Two Foam-Flow Regimes*, MSc Thesis, University of Tehran, Tehran, 2013. (in Persian فارسی)

[6] R. Gajbhiye, *Characterization of Foam Flow in Pipes Using Two Flow Regime Concept*, PHD Thesis, Pune University, 2011.

[7] J. A. Krug, B. J. Mitchell, Charts help find volume pressure needed for foam drilling, *Oil and Gas Journal*, Vol. 160, No. 9, pp. 61-64, 1972.

[8] C. J. Machado, C. U. Ikoku, experimental determination of solids fraction and minimum volumetric requirements in air and gas drilling, *Journal of Petroleum Technology*, Vol.34, No. 11 pp. 2645-2655, 1982.

[9] G. A. Okpobiri, C. U. Ikoku, Volumetric requirements for foam and mist drilling operations, *Society of Petroleum Engineering Journal, Drilling Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 71-88, 1986.

[10] P. C. Harris, D. E. Klebenow, D. P. Kundert, Constant-Internal-phase design improves stimulation results, *Proceedings of The SPE Production Engineering Conference*, 15, February 1991.

[11] G. H. Medley, G. Liu, Development and testing of underbalanced drilling products, *prepared under the contract number DE-AC21-94MC31197*, Morgantown, West Virginia, September 1995.

[12] D. L. Lord, Analysis of dynamic and static foam behavior, *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 39-45, 1981.

[13] H. F. Spoerker, P. Terpess, P. Valko, M. J. Econmides, System design for the measurement of downhole dynamic rheology for foam fracturing fluids, *SPE 22840, SPE ATCE*, Dallas, November 6-9, 1991.

[14] J. F. Owayed, *Simulation of Water Influx During Underbalanced Foam Drilling*, PhD Thesis, University of Tulsa, 1997.

[15] P. Valko, M. J. Economides, Foam-Proppant Transport, *SPE Production & Facilities* 12 *Conference*, No. *04*, November, 1997.

[16] B. Guo, S. Miska, G. Hariland, A simple approach to determination of bottom hole pressure in directional foam drilling, *ASME Drilling Technology Symposium Conference*, PD-Vol. 65, pp. 329-338, 1995.

[17] A. Pilevari, J. J. Azar, S. A. Shirazi, State of the art cuttings transport in horizontal wells, *J. SPE Drilling and Completion*, Vol. 14, No. 3, pp. 196-200, 1999.

[18] A. S. Paknejad, J. J. Schubert, M. Amani, Foam drilling simulator, *SPE Middle East Oil and Gas Show Conference*, bahrain, 11-14 march 2007.

[19] E. M. Ozbayoglu, E. Kuru, S. Miska, N. Takach, Cuttings transport with foam in horizontal & highly-inclined wellbores, *SPE/IADC Drilling Conference*, 2003.

[20] S. O. Osunde, E. Kuru, Numerical modelling of cuttings transport with foam in inclined wells, *The Open Fuels & Energy Science Journal*, Vol. 1, pp. 19-33, 2008.

[21] R. Rooki, F. D. Ardejani, A. Moradzadeh, R. Norouzi, Numerical investigation of foam drilling fluid flow in the oil wells annulus, *MME Journal*, Vol. 13, No. 13, pp. 74-86, 2013.

[22] S. S. Bahrainian, V. Safari, Effect of shape and size of cuttings on drilling operation, *4th Conference off Hydrocarbon Tanks*, 2015. (in Persian فارسی)

[23] J. A. Beattie, O. C. Bridgeman, A new equation of state for fluids, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, Vol. 63, No. 5, 1928.

[24] Y. Li, *Numerical Modeling of Cuttings Transport with Foam In Vertical and Horizontal Wells*, Ph.D. Thesis, University of Alberta, August 2004.

[25] S. F. Chien, Settling velocity of irregularly shaped particles, *Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibitiong*, New Orleans, Sept. 25-28, 1994.

[26] Y. Shekari, *Transient and Non-Isothermal Two-Phase Flow Simulations Using the Compressible Two Fluids Model*, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, shahid chamran University, Ahvaz, 2013. (in Persian فارسی)

[27] S. Ghobad Pouri, E. Hajidavalloo, Numerical simulation of under-balanced drilling operations with oil and gas production from reservoir using single pressure two-fluid model, *MME Journal*, Vol. 16, No. 6, pp. 291-302, 2016.

[28] A. C. V. M., Lage, E. Y. Nakagawa, A. A. De Souza, F. Santos, Recent case histories of foam drilling in Brazil, *SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference*, Society of Petroleum Engineers, 1996.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.10.42.0]