

## مشخصات جریان سه فازی گاز- مایع- جامد در فضای حلقوی یک چاه تحت عملیات

### حفاری زیر تعادلی

سعید قبادپوری

استادیار دانشکده نفت و گاز دانشگاه یاسوج  
Sghy\_790@yahoo.com

#### چکیده

در این مقاله با رویکردی عددی مبتنی بر مدل چند سیالی تک فشاری جریان دائم سه فازی گاز- مایع- جامد در دالیز یک چاه با طول و ابعاد واقعی تحت عملیات حفاری زیر تعادلی همراه با تولید همزمان نفت و گاز از مخزن شبیه‌سازی شده است. کد عددی براساس معادلات یک بعدی پایا در یک مرجع اولیری تهیه شده و صحت نتایج آن با استفاده از داده‌های تجربی یک چاه واقعی، مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام شده در مقایسه با سایر تحقیقات از دقت بهتری برخوردار است. با توجه به اهمیت کنترل مشخصات جریان در طول دالیز در حین عملیات حفاری، تاثیر دبی تزریقی فازهای مایع و گاز از سر چاه و فشار خروجی از دالیز بر روی مشخصات جریان شامل کسرهای حجمی و سرعت فازها مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج بدست آمده، تاثیر تغییر دبی تزریقی فازهای مایع و گاز بر مشخصات جریان در ناحیه‌ی نزدیک به ته چاه بیشتر از ناحیه‌ی سرچاهی است در حالی که تغییرات فشار چوک، بیشتر مشخصات جریان در ناحیه‌ی سرچاهی را دچار تغییر می‌کند. بنابراین بسته به موقعیت مورد نیاز جهت تغییر مشخصات جریان، می‌توان از پارامتر کنترلی مناسب استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** حفاری زیر تعادلی، شبیه‌سازی عددی، جریان سه‌فازی گاز- مایع- جامد

#### ۱- مقدمه

دو فشار مهم در طی عملیات حفاری، فشار ناشی از سیال حفاری و فشار سازند<sup>۱</sup> می‌باشد. بر مبنای قیاس بین این دو فشار تکنیک‌های مختلف حفاری تعریف می‌شوند. رایج‌ترین شیوه حفاری، حفاری بالای فشار تعادلی<sup>۲</sup> است. در این نوع حفاری، فشار ناشی از سیال حفاری از فشار سازند بیشتر است در نتیجه سیال حفاری و کنده‌های ناشی از حفاری به درون سازند نفوذ می‌کنند و سبب هدر روی سیال حفاری و همچنین آسیب‌دیدگی سازند می‌شوند که در نتیجه آن، ضریب بهره‌دهی چاه هنگام بهره‌برداری کم می‌شود. در صورتی که فشار سیال حفاری کمتر از فشار سازند باشد، تکنیک حفاری را حفاری زیر فشار تعادلی<sup>۳</sup> می‌گویند. در روش زیر تعادلی، سیال حفاری بواسطه فشار کمترش نسبت به فشار سازند هیچ‌گونه نفوذی به مخزن ندارد بنابراین مشکل آسیب‌دیدگی سازند در حفاری زیر تعادلی برطرف می‌شود. بعلاوه آنکه در عملیات حفاری زیر تعادلی، عمر مته، نرخ نفوذ مته، سرعت حفاری نیز بیشتر است و به محض ورود عملیات حفاری به یک ناحیه بهره‌ده، می‌توان همزمان با عملیات حفاری، برداشت هیدروکربن از مخزن را نیز داشت که این امر از نظر اقتصادی بسیار حائز اهمیت است.

در عملیات حفاری زیر تعادلی با استفاده از تزریق جریان دوفازی گاز- مایع درون لوله حفاری و همچنین کنترل فشار خروجی چاه، فشار ته چاه را به گونه‌ای کنترل می‌کنند که همواره کمتر از فشار سازند باشد. سیال دوفازی تزریق شده از سرچاه پس از عبور از لوله حفاری و همچنین مته حفاری وارد فضای حلقوی بین لوله حفاری و جداره سازند می‌شود و با حمل

<sup>1</sup>. Formation

<sup>2</sup>. Over Balanced Drilling (OBD)

<sup>3</sup>. Under Balanced Drilling (UBD)

کننده‌های ناشی از عملیات حفاری به صورت جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد از طریق دالیز به سطح چاه برمی‌گردد. در خروجی دالیز فشار کنترل و برابر با فشار چوک<sup>۴</sup> است. جهت طراحی و بهینه‌سازی یک عملیات حفاری موفق، درک و شناخت کافی از جریان سیال حفاری با توجه به وظایف خطیر و مهم آن از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. از این رو، شبیه‌سازی و تحلیل جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد در عملیات حفاری زیرتعدالی جهت بدست آوردن مشخصات جریان، شرایط بهینه عملکردی و بررسی تاثیر پارامترهای کنترلی مختلف بر مشخصات جریان اهمیت فراوانی دارد.

یکی از جامع‌ترین تحقیقات با رویکرد عددی در این زمینه، در برگن نروژ صورت پذیرفته است و نرم‌افزار ارائه شده دینا فلو دریل<sup>۵</sup> نام دارد. تئوری حاکم بر دینامیک سیالات این نرم‌افزار در قالب مقالات [۱-۳] و مشخصات مخزن در مقالات [۴] و [۵] تشریح شده است. در این نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی یک‌بعدی از معادلات بقاء جرم برای هر جزء و یک معادله مومنتم کلی برای همه اجزاء و تعدادی رابطه کمکی استفاده شده است. علی‌رغم قابلیت‌های بسیار زیاد این نرم‌افزار، مدل به کاررفته برای معادله مومنتم مدلی ساده شده است و فرض شده که سرعت تمامی سیالات یکسان است. این نرم‌افزار پارامترهای جریان را در برخی حالات با خطایی نزدیک ۱۰٪ پیش‌بینی می‌کند. فن و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۱، یک برنامه کامپیوتری برای پیش‌بینی رفتار جریان سیال حفاری چندفازی در حین عملیات حفاری زیرتعدالی تهیه کرده‌اند. معادلات حاکم در این تحقیق نیز شامل معادلات بقاء جرم به طور جداگانه برای هر فاز و یک معادله مومنتم کلی برای مخلوط می‌باشد. در این تحقیق برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده از یک حلقه چاه فرضی استفاده شده است که اطلاعات واقعی ندارد. پرزتلز و همکاران [۷] و [۸] در سال ۲۰۰۳، با استفاده از مدل شار رانشی<sup>۶</sup> و ترکیب این مدل با مدل‌های مکانیسم‌نگر<sup>۷</sup>، جریان دوفازی گاز-مایع در حفاری زیر فشار تعدالی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه اثرات کنده‌های حفاری در نظر گرفته نشده است. فدیرو و آدسینا [۹] در سال ۲۰۰۹، با استفاده از مدل‌سازی مکانیسم‌نگر، اثر انتقال کنده‌ها بر افت فشار و همچنین اثرات کسر حجمی ذرات جامد بر جریان دائم درون یک لوله عمودی را مورد بررسی قرار دهند. آن‌ها بیان داشتند که کنده‌های حفاری، جریان سیال را به تاخیر می‌اندازد و فشار ته چاه و چگالی معادل سیال حفاری را افزایش می‌دهد.

با توجه به دقت بیشتر مدل دوسیالی نسبت به مدل شار رانشی و همچنین جامعیت حل‌های عددی نسبت به حل‌های مکانیسم‌نگر، قبادپوری و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۷، جریان دوفازی گاز-مایع در دالیز در حین حفاری زیرتعدالی را به صورت یک‌بعدی مورد بررسی قرار داده‌اند. به منظور اعتبارسنجی مدل دوسیالی ارائه شده، نتایج شبیه‌سازی بدست آمده با داده‌های تجربی و همچنین با نتایج به‌دست آمده از مدل مکانیسم‌نگر و نرم‌افزار ولفلو<sup>۸</sup> مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سه پارامتر دبی مایع، دبی گاز و فشار خروجی می‌توانند به عنوان پارامترهای کنترل کننده فشار چاه مورد استفاده قرار بگیرند. با توجه به اهمیت موضوع تمیزکاری فضای حلقوی، قبادپوری و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۸، جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد درون فضای حلقوی را با استفاده از مدل چندسیالی شبیه‌سازی نمودند و تاثیر پارامترهای کنترلی مختلف شامل دبی‌های تزریقی فازهای مایع و جامد، فشار چوک، سرعت حفاری و اندازه‌ی کنده‌های حفاری را بر روی فشار در ته چاه و همچنین تمیزکاری فضای حلقوی بررسی کردند.

با توجه به سوابق پژوهشی ارائه شده، مشاهده می‌شود تاکنون تاثیر پارامترهای کنترلی در عملیات حفاری زیرتعدالی بر روی مشخصات جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد درون دالیز مورد بررسی قرار نگرفته است. اغلب تحقیقات انجام شده به منظور کنترل فشار ته چاه در ناحیه زیر تعدالی است و تاکنون تاثیر پارامترهای کنترلی بر مشخصات جریان سه‌فازی از جمله کسرهای حجمی فازهای مختلف و همچنین سرعت هر یک از فازها مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو، در تحقیق حاضر با استفاده از شبیه‌سازی عددی به بررسی تاثیر پارامترهای کنترلی بر مشخصات جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد در حفاری زیر تعدالی پرداخته می‌شود.

4. Choke Pressure

5. Dyna Flo Drill

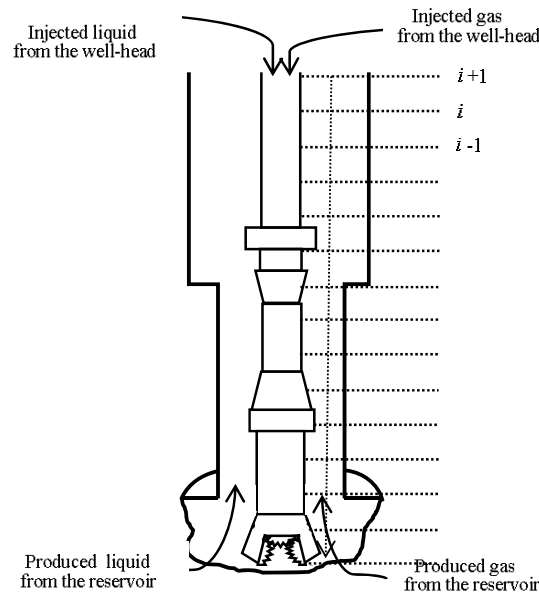
6. Drift Flux Model

7. Mechanistic Model

8. Well Flo

## ۲- معادلات حاکم

در عملیات حفاری زیرتعدادی، هر یک از فازهای مایع و گاز درون دالیز از دو جزء تشکیل شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است یکی از این اجزاء از سر چاه به درون لوله‌ی حفاری تزریق می‌شود و پس از عبور از مته وارد دالیز می‌شود و جزء دوم، از سازند به درون دالیز جریان می‌یابد. در این تحقیق فرض شده است که تنها یک مایع و یک گاز درون دالیز جریان دارد و خواص آن‌ها براساس میانگین وزنی اجزاء محاسبه می‌شوند. از میان مدل‌های مبتنی بر دیدگاه‌های اوپلری- اوپلری از مدل چندسیالی تک فشاری برای شبیه‌سازی استفاده شده است.



شکل ۱: هندسه‌ی چاه، نحوه گسسته‌سازی فضای حلقوی و مسیر محاسباتی

معادلات بقاء جرم و مومنتوم مدل چندسیالی تک فشاری در مقالات زیادی همچون اوجه و فلاتن [۱۲] ارائه شده‌اند. با توجه به طول زیاد فیزیک مساله در قیاس با قطر لوله حفاری، مساله یک بعدی فرض شده است. در عملیات حفاری زیر تعدادی، توزیع دما در طول چاه را معمولاً همان توزیع ژئوترمال در نظر می‌گیرند. همچنین فاز گاز تراکم‌پذیر و فاز مایع تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب معادلات حاکم به شرح ذیل خواهد بود. در این معادلات،  $u$  سرعت،  $\alpha$  کسر حجمی،  $P$  فشار و  $\rho$  نماد چگالی است. از زیرنویس‌های  $G$ ،  $L$  و  $S$  به ترتیب برای مشخص کردن فازهای گاز، مایع و جامد استفاده می‌شود.

$$\frac{d}{dx}(\alpha_G \rho_G u_G A) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx}(\alpha_L \rho_L u_L A) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx}(\alpha_S \rho_S u_S A) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx}(\alpha_G \rho_G u_G^2 A) = -A \left( F_{iG} + F_{wG} + F_{gG} + F_{vG} + \alpha_G \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \Delta P_{iG} \frac{d(\alpha_G)}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dx}(\alpha_L \rho_L u_L^2 A) = -A \left( F_{iL} + F_{wL} + F_{gL} + F_{vL} + \alpha_L \frac{\partial P}{\partial x} \right) - \Delta P_{iL} \frac{d(\alpha_L)}{dx} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx}(\alpha_S \rho_S u_S^2 A) = -A \left( F_{iS} + F_{wS} + F_{gS} + F_{vS} + \alpha_S \frac{\partial P}{\partial x} \right) \quad (6)$$

در معادلات فوق  $t$  بیانگر زمان است.  $F_{ik}(k = G, L, S)$ ، نیروی درگی است که در نتیجه برهمکنش سایر فازها بر فاز  $k$ ام وارد می‌شود.  $F_{wk}$  نیروی اصطکاک دیواره لوله،  $F_{gk}$  نیروی گرانش و  $F_{vk}$  نیروی جرم مجازی است.  $\Delta P_{ik}(k = G, L)$  عبارت تصحیح فشار می‌باشد که بیانگر اختلاف فشار فصل مشترک و هر فاز می‌باشد. روابط مربوط به نیروها و عبارت تصحیح فشار در مراجع [۱۰]، [۱۱] و [۱۳] ارائه شده است.

علاوه بر معادلات بقاء جرم و مومنتوم، برای بسته شدن سیستم معادلات دو معادله دیگر نیاز است. این روابط، رابطه قید هندسی و معادله حالت فاز گاز است. براساس رابطه قید هندسی

$$\sum_k \alpha_k = \alpha_G + \alpha_L + \alpha_S = 1 \quad (7)$$

معادله حالت فاز گاز به شرح زیر است

$$\rho_G = \rho_G(P_G, T_G) = \frac{M_G \cdot P}{8314 \cdot Z \cdot T} \quad (8)$$

در رابطه (۸)،  $Z$  ضریب تراکم‌پذیری فاز گاز است که روابط متنوعی برای آن پیشنهاد شده است. در مقاله حاضر از رابطه‌ای که در انچاک و ابوالقاسم [۱۴] پیشنهاد داده‌اند استفاده شده است

## ۲-۱- الگوهای جریان و معیار تشخیص آن‌ها

در این مقاله، جهت تشخیص الگوی جریان از الگوی جریان مبتنی بر کسر حجمی فاز گاز استفاده شده است. بر این اساس برای شرایط جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد رو به بالا در فضای دالیز چاه، در صورتی که کسر حجمی فاز گاز کمتر از  $0/2$  باشد رژیم جریان حبابی، از  $0/2$  تا  $0/3$  گذار از حبابی به لخته‌ای، از  $0/3$  تا  $0/6915$  لخته‌ای، بین  $0/6915$  و  $0/7915$  گذار از لخته‌ای به کف‌آلود و بزرگتر از  $0/7915$  رژیم کف‌آلود است [۱۵].

## ۲-۲- تولید نفت و گاز هم‌زمان با عملیات حفاری

برای محاسبه مقدار نفت و گازی که در حین حفاری زیرتعادلی تولید می‌شود، روابط متعددی بیان شده‌است. در این تحقیق، برای پیش‌بینی میزان شارش نفت و گاز از رابطه وگل استفاده شده است [۱۶]

$$\frac{q}{q_{max}} = 1.0 - 0.2 \left( \frac{BHP}{P_R} \right) - 0.8 \left( \frac{BHP}{P_R} \right)^2 \quad (9)$$

در معادله (۹)،  $q$  دبی نفت شارش یافته به درون دالیز،  $BHP$  فشار ته چاه و  $P_R$  فشار متوسط مخزن است. همچنین  $q_{max}$ ، ماکزیمم دبی نفت شارش یافته به درون دالیز است که در ازای فشار ته چاه صفر، بدست می‌آید.

## ۳- الگوریتم و روش حل

در مدل چندسیالی با فرض حالت پایا برای جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد، معادلات پیوستگی و مومنتوم فازها شش معادله‌ی غیرخطی دیفرانسیلی می‌باشد. این شش معادله به همراه معادله قید هندسی و معادله‌ی حالت فاز گاز یک دستگاه

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \\ F_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\alpha_G \rho_G u_G A)_i - K_{Gin} \\ (\alpha_L \rho_L u_L A)_i - K_{Lin} \\ (\alpha_S \rho_S u_S A)_i - K_{Sin} \\ K_{Gin}(u_{G,i+1} - u_{G,i}) + \alpha_{G,i} A_i (P_{i+1} - P_i) + A \Delta P_{iG} (\alpha_{G,i+1} - \alpha_{G,i}) - \Delta X \cdot A_i \cdot S_{G,i} \\ K_{Lin}(u_{L,i+1} - u_{L,i}) + \alpha_{L,i} A_i (P_{i+1} - P_i) + A \Delta P_{iL} (\alpha_{L,i+1} - \alpha_{L,i}) - \Delta X \cdot A_i \cdot S_{L,i} \\ K_{Sin}(u_{S,i+1} - u_{S,i}) + \alpha_{S,i} A_i (P_{i+1} - P_i) - \Delta X \cdot A_i \cdot S_{S,i} \\ \alpha_G + \alpha_L + \alpha_S - 1.0 \\ \rho_{G,i} - \rho(P_i, T_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

هشت معادله، هشت مجهول غیرخطی را تشکیل می‌دهند. هشت مجهول در این دستگاه معادلات شامل سه کسر حجمی، سه سرعت، چگالی فاز گاز و فشار می‌باشد. پس از گسسته‌سازی معادلات حاکم با استفاده از تقریب مرتبه‌ی یک پیشرو بر روی شبکه‌ای همانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده، یک دستگاه معادله جبری غیرخطی با هشت معادله که به یکدیگر کوپل هستند بدست خواهد آمد (دستگاه معادلات ۱۰). در این دستگاه معادلات،  $K_{Gin}$ ،  $K_{Lin}$  و  $K_{Sin}$  به ترتیب دبی‌های جرمی فازهای گاز، مایع و جامد می‌باشند. دبی جرمی کنده‌های حفاری با استفاده از حاصل ضرب متوسط چگالی کنده‌ها، سرعت حفاری و مساحت دالیز در انتهای چاه محاسبه می‌شود.

### ۳-۱- الگوریتم تعیین شرایط مرزی و حل مساله

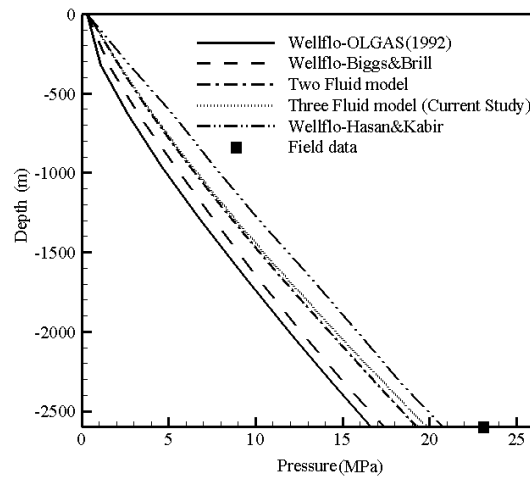
- ۱- محاسبات از سرچاه (بالای فضای حلقوی) شروع می‌شود و در امتداد دالیز تا رسیدن به انتهای چاه ادامه می‌یابد
- ۲- اولین حلقه تکرار با حدس مقادیر نفت و گاز تولیدی از مخزن شروع می‌شود. در ابتدا فرض می‌شود که نفت و گاز با حداکثر دبی ممکن از مخزن به درون دالیز جریان می‌یابند. با استفاده از این مقادیر و همچنین دبی مایع و گاز تزریقی از سر چاه خواص معادل مایع و گاز درون فضای حلقوی براساس میانگین وزنی اجزاء محاسبه می‌شوند.
- ۳- چگالی فاز جامد، سرعت حفاری و قطر متوسط کنده‌های حفاری به عنوان ورودی اخذ می‌شود.
- ۴- فشار در خروجی دالیز برابر با فشار چوک است ( $y_8 = P_{i+1} = P_{choke}$ ). با استفاده از معادله حالت فاز گاز و دما در گره سرچاهی، چگالی فاز گاز در خروجی دالیز بدست می‌آید ( $y_7 = \rho_{G,i+1}(P_{i+1}, T_{i+1})$ )
- ۵- دومین حلقه تکرار با حدس کسر حجمی فاز گاز  $\alpha_G$  و کسر حجمی فاز جامد  $\alpha_S$  در گره سرچاه، شروع می‌شود و با استفاده از این مقادیر حدسی کسر حجمی فاز مایع در سر چاه بدست می‌آید  $\alpha_L = 1 - \alpha_G - \alpha_S$ . با استفاده از این مقادیر و معادلات بقا جرم سه فاز، سرعت فازهای جامد، مایع و گاز در گره سرچاهی مشخص می‌شود. بدین ترتیب در مراحل ۴ و ۵ همه مجهولات در گره  $i+1$ ، شکل ۱ معلوم می‌شوند.
- ۶- سومین حلقه تکرار، با حدس مقادیر مجهول در دومین گره از سر چاه شروع می‌شود و با استفاده از تکرار نیوتن، اصلاح این مقادیر حدسی تا ارضاء معیار همگرایی ادامه می‌یابد. در تکرار نیوتن از رابطه  $Y_{n+1} = Y_n - J^{-1}F_n(Y_n)$  استفاده می‌شود. در این رابطه،  $Y$  بردار مجهولات می‌باشد. بردار  $F_n$ ، از رابطه ۱۰ و بر اساس مقادیر مجهولات و معادلات حاکم در نقطه  $i$  و در تکرار  $n$ ام محاسبه می‌شود. همچنین  $J^{-1}$  معکوس ماتریس ژاکوبین است.
- ۷- روند حل از پایین دست جریان (سر چاه) به سمت بالادست جریان (انتهای چاه) مشابه با مرحله ۶، برای سایر نقاط ادامه می‌یابد. به منظور اصلاح حدس اولیه‌ی کسر حجمی فازهای گاز و جامد در گره سرچاهی، پس از حل تعداد محدودی از گره‌ها (مثلاً ۵ گره)، با استفاده از برون‌یابی خطی کسر حجمی فازهای گاز و جامد در اولین گره سر چاه اصلاح می‌شود و فرآیند حل با مقادیر جدید کسرهای حجمی فاز گاز و فاز جامد بدست آمده، از مرحله ۴ تا ارضاء معیار همگرایی ( $|\alpha_{G,i=1}^{n+1} - \alpha_{G,i=1}^n| + |\alpha_{S,i=1}^{n+1} - \alpha_{S,i=1}^n| < 10^{-4}$ ) ادامه می‌یابد.
- ۸- روند حل تا انتهای چاه ادامه می‌یابد سپس مقدار نفت و گاز تولیدی، با استفاده از فشار انتهای چاه بدست آمده در مرحله هفتم همچنین رابطه ۹ اصلاح می‌شود و حل از مرحله ۲ با مقادیر اصلاح شده نفت و گاز تولیدی، تا ارضاء معیار همگرایی ( $|BHP^{n+1} - BHP^n| < 10^{-7}$ ) ادامه می‌یابد.

### ۴- نتایج و بحث در نتایج

#### ۴-۱- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی کد شبیه‌ساز جریان سه فاز گاز-مایع-جامد از اطلاعات مربوط به چاه ماسپک ۵۳ استفاده شده است. این چاه، یک چاه عمودی عملیاتی در مکزیک است و به روش زیرتعدالی حفاری شده است. مشخصات هندسی این چاه و

پارامترهای عملکردی آن از مرجع [۷] استخراج شده و با استفاده از کد تهیه شده شبیه‌سازی صورت گرفته است. در شکل ۲ توزیع فشار بدست آمده از کد تهیه شده بر مبنای مدل سه سیالی گاز-مایع-جامد، و همچنین سایر نتایج تجربی و مکانیسم‌نگر و همچنین مقدار عملیاتی فشار در ته چاه ارائه شده است.

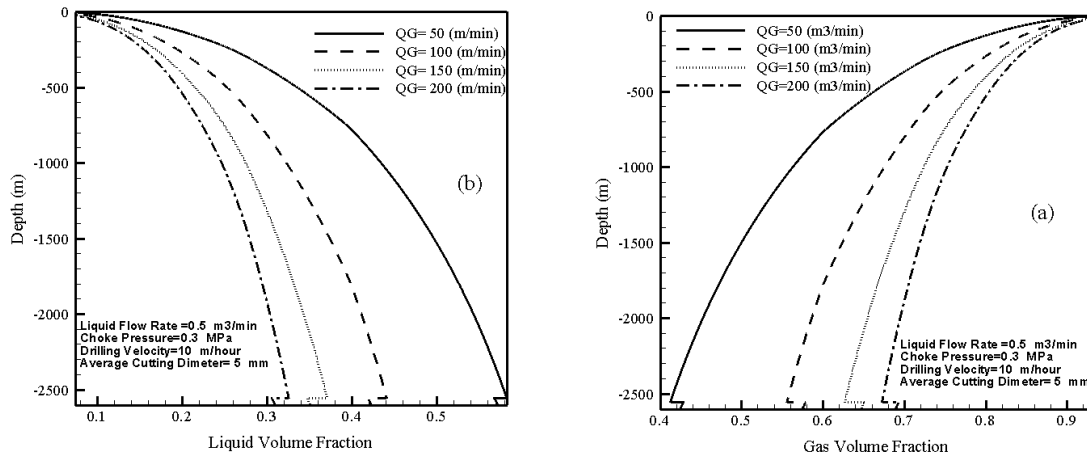


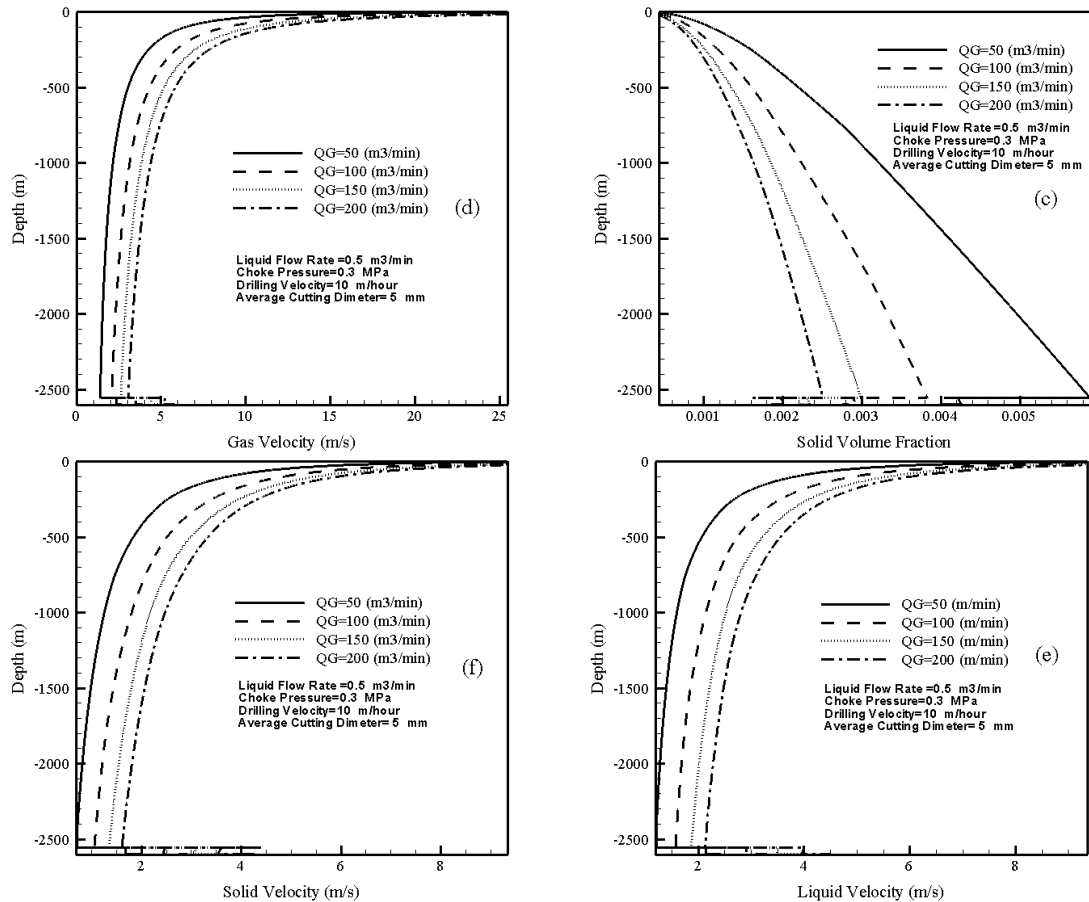
شکل ۲: توزیع فشار در دالیز چاه ماسپک ۵۳

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد مدل سه‌سیالی گاز-مایع-جامد دقت بیشتری نسبت به مدل دوسیالی گاز-مایع دارد. همچنین این روش نسبت به بسیاری از مدل‌های مورد استفاده در نرم افزار ولفلو که از رویکردهای مکانیسم‌نگر استفاده می‌کنند دقت بهتری دارد. نکته‌ی قابل توجه دیگر آن‌که، هر چند براساس اطلاعات ارائه شده مدل حسن و کبیر در مقایسه با مدل سه‌سیالی گاز-مایع-جامد از دقت بیشتری در پیش‌بینی فشار ته چاه برخوردار است اما این مدل در مورد نحوه‌ی توزیع ذرات جامد در طول دالیز هیچ اطلاعاتی ارائه نمی‌کند. همچنین این مدل یک مدل مکانیسم‌نگر است و بر اساس روابط تجربی بنا شده است. بنابراین، دقت بیشتر این مدل مکانیسم‌نگر در شبیه‌سازی این چاه خاص دلیلی برای برتری دقت آن در همه‌ی شرایط و مدل‌سازی سایر چاه‌ها نمی‌باشد.

#### ۲-۴- تاثیر پارامترهای کنترلی بر توزیع پارامترهای جریان سه‌فاز در دالیز

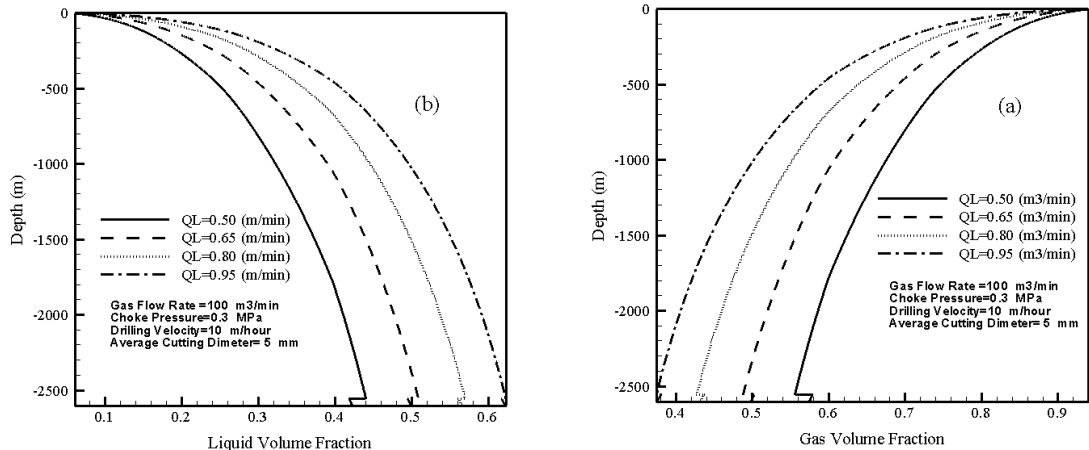
در شکل ۳ اثر دبی فاز گاز تزریقی بر توزیع پارامترهای مختلف در طول دالیز بررسی شده است. همان‌گونه که از شکل‌های الف، ب و ج مشخص است کسر حجمی فاز گاز در طول دالیز از پایین به بالا افزایش می‌یابد و کسر حجمی فازهای مایع و جامد از پایین به بالا کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دبی حجمی فاز گاز، تفاوت کسر حجمی هر سه فاز در ته چاه و سر چاه کاهش می‌یابد. تغییر دبی فاز گاز، بیشتر مشخصات جریان در انتهای چاه را تغییر داده است. سرعت فازهای مایع، جامد و

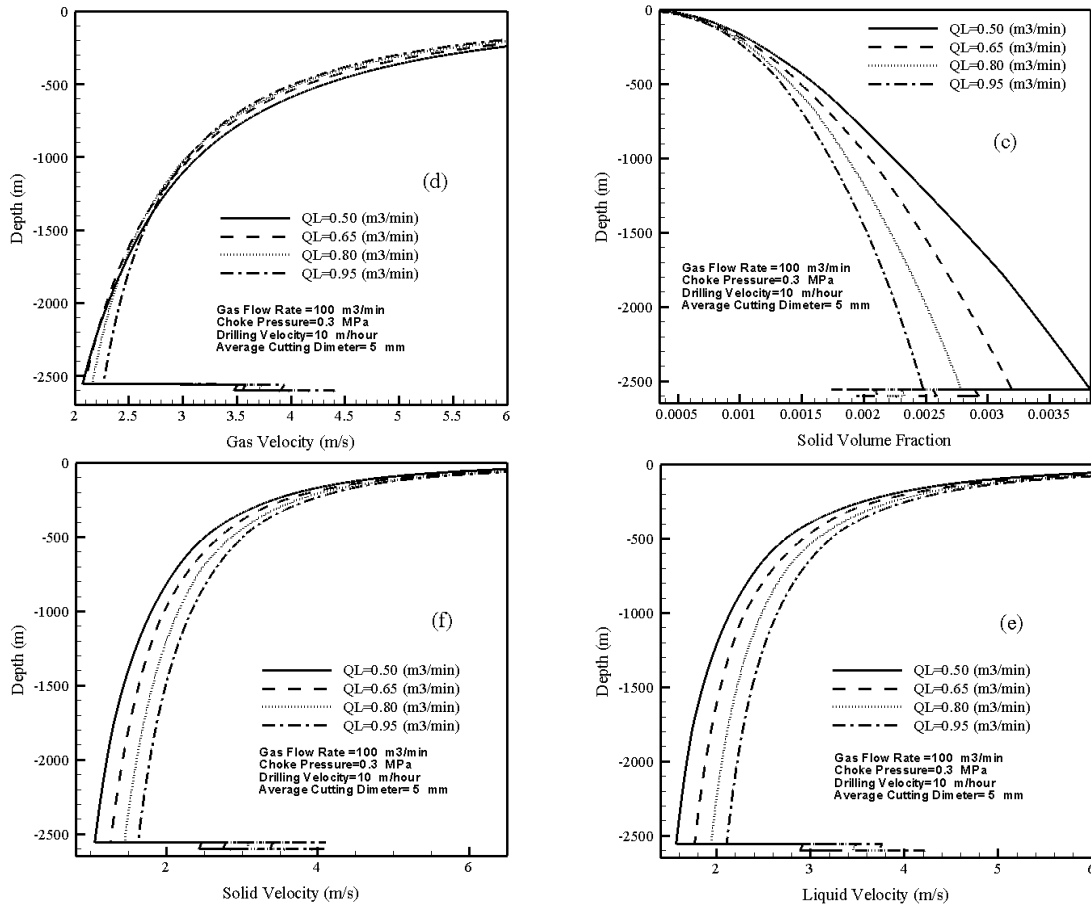




شکل ۳: تاثیر دبی فاز گاز تزریقی بر روی (a) توزیع کسر حجمی فاز گاز، (b) توزیع کسر حجمی فاز مایع، (c) توزیع کسر حجمی فاز جامد، (d) توزیع سرعت فاز گاز، (e) توزیع سرعت فاز مایع، (f) توزیع سرعت فاز جامد

گاز در طول دالیز در نقاط با سطح مقطع یکنواخت از پایین به بالا در حال افزایش است. میزان افزایش سرعت فازها در ناحیه نزدیک به سر چاه شدت بیشتری می‌یابد و هر چه دبی فاز گاز بیشتر باشد از شدت تغییرات شدید سرعت، کاسته می‌شود. در شکل ۴ به بررسی اثر دبی فاز مایع تزریقی بر توزیع پارامترهای مختلف در طول دالیز پرداخته شده است. با افزایش دبی حجمی فاز مایع تزریقی، کسر حجمی فازهای گاز و جامد کاهش می‌یابند و کسر حجمی فاز مایع افزایش می‌یابد. در دبی‌های حجمی مایع بالاتر، کسر حجمی‌ها توزیع پله مانند به خود می‌گیرند و در طول کمی از ناحیه سرچاهی تغییرات شدیدی دارند.

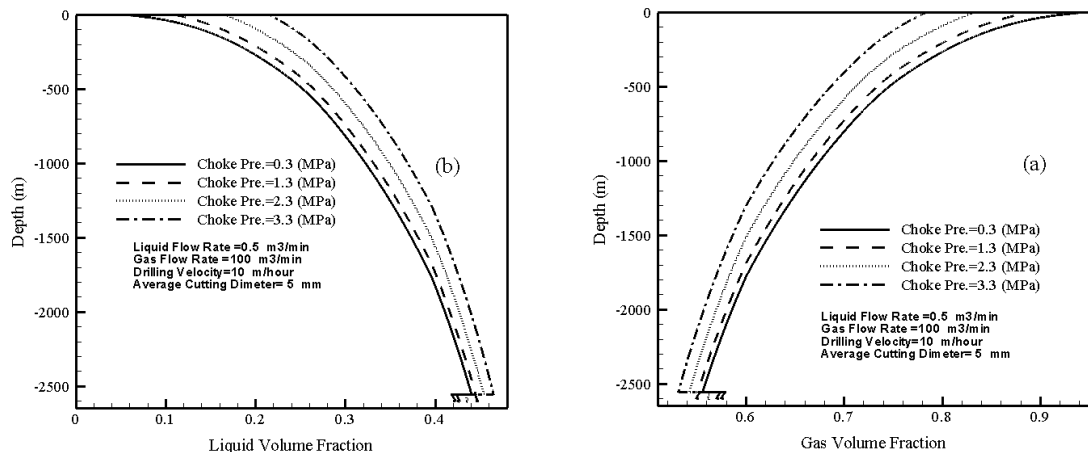




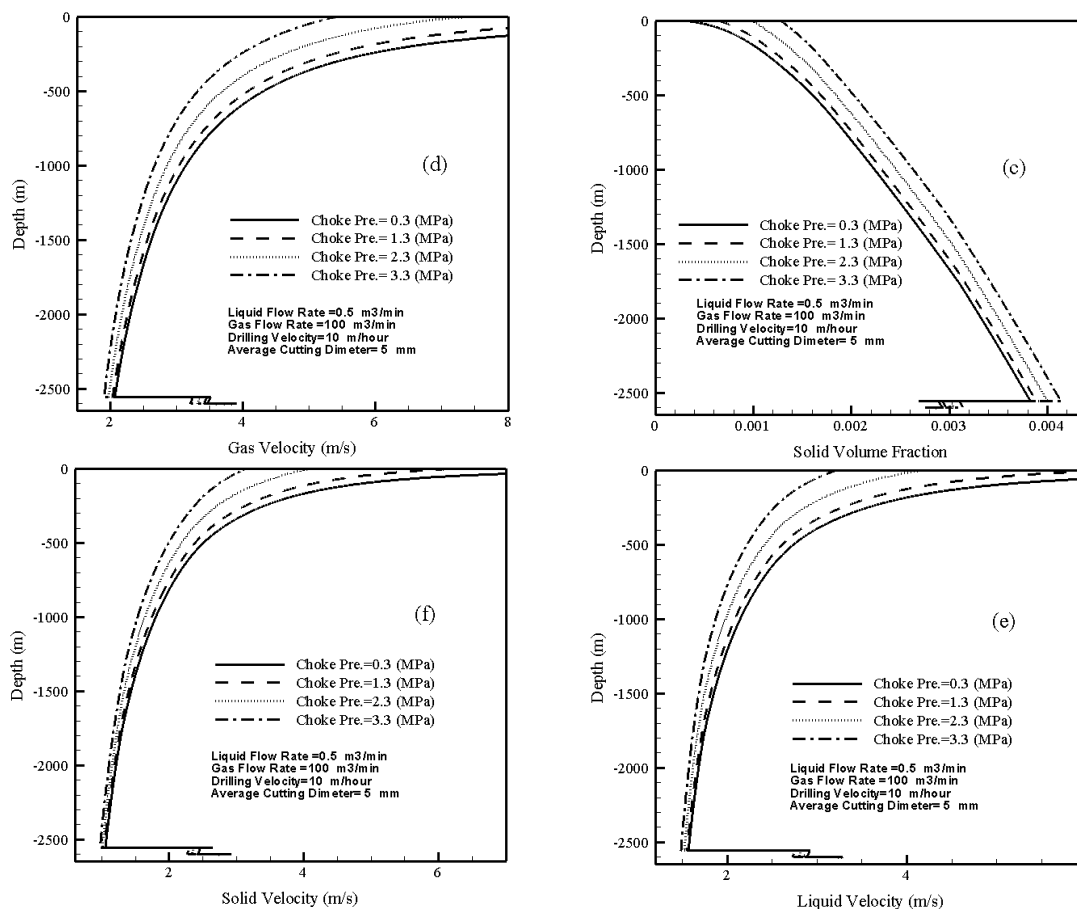
شکل ۴: تاثیر دبی فاز مایع تزریقی بر روی (a) توزیع کسر حجمی فاز گاز، (b) توزیع کسر حجمی فاز مایع، (c) توزیع کسر حجمی فاز جامد، (d) توزیع سرعت فاز گاز، (e) توزیع سرعت فاز مایع، (f) توزیع سرعت فاز جامد

با کاهش میزان دبی حجمی مایع، تغییرات کسر حجمی در ناحیه بزرگتری از طول چاه رخ می‌دهد و توزیعی شبه خطی می‌گیرند. درحقیقت با افزایش دبی فاز مایع تزریقی، سرعت هر سه فاز مایع، جامد و گاز در قسمت پایین فضای دالیزی افزایش می‌یابد اما در قسمت انتهایی تغییرات چندانی ندارد.

در شکل ۵ به بررسی اثر تغییر فشار چوک بر توزیع پارامترهای مختلف در طول دالیز پرداخته شده است. افزایش فشار چوک سبب افزایش کسر حجمی فازهای مایع و جامد و کاهش کسر حجمی فاز گاز می‌شود. همچنین سرعت همه فازها با







شکل ۵: تاثیر فشار چوک بر روی (a) توزیع کسر حجمی فاز گاز، (b) توزیع کسر حجمی فاز مایع، (c) توزیع کسر حجمی فاز جامد، (d) توزیع سرعت فاز گاز، (e) توزیع سرعت فاز مایع، (f) توزیع سرعت فاز جامد

افزایش فشار چوک کاهش می‌یابد. اثر افزایش فشار چوک بر کسرهای حجمی و سرعت فازهای مختلف در ناحیه نزدیک به سرچاه شدیدتر و در ناحیه انتهایی چاه بسیار ناچیز می‌باشد. علت این امر آن است که با افزایش عمق، فشار ناشی از هیدرواستاتیک بزرگ و بزرگ‌تر می‌شود و مرتبه فشار چوک نسبت به فشار کل کوچک‌تر می‌شود از این رو اثر فشار چوک در ناحیه انتهایی چاه ناچیز است.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، از روشی عددی مبتنی بر مدل چندسیالی تک فشاری جهت شبیه‌سازی جریان سه‌فازی گاز-مایع-جامد در فضای حلقوی یک چاه با ابعاد واقعی همراه با شارش نفت و گاز از مخزن به واسطه‌ی زیرتعدادی بودن عملیات حفاری استفاده شده است. نتایج حاصل از کد عددی تهیه شده با داده‌های یک چاه واقعی مقایسه و اعتبارسنجی شده است. براساس نتایج بدست آمده:

- ۱- میزان افزایش سرعت فازها در ناحیه نزدیک به سرچاه شدت بیشتری دارد و هر چه دبی فاز گاز تزریقی بیشتر باشد از شدت تغییرات شدید در ناحیه سرچاهی کاسته می‌شود.
- ۲- در دبی‌های حجمی مایع بالاتر، کسر حجمی‌ها توزیع پله مانند به خود می‌گیرد با کاهش میزان دبی حجمی مایع، تغییرات کسر حجمی در طول دالیز توزیعی شبه خطی می‌گیرند.

- ۳- با افزایش دبی فاز مایع و گاز تزریقی، سرعت هر سه فاز مایع، جامد و گاز در قسمت پایین فضای دالیزی افزایش می‌یابد اما در قسمت انتهایی تغییرات چندانی ندارد.
- ۴- سرعت همه فازها با افزایش فشار چوک کاهش می‌یابد. اثر افزایش فشار چوک بر کسرهای حجمی و سرعت فازهای مختلف در ناحیه نزدیک به سرچاه شدیدتر و در ناحیه انتهایی چاه ناچیز می‌باشد.

## مراجع

- [1] Lorentzen R. J., Fjelde K. K., Froyen J., A. Lage C., Naevdal G., Vefring E. H., 2001, Underbalanced drilling: Real time data interpretation and decision support, in the SPE/IADC drilling conference, Amsterdam, Netherlands.
- [2] Lorentzen R. J., Fjelde K. K., Froyen J., Lage A. C., Naevdal G., Vefring E. H., 2001, Underbalanced and low-head drilling operations: Real time interpretation of measured data and operational support, in the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Louisiana.
- [3] Lorentzen R. J., Naevdal G., Lage A. C., 2003, Tuning of parameters in a two-phase flow model using an ensemble Kalman filter, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 29, No. 8, pp. 1283-1309.
- [4] Vefring E. H., Nygaard G., K. Fjelde K., R. Lorentzen J., Naevdal G., Merlo A., 2002, Reservoir characterization during underbalanced drilling: Methodology, accuracy, and necessary data, in the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA.
- [5] Vefring E. H., Nygaard G. H., Lorentzen R. J., Naevdal G., K. Fjelde K., 2006, Reservoir characterization during underbalanced drilling (UBD): Methodology and active tests, SPE Journal, Vol. 11, No. 02, pp. 181-192.
- [6] Fan J. J., Gao C., Taihe S., Liu H., Yu Z., 2001, A comprehensive model and computer simulation for underbalanced drilling in oil and gas wells, in the SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Houston, Texas.
- [7] Perez-Tellez C., 2003, Improved Bottomhole Pressure Control for Underbalanced Drilling Operations, PhD Thesis, Universidad Nacional Autonoma de Mexico.
- [8] Perez-Tellez C., Urbieto-Lopez A., Miller A., Banda-Morato R., 2003, Bottomhole pressure measurements: Indispensable tool for optimizing underbalanced drilling operations, in the Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
- [9] Fadairo A. S., Falode O. A., 2009, Effect of drilling cuttings transport on pressure drop in a flowing well, in Middle East Drilling Technology Conference & Exhibition held in Manama, Bahrain.
- [10] Ghobadpouri, S., Hajidavalloo, E., Noghrehabadi, A.R., Shekari, Y., Khezrian, M., 2016, Numerical simulation of under-balanced drilling operations with oil and gas production from reservoir using single pressure two-fluid model, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 291-302.
- [11] Ghobadpouri, S., Hajidavalloo, E., Noghrehabadi, A.R., 2017, Modeling and simulation of gas-liquid-solid three-phase flow in under-balanced drilling operation, Journal of Petroleum Science and Engineering (2017), doi: 10.1016/j. Petrol.
- [12] Evje S., Flatten T., 2003, Hybrid flux-splitting schemes for a common two-fluid model, Journal of Computational Physics, Vol. 192, No. 1, pp. 175-210.
- [13] Bestion D., 1990, "The physical closure laws in the CATHARE code," Nuclear Engineering and Design., vol. 124, pp. 229-245.
- [14] Dranchuk P., Abou-Kassem H., 1975, Calculation of Z factors for natural gases using equations of state, Journal of Canadian Petroleum Technology, Vol. 14, No. 03.
- [15] Hatta N., Fujimoto H., Isobe M., Kang J.-S., 1997, Theoretical analysis of flow characteristics of multiphase mixtures in a vertical pipe, International journal of multiphase flow, Vol. 24, No. 4, pp. 539-561.
- [16] Guo B., Lyons W. C., Ghalambor A., 2007, Petroleum production engineering, a computer-assisted approach, pp 3.30-3.36, Texas: Gulf Professional Publishing.