



## مطالعه عددی جریان سیال حفاری کف در فضای حلقوی چاه‌های نفت

رضا روکی<sup>۱</sup>، محمود نوروزی<sup>۲\*</sup>، فرامرز دولتی ارده‌جانی<sup>۳</sup>، علی مرادزاده<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۳- استاد مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

\* شاهرود، دانشگاه صنعتی شاهرود، صندوق پستی ۳۱۶، mnorouzi@shahroodut.ac.ir

**چکیده-** تخمین صحیح افت‌های فشار سیالات حفاری غیرنیوتنی در داخل فضای حلقوی برای تعیین دبی جریان و انتخاب سیستم‌های پمپاژ گل در طی عملیات حفاری، ضروری است. هدف این مطالعه، شبیه‌سازی جریان سیال کف و تخمین افت فشار در فضای حلقوی چاه در شرایط حفاری زیرتعادلی با استفاده از روش عددی حجم محدود است. سیال کف به عنوان سیال غیرنیوتنی قانون توان و هرشل بالکلی در نظر گرفته شده است و نتایج افت فشار با هم مقایسه می‌شوند. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف عملیاتی از قبیل رئولوژی سیال کف، سرعت سیال کف، کیفیت کف، چرخش لوله حفاری و عدم هم‌مرکزی لوله و چاه، بر افت فشار بررسی می‌شوند. نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مطالعات قبلی مقایسه شده است. متوسط خطای نسبی بین نتایج روش عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تخمین افت فشار، کمتر از ۵٪ است. نتایج روش عددی با در نظر گرفتن مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی برای کف، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک‌تر است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت و کیفیت سیال کف، افت فشار افزایش، و با افزایش عدم هم‌مرکزی افت فشار کاهش می‌یابد، ولی چرخش لوله تأثیر چشم‌گیری در افت فشار ندارد. **کلیدواژگان:** افت فشار، سیال غیرنیوتنی کف، روش حجم محدود، پارامترهای حفاری، فضای حلقوی چاه.

## Numerical investigation of foam drilling fluid flow in the oil wells annulus

R. Rooki<sup>1</sup>, M. Norouzi<sup>2\*</sup>, F. Doulati Ardejani<sup>3</sup>, A. Moradzadeh<sup>3</sup>

1- PhD. Student, Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran

2- Assis. Prof., Mech. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran

3- Prof., Mining Eng., Petroleum and Geophysics, Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran

\* P.O.B. 316 Shahrood, Iran. mnorouzi@shahroodut.ac.ir

**Abstract-** Accurate estimation of the pressure losses for non-Newtonian drilling fluids inside annulus is quite important to determine pump rates and select mud pump systems during wellbore drilling operation. The aim of this study is to simulate non-Newtonian (power law and Herschel-Bulkly) foam flow in underbalanced drilling condition through wellbore annulus using finite volume method. The effect of various operational parameters on pressure loss such as fluid rheology, foam fluid velocity, foam quality, drillpipe rotation and wellbore eccentricity, have been considered. Simulation results were compared with the previously published experimental data. The agreement was close with an average relative error less than 5%. The results of numerical method are closer to experimental data for Herschel Bulkly model for foam fluid. Also, the results of numerical method, showed that pressure drop increases with increasing the foam fluid velocity and quality and it decreases with increasing eccentricity, but drillpipe rotation don't have noticeable effect on pressure drop.

**Keywords:** Pressure Loss, Non-Newtonian Foam Fluid, Finite Volume Method, Drilling Parameters, Wellbore Annulus.

## ۱- مقدمه

در عملیات حفاری، از یک سیال که می‌تواند مایع، گاز یا ترکیبی از مایع و گاز باشد به عنوان سیال حفاری استفاده می‌شود. این سیال از سطح زمین و از طریق لوله حفاری به داخل چاه پمپ شده و بعد از عبور از نازل‌های مته، خرده‌های حفاری را از فضای حلقوی بین دیواره چاه و لوله حفاری به سطح زمین منتقل می‌کند. حفاری زیرتعدادی<sup>۱</sup>، عملیاتی است که طی آن فشار سیال حفاری کمتر از فشار سیال سازند است. جهت حفاظت از مخازن هیدروکربنی، کاهش مخاطرات حفاری، کاهش هزینه و افزایش تولید چاه، حفاری زیرتعدادی و حفاری با فشار مدیریت‌شده، مورد علاقه شرکت‌های جهان است. چهار نوع از روش‌های حفاری زیرتعدادی وجود دارد که هر کدام کاربرد و هدف خاصی دارند: حفاری هوا؛ حفاری مه؛ حفاری کف؛ و حفاری با سیالات هوازده. سیال حفاری کف شامل آب، مواد شیمیایی و گاز (از قبیل هوا) است. آب فاز پیوسته و گاز قطرات ناپیوسته هستند. کف می‌تواند با پمپ‌نمودن محلول آب و مواد شیمیایی از بین یک لوله و نتوری به داخل سیستم گاز تولید شود. استفاده از کف، نسبت به سیستم هوا و مه، دارای مزیت‌هایی از جمله قابلیت انتقال بهتر خرده‌ها می‌باشد. در این روش به سرعت‌های کمتری در فضای حلقوی احتیاج داریم [۲،۱]. این ترکیب بسیار پیچیده است و خواص رئولوژیکی آن از قبیل تنش برشی، نرخ برشی و ویسکوزیته وابسته به دما و فشار عملیاتی، خواص فاز مایع، کیفیت کف، پایداری کف، ساختار کف و نوع ماده شیمیایی کف‌ساز است. تغییرات این پارامترها در خواص جریانی کف تأثیر گذاشته و می‌تواند شدیداً رفتار هیدرولیکی کف را تغییر دهد و در پیش‌بینی‌های افت فشار تأثیر بگذارد [۳-۵].

افت فشار در سیستم‌های لوله به دلیل تغییرات ارتفاع، تلاطم ایجادشده توسط تغییرات ناگهانی، اصطکاک درون لوله و اتصالات مربوطه است. مهندسان در تخمین گرادیان‌های فشار در فضای حلقوی برای حفاری و عملیات کنترلی با مشکل مواجه بوده‌اند. طراحی صحیح عملیات حفاری منجر به مزایای اقتصادی از قبیل کاهش در خسارت سازند، افزایش سرعت حفاری، بهبود تولید و غیره می‌شود. تخمین صحیح افت‌های فشار در فضای حلقوی چاه در تعیین توان مورد نیاز پمپ و

انتخاب سیستم‌های مناسب پمپ ضروری است. تخمین اشتباه افت‌های فشار منجر به مشکلات حفاری از قبیل گیر کردن لوله، هرزروی گل و انتخاب اشتباه سیستم‌های پمپ خواهد شد. مطالعات آزمایشگاهی و تجربی مختلفی در مورد رفتار جریان سیال کف [۵-۹] و سیال حفاری معمولی غیرنیوتنی [۱۰-۱۲] در فضای حلقوی انجام شده و طی آن رفتار جریانی سیال و افت فشار سیال با تغییر پارامترهای عملیاتی مورد مطالعه قرار گرفته است.

با توجه به متغیرهای مختلف دخیل در رفتار جریان سیال کف از قبیل تراکم‌پذیری، هندسه جریان، تولید کف، کیفیت کف، خواص فاز گاز و مایع، لغزش در دیواره هادی، رفتار غیرنیوتنی و غیره، توافق عمومی در مورد توصیف رئولوژیکی و خواص رفتاری جریان کف وجود ندارد. روش‌های آزمایشگاهی و تجربی که از قدیمی‌ترین روش‌ها هستند و جواب‌های نسبتاً دقیقی تولید می‌کنند به سرمایه‌گذاری اولیه زیاد و هزینه بالای انجام آزمایشات نیاز دارند. به کمک روش‌های عددی از صرف هزینه‌های زیاد برای انجام آزمایش‌ها جلوگیری می‌شود.

روش عددی حجم محدود در مدل‌سازی جریان سیال در فضای حلقوی در صنعت حفاری برای سیال حفاری معمولی غیرنیوتنی مدل قانون توان [۱۳-۱۵] و هرشل-بالکلی [۱۶] به کار رفته است. تأثیر پارامترهای عملیاتی حفاری از قبیل ویسکوزیته سیال، عدم هم‌مرکزی لوله و چرخش لوله بر روی افت فشار بررسی شده است. نتایج آنها، حاکی از افزایش افت فشار با افزایش ویسکوزیته و کاهش عدم هم‌مرکزی می‌باشد و افزایش چرخش لوله به مقدار جزئی افت فشار را کاهش می‌دهد.

در مورد سیال کف، مطالعات عددی، از مدل رئولوژیکی قانون توان برای ویسکوزیته سیال کف در محاسبات هیدرولیکی استفاده کرده‌اند [۶، ۱۷، ۱۸]. مدل هرشل بالکلی در اکثر موارد رفتار رئولوژیکی سیالات حفاری از جمله سیال کف را نسبت به مدل قانون توان بهتر توصیف می‌کند. بنابراین مطالعه رفتاری این سیال از جمله افت فشار مربوط به آن در فضای حلقوی، ضروری است. مطالعه حاضر برای اولین بار به شبیه‌سازی سه بعدی جریان سیال کف به عنوان یک سیال غیرنیوتنی مدل هرشل-بالکلی با استفاده از روش عددی در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز (شکل ۱) با در نظر گرفتن چرخش لوله مرکزی پرداخته است.

## 1. Underbalanced Drilling (UBD)

که در آن،  $V_g$  حجم گاز، و  $V_l$  حجم مایع هستند. کیفیت کف بسته به مقدار گاز در کف، بین صفر و ۱ تغییر می‌کند. افزایش نرخ جریان گاز، کیفیت کف را افزایش می‌دهد و در پی آن ویسکوزیته مؤثر کف افزایش و دانسیته کف کاهش می‌یابد. افزایش نرخ جریان مایع، باعث افزایش فشار ته‌چاهی و کاهش کیفیت کف می‌شود. کف‌های با کیفیت پایین به کف‌های خیس و کف‌های با کیفیت بالا به کف‌های خشک معروف هستند [۲]. چون کف حاوی گاز است، با توجه به حضور گاز در کف، کیفیت آن با عمق و فشار تغییر می‌کند [۱۷]. افزودنی‌های دیگر از قبیل بنتونیت و پلیمرها جهت تغییر خواص کف، می‌تواند به آن اضافه شود.

برای یک فشار و دمای خاص، کف به صورت یک سیال همگن در نظر گرفته می‌شود و چگالی آن با استفاده از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$\rho_f = \Gamma \rho_g + (1 - \Gamma) \rho_l \quad (2)$$

که در آن:  $\rho$  چگالی سیال ( $\text{kg/m}^3$ ) است.

## ۲-۲- رئولوژی کف

رئولوژی، مطالعه تغییر شکل سیالات است. کف نیز مانند خیلی از سیالات حفاری دیگر دارای خصوصیات غیرنیوتنی است. در سیالات غیرنیوتنی رابطه ساده‌ای بین تنش برشی و نرخ برش وجود ندارد یعنی ویسکوزیته این سیالات در یک دما و فشار معین ثابت نیست و به عوامل دیگری مانند نرخ برش بستگی دارد. در چند دهه گذشته جریان کف و تحلیل رئولوژی کف موضوع مطالعات زیادی بوده است [۱۹].

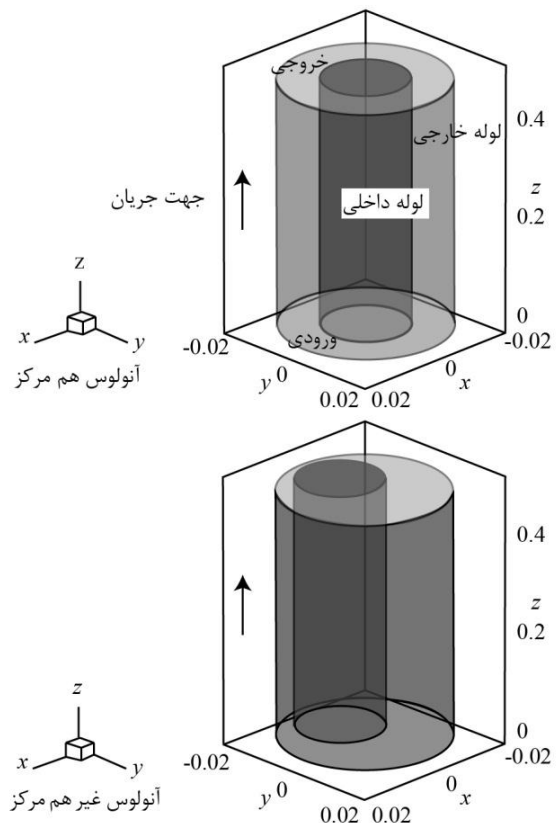
در مورد بهترین مدل رئولوژیکی توصیف‌کننده رفتار غیرنیوتنی سیال کف با توجه به روش تحلیل، وسیله آزمایشگاهی، فاز گاز، انواع افزودنی‌های کف‌ساز و سایر افزودنی‌ها هنوز توافق کامل وجود ندارد. مطالعات نشان داده‌اند که کف می‌تواند به عنوان سیال قانون توان<sup>۳</sup> [۲۱، ۲۰، ۱۷]، بینگهام پلاستیک [۲۳، ۲۲] و هرشل- بالکلی<sup>۴</sup> [۲۷-۲۴، ۴] عمل کند. این مدل‌ها به صورت زیر هستند:

مدل قانون توان:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

3 . Power Law (PL)

4 . Herschel-Bulkly (HB)



شکل ۱ ساختار فضای حلقوی هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز

روش عددی در نظر گرفته شده، روش حجم محدود<sup>۱</sup> است و گسسته‌سازی معادلات حاکم به روش کوئیک که از مرتبه دو می‌باشد، انجام شده تا دقت بیشتری در حل معادلات حاکم به دست آید. در این مطالعه از نرم‌افزار فلونت برای گسسته‌سازی و حل معادلات حاکم استفاده شد. در مدل‌سازی عددی تأثیر پارامترهای دخیل در افت فشار از قبیل مدل رئولوژیکی سیال کف، سرعت سیال کف، کیفیت کف و چرخش لوله<sup>۲</sup> (دور در دقیقه) بررسی شد. نتایج عددی حاصل از دو مدل رئولوژیکی، با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شود.

## ۲- خصوصیات سیال کف

### ۱-۲- کیفیت و چگالی کف

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

$$\Gamma = \frac{V_g}{V_g + V_l} \times 100 \quad (1)$$

1 . Finite Volume Method (FVM)

2 . Revolution Per Minute

مدل بینگهام پلاستیک:

$$\begin{cases} \gamma = 0 & |\tau| < \tau_y \\ |\tau| = \tau_y + \mu_p |\gamma| & |\tau| > \tau_y \end{cases} \quad (4)$$

مدل هرشل- بالکلی (قانون توان تسلیمی):

$$\begin{cases} \gamma = 0 & |\tau| < \tau_y \\ |\tau| = \tau_y + K |\gamma|^n & |\tau| > \tau_y \end{cases} \quad (5)$$

که در آنها  $\gamma$  نرخ برش  $(1/s)$ ،  $n$  شاخص رفتاری جریان،  $K$  شاخص سازگاری سیال  $(Pa \cdot s^n)$ ،  $\mu_p$  ویسکوزیته پلاستیکی  $(Pa \cdot s)$  و  $\tau_y$  تنش تسلیمی  $(Pa)$  است.

### ۳- تئوری

#### ۳-۱- معادلات حاکم و روش حل حجم محدود

حل عددی یک مسأله شامل تعریف معادلات ریاضی حاکم بر مسأله و گسسته‌سازی آنها و ایجاد یک دستگاه معادلات جبری برای مقادیر کمیت‌های مجهول در نقاط خاصی از میدان حل است.

معادله پیوستگی، فرم دیفرانسیلی قانون بقای جرم را به صورت رابطه ۶ بیان می‌کند [۲۸]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times \rho \vec{V} = 0 \quad (6)$$

برای شرایط حالت ایزوترمال و تراکم‌ناپذیر،  $\rho$  ثابت بوده و معادله (۶) به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$\nabla \times \vec{V} = 0 \quad (7)$$

معادله اندازه حرکت، قانون دوم نیوتن را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p - \nabla \times \tau + \rho g \quad (8)$$

برای سیال غیرنیوتنی مدل رئولوژیکی قانون توان و هرشل- بالکلی، تنش برشی به ترتیب مانند معادلات (۷) و (۹) تعریف می‌شود.

روش‌های متعددی برای حل معادلات ناویر- استوکس وجود دارند: اختلاف محدود؛ اجزای محدود؛ حجم محدود؛ اجزای مرزی؛ و روش‌های بدون شبکه. روش حجم محدود یکی از پرکاربردترین روش‌های محاسباتی است که در بسیاری از نرم‌افزارهای محاسباتی استفاده می‌شود. از مهم‌ترین ویژگی‌های روش حجم محدود انعطاف‌پذیری این روش برای شبکه‌های باسازمان و بی‌سازمان و مسأله‌هایی با هندسه پیچیده است.

همچنین عدم نیاز به نداشت‌ها و تبدیل مختصات‌های متداول در روش تفاضل محدود و اطمینان از ارضای قوانین بقاء از مزیت‌های اصلی این روش است. از دیگر قابلیت‌های این روش، حفظ فیزیک مسأله در معادلات گسسته‌سازی شده است. اساس این روش به این شکل است که ناحیه ثابت و مشخصی به عنوان دامنه موردبررسی در نظر گرفته می‌شود، سپس از قوانین پایستاری اعمال شده بر آن، بر روی مرزهای حجم کنترل انتگرال‌گیری می‌شود. مراحل روش حجم کنترل به صورت زیر است:

- تقسیم دامنه به چندین حجم کنترلی با استفاده از شبکه‌های محاسباتی؛
- انتگرال‌گیری از معادلات حاکم بر هر حجم کنترلی برای ایجاد یک معادله جبری جهت مجزاسازی متغیرهای وابسته (مجهول) نظیر سرعت، دما و فشار؛
- خطی‌سازی معادلات گسسته‌شده و حل سیستم معادلات خطی برای بدست آوردن مقادیر جدید متغیرهای وابسته.

#### ۳-۲- جریان فضای حلقوی به روش شکاف معادل

استفاده از شکاف معادل برای هندسه فضای حلقوی به طور گسترده در مهندسی حفاری برای اهداف کاربردی استفاده شده است [۲۹]. معادله شکاف که یکی از پرکاربردترین معادلات قطر معادل برای جریان فضای حلقوی است به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود:

$$d_e = 0.816(d_o - d_i) \quad (9)$$

که در آن،  $d_o$  قطر لوله خارجی (m) و  $d_i$  قطر لوله حفاری (m) است. گرادیان فشار اصطکاکی در فضای حلقوی که توسعه یافته معادلات لوله است، برای روش شکاف معادل به صورت رابطه (۱۰) تعریف می‌شود:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{2f\rho v^2}{d_e} \quad (10)$$

که در آن،  $\Delta P/\Delta L$  گرادیان فشار اصطکاکی (Pa/m)،  $f$  فاکتور اصطکاک فن (-)،  $\rho$  چگالی سیال ( $kg/m^3$ ) و  $v$  متوسط سرعت ورودی سیال به فضای حلقوی (m/s) است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v = \frac{Q}{\pi(d_o^2 - d_i^2)} \quad (11)$$

که در آن،  $Q$  دبی جریان ( $m^3/s$ ) است.

مدل رئولوژیکی قانون توان برای فضای حلقوی هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز استفاده می‌شود.

#### ۴- شبیه‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی جریان سیال کف به‌عنوان یک سیال مدل قانون توان و مدل هرشل-بالکلی از روش حجم محدود استفاده شد. سیالات و هندسه فضای حلقوی از مطالعه دوان [۷] گرفته شده‌اند. در کار آنها، جریان سیال کف، رئولوژی و رفتار جریان آن با کیفیت‌های مختلف در دستگاه آزمایشی دینامیکی<sup>۱</sup> و ویسکومتر تولید کف<sup>۲</sup> مطالعه شد.

فضای حلقوی در نظر گرفته‌شده برای جریان کف، دارای یک لوله داخلی به قطر  $(d_i)$  ۰/۰۱۹۰۵m و لوله خارجی به قطر  $(d_o)$  ۰/۰۳۸۱m و طول فضای حلقوی ۳/۰۴۸m است که در مدل‌سازی عددی جهت کاهش حجم و زمان محاسبات، با توجه به معادله (۱۸) که جریان توسعه‌یافته پیش می‌آید، طول  $(L)$  شبیه‌سازی ۰/۵ متر در نظر گرفته شد.

$$L = 0.06(d_o - d_i)Re \quad (18)$$

که در آن،  $Re$  عدد رینولدز است.

دو مدل رئولوژیکی قانون توان و هرشل-بالکلی به داده‌های تنش برشی-نرخ برشی حاصل از DTF برازش شدند (شکل ۲) و با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> (GA) کارایی بالایی در بهینه‌سازی و برازش مدل‌های چند پارامتری دارد [۳۲]، پارامترهای رئولوژیکی دو مدل توسط الگوریتم ژنتیک بدست آمد.

آنچه که از داده‌های رئولوژی مشخص است، تنش برشی و ویسکوزیته ظاهری با افزایش کیفیت کف افزایش ولی با کاهش نرخ برش، کاهش می‌یابد. پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان یعنی شاخص قانون توان  $(n)$  و شاخص سازگاری  $(K)$  و همچنین خطا<sup>۴</sup> و ضریب همبستگی<sup>۵</sup>  $(R)$  حاصل از برازش الگوریتم ژنتیک و مقادیر واقعی با توجه به روابط (۲۳) و (۲۴) در جدول ۱ آورده شده‌اند.

فاکتور اصطکاک برای جریان آرام و جریان متلاطم به‌صورت روابط (۱۲) و (۱۳) تعریف می‌شود [۳۰]:  
جریان آرام:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (12)$$

جریان متلاطم:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{4}{n^{0.75}} \log(Re f^{1-\frac{n}{2}}) - \frac{0.395}{n^{1.2}} \quad (13)$$

که عدد رینولدز اصلاح‌شده برای سیال غیرنیوتنی قانون توان برابر است با:

$$Re = \frac{\rho v D_e}{\mu_{eff}} = \frac{\rho v^{2-n} d_e^n}{K' 8^{n-1}}, \quad n' = n, \quad K' = K \left( \frac{3n+1}{4n} \right) \quad (14)$$

برای فضای حلقوی غیرهم‌مرکز در جریان آرام و متلاطم باید از فاکتور تصحیح فضای حلقوی غیرهم‌مرکز ارائه‌شده توسط هسی اسلام افلو و کارتالوس [۳۱]، استفاده نمود که این معادله برای مقادیر خاص  $n$  و مدل رئولوژیکی قانون توان برای جریان آرام و متلاطم به ترتیب به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) است:

$$\left[ \frac{\Delta P_{ecc}}{\Delta P_{conc}} \right]_{lam} = 1 - 0.072 \frac{\varepsilon}{n} \left( \frac{d_i}{d_o} \right)^{0.8454} - 1.5 \varepsilon^2 \sqrt{n} \left( \frac{d_i}{d_o} \right)^{0.1852} + 0.96 \varepsilon^3 \sqrt{n} \left( \frac{d_i}{d_o} \right)^{0.2527} \quad (15)$$

$$\left[ \frac{\Delta P_{ecc}}{\Delta P_{conc}} \right]_{turb} = 1 - 0.048 \frac{\varepsilon}{n} \left( \frac{d_i}{d_o} \right)^{0.8454} - \frac{2}{3} \varepsilon^2 \sqrt{n} \left( \frac{d_i}{d_o} \right)^{0.1852} + 0.285 \varepsilon^3 \sqrt{n} \left( \frac{d_i}{d_o} \right)^{0.2527} \quad (16)$$

که در آن،  $\varepsilon$  عدم هم‌مرکزی و به‌صورت رابطه (۱۷) است:

$$\varepsilon = \frac{2c}{d_o - d_i} \quad (17)$$

که در آن،  $c$  فاصله مرکز دو لوله است.

قطر معادل و فاکتور تصحیح در این روابط، تجربی هستند. رابطه افت فشار در این بخش، برای ارزیابی نتایج حل عددی

1. Dynamic Test Facility (DTF)
2. Foam Generator Viscometer (FGV)
3. Genetic Algorithm
4. Sum Square Error (SSE)
5. Correlation Coefficient (R)

( $\mu_e$ ) برای مدل هرشل-بالکلی از رابطه (۲۵) محاسبه شد که  $\mu_0$ ، ویسکوزیته در نرخ برش صفر است و از روی نمودار ویسکوزیته-نرخ برش به دست می‌آید.

$$SSE = \sum_{i=1}^N (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2 \quad (19)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\tau_i - \hat{\tau}_i)^2}{\sum_{i=1}^N \tau_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^m \hat{\tau}_i^2}{N}} \quad (20)$$

$$\mu_e = \frac{\tau_0 + K[\gamma^n - (\tau_0 / \mu_0)^n]}{\gamma} \quad (21)$$

در روابط (۱۹) و (۲۰)،  $\tau_i$  تنش برشی اندازه‌گیری شده ویسکومتر و  $\hat{\tau}_i$  مقدار تخمینی حاصل از معادلات (۳) و (۵) با استفاده از پارامترهای رئولوژیکی حاصل از الگوریتم ژنتیک، و  $N$  تعداد نمونه‌هاست. چگالی کف با توجه به کیفیت کف و معادله (۲) و چگالی آب و گاز به عنوان فازهای اصلی تشکیل‌دهنده کف، برای سه کیفیت ۰/۷، ۰/۸، و ۰/۹ به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۲۰۰ و  $100 \text{ kg/m}^3$  در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شد.

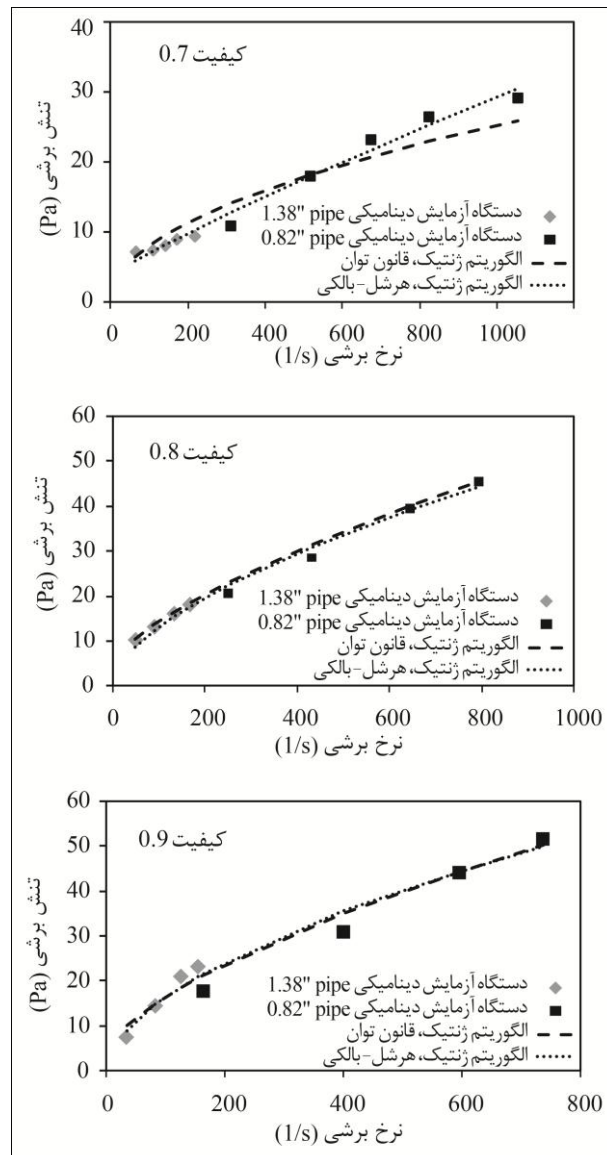
برای کاهش وابستگی نتایج حاصل از حل جریان به شبکه تولیدشده و همچنین دستیابی به شبکه‌ای مطلوب، تأثیر شبکه بر روی نتایج حاصل از حل جریان، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، پنج شبکه با تراکم متفاوت در نظر گرفته و مقدار فشار در فاصله ۰/۱ متر از انتهای فضای حلقوی هم‌مرکز، مقایسه شده و نتایج در جدول ۳ آمده است.

**جدول ۲** پارامترهای رئولوژیکی مدل هرشل-بالکلی برای سیال کف در کیفیت‌های مختلف در فشار ۰/۱۷۲MPa

کیفیت کف (%)	$n$ (-)	$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$\tau_0$ (Pa)	$SSE$ (Pa <sup>2</sup> )	$R$
۹۰	۰/۶۵۱۶	۰/۶۲۷۳۶	۳/۸	۳۸/۰۶	۰/۹۸۷
۸۰	۰/۶۶۵	۰/۴۹	۳/۷۷۵	۱۱/۱	۰/۹۹۶
۷۰	۰/۸۷۶۵	۰/۰۶۰۵	۳/۵	۱۱/۸۲	۰/۹۹۱

**جدول ۳** بررسی شبکه‌های محاسباتی مختلف

شبکه	فشار (Pa) در	$z/L=0.8$
$8 \times 60 \times 200$	۷۶۵/۶۷	۷۶۵/۳۴
$10 \times 40 \times 200$	۷۶۵/۳۴	۷۶۵/۳۴
$15 \times 60 \times 200$	۷۶۵/۳۴	۷۶۵/۳۴
$15 \times 60 \times 500$	۷۶۵/۳۴	۷۶۵/۳۴
$20 \times 80 \times 500$	۷۶۵/۳۴	۷۶۵/۳۴

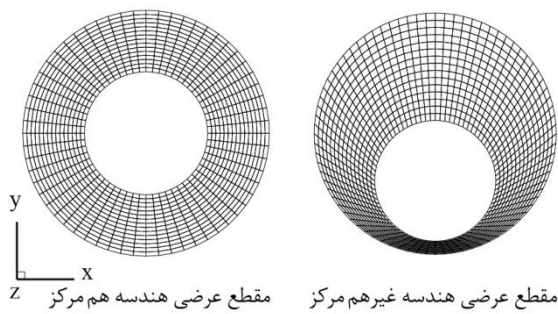


شکل ۲ برآزش مدل رئولوژیکی HB و PL توسط GA بر داده‌های DTF [v]

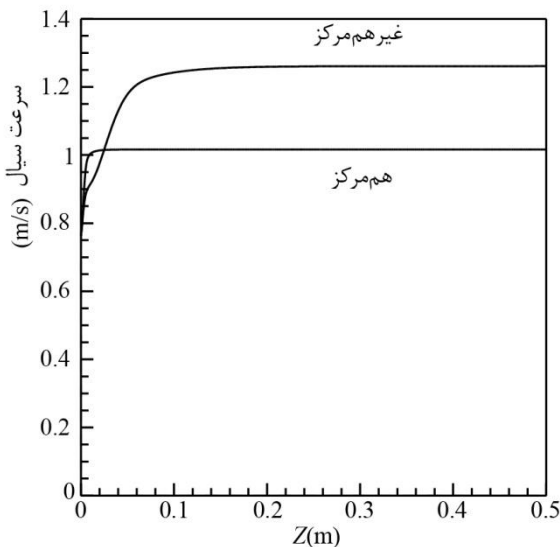
**جدول ۱** پارامترهای رئولوژیکی مدل قانون توان برای سیال کف در کیفیت‌های مختلف در فشار ۰/۱۷۲MPa

کیفیت کف (%)	$n$ (-)	$K$ (Pa.s <sup>n</sup> )	$SSE$ (Pa <sup>2</sup> )	$R$
۹۰	۰/۵۵۲۸	۱/۲۸۳	۳۷/۳۵	۰/۹۸۷
۸۰	۰/۵۹۱	۰/۸۵۴۶	۱۳/۷۸	۰/۹۹۴
۷۰	۰/۶۶	۰/۳	۱۷/۲	۰/۹۸۱

پارامترهای مدل هرشل-بالکلی یعنی تنش تسلیم ( $\tau_0$ )، شاخص سازگاری ( $K$ ) و شاخص قانون ( $n$ ) با استفاده از الگوریتم ژنتیک در جدول ۲ آورده شده است. ویسکوزیته مؤثر



شکل ۳ شبکه بندی مقطع عرضی هندسه



شکل ۴ توسعه یافتگی جریان در فضای حلقوی (سرعت ورودی سیال ۰/۷۶۲m/s، کیفیت کف ۰/۸ و مدل هرشل-بالکلی)

## ۵- نتایج و بحث

نتایج شبیه سازی عددی حجم محدود برای سیال غیرنیوتنی کف در فضای حلقوی هم مرکز و غیر هم مرکز با در نظر گرفتن چرخش لوله انجام شده و تأثیر پارامترهای مدل رئولوژیکی، سرعت جریان و کیفیت کف بر روی افت فشار بررسی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. همچنین نتایج عددی با روش شکاف معادل برای سیال قانون توان مقایسه شده است. تمام نتایج در نمودارها و اشکال به صورت بعددار هستند که علت این امر، بررسی کاربردی پارامترها در حفاری است.

### ۵-۱- تأثیر مدل رئولوژیکی بر افت اصطکاکی فشار

نتایج افت های فشار حاصل از مدل سازی عددی برای دو مدل قانون توان و هرشل-بالکلی با داده های آزمایشگاهی [۷] برای فضای حلقوی هم مرکز با سرعت های مختلف چرخش لوله و

همان طور که مشاهده می شود، تفاوت زیادی بین جواب های شبکه های با سلول های بیشتر از  $10 \times 40 \times 200$  وجود ندارد و نشان می دهد که برای بیشتر از این تعداد مش، حل مستقل از شبکه است. ولی برای اطمینان بیشتر از نتایج حل عددی، تعداد تقسیمات در فاصله حلقوی برابر با ۱۵، تعداد تقسیمات روی مقطع دایره حلقوی هم مرکز برابر با ۶۰ و در طول فضای حلقوی ۵۰۰ مش ( $15 \times 60 \times 500$ ) در نظر گرفته شد. این تعداد مش برای فضای حلقوی غیرهم مرکز (۰/۷۸)  $15 \times 80 \times 400$  در نظر گرفته شد و مرزهای ورودی، خروجی، دیواره چاه و دیواره لوله داخلی برای هندسه، تعریف شدند.

شکل ۳ شبکه بندی مقطع عرضی هندسه مورد نظر (شکل ۱) را نشان می دهد.

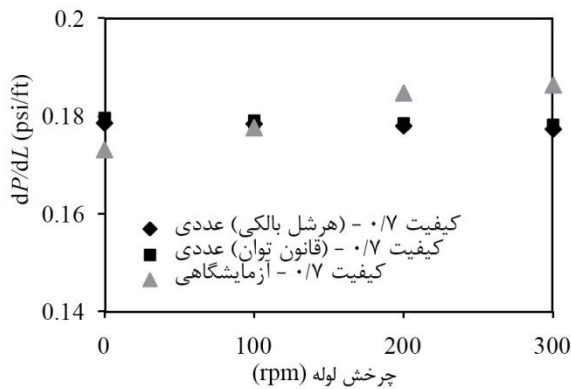
شرایط زیر برای مدل سازی عددی در نظر گرفته شده است:

- جریان هم دما،
  - حالت پایدار و آرام،
  - سیال کف به عنوان سیال غیرنیوتنی همگن و تراکم ناپذیر.
- گسسته سازی معادلات حاکم بر جریان بر پایه روش حجم محدود توسط نرم افزار فلونت است که در آن میدان های فشار و سرعت با روش جداسازی متغیرها بدست می آیند و معادلات غیرخطی کوپل شده، از روش تکرار عددی حل می شوند.

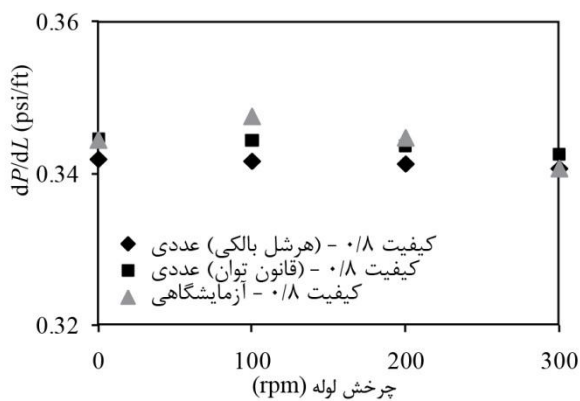
بدین منظور از الگوریتم سیمپل-سی<sup>۱</sup> که اصلاح شده الگوریتم سیمپل است، برای حل همزمان فشار و سرعت استفاده شده است. همچنین الگوریتم کوئیک<sup>۲</sup> برای گسسته سازی معادلات اندازه حرکت با توجه به دقت مرتبه دوم آن به کار رفته است [۲۸].

معیارهای مختلفی برای بررسی همگرایی وجود دارد. معیار انتخاب شده در این مطالعه مقدار باقی مانده ها برای معادله پیوستگی و معادلات ممنتوم است که برای همه معادلات برابر  $10^{-10}$  در نظر گرفته شده است. توسعه یافتگی جریان برای شرایط مدل سازی در اینجا در حدود کمتر از ۰/۱ متر رخ می دهد که برای دو فضای حلقوی هم مرکز و غیر هم مرکز در شکل ۴ نشان داده شده است، این موضوع نشان می دهد که طول در نظر گرفته شده برای مدل سازی به اندازه کافی بزرگ است.

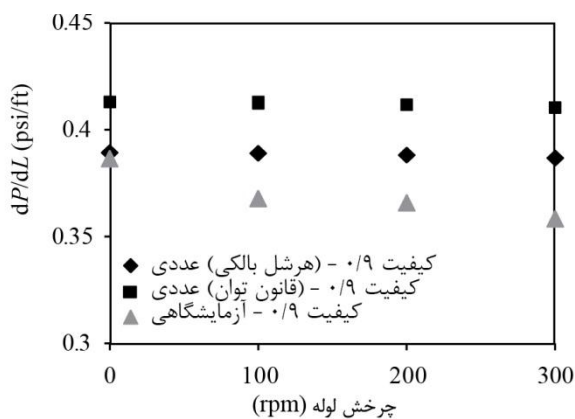
1. SIMPLEC  
2. Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics (QUICK)



شکل ۵ مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز (سرعت سیال ۰/۷۶۲m/s)



شکل ۶ مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز (سرعت سیال ۰/۷۶۲m/s)



شکل ۷ مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی با نتایج آزمایشگاهی در فضای حلقوی هم‌مرکز (سرعت سیال ۰/۷۶۲m/s)

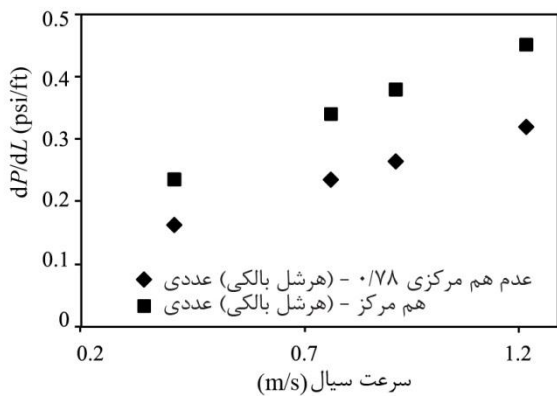
سرعت سیال برابر با ۰/۷۶۲m/s در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ برای کیفیت‌های مختلف با هم مقایسه شده‌اند.

شکل ۵، مقایسه بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از حل عددی در دو مدل رئولوژیکی را در چرخش‌های مختلف لوله برای کیفیت کف ۰/۷ نشان می‌دهد. نتایج آزمایشگاهی، افزایش جزئی در افت فشار با چرخش لوله را نشان می‌دهد که می‌تواند به خاطر ایجاد حالت تلاطم در کیفیت‌های پایین کف باشد. در حالی که نتایج عددی به مقدار خیلی جزئی کاهش افت فشار با افزایش چرخش لوله را نشان می‌دهد که تقریباً قابل چشم‌پوشی است. دلیل این کاهش، کاهش ویسکوزیته مؤثر است که به خاطر آن اصطکاک نزدیک دیواره چرخشی داخلی کاهش یافته و باعث کاهش افت فشار می‌شود. ولی اگر چرخش لوله در حدی باشد که باعث شکستن "لایه‌های خلی" جریان شود، تلاطم القاء شده باعث افزایش افت فشار خواهد شد. میانگین خطای نسبی بین مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر عددی برای دو مدل HB و PL به ترتیب برابر با ۳٪ و ۳۱٪ است.

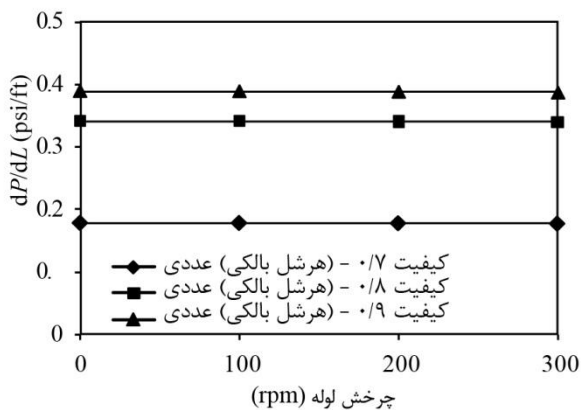
شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی برای دو مدل رئولوژیکی قانون توان و هرشل-بالکی با نتایج آزمایشگاهی را در کیفیت‌های بالای کف (۰/۸ و ۰/۹) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود افت فشار به مقدار جزئی روند کاهشی با افزایش چرخش لوله دارد که این روند کاهشی ناشی از تأثیرات رفتار کاهش ویسکوزیته در اثر افزایش نرخ برش است. میانگین خطای نسبی بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی برای دو مدل HB و PL برای کف ۰/۸ به ترتیب برابر با ۰/۸٪ و ۰/۵٪ و برای کف ۰/۹ به ترتیب برابر با ۱۱٪ و ۵٪ است.

تطابق بهتر نتایج مدل‌سازی عددی مدل هرشل-بالکی در سه حالت فوق نسبت به مدل رئولوژیکی قانون توان با نتایج آزمایشگاهی، نشان از وجود تنش تسلیم در سیالات مورد مطالعه دارد، در نتیجه بهتر است که برای محاسبات هیدرولیکی از مدل هرشل-بالکی استفاده شود. با این وجود خطاهای حاصل از دو مدل، اختلاف چشم‌گیری با هم ندارند. در نتیجه با توجه به سادگی مدل قانون توان در شبیه‌سازی‌های عددی، اگر بتوان مدل رئولوژیکی قانون توان معادل با مدل هرشل-بالکی، به داده‌های تنش برشی- کرنش برشی برازش کرد، می‌توان از این مدل برای محاسبات هیدرولیکی استفاده نمود.

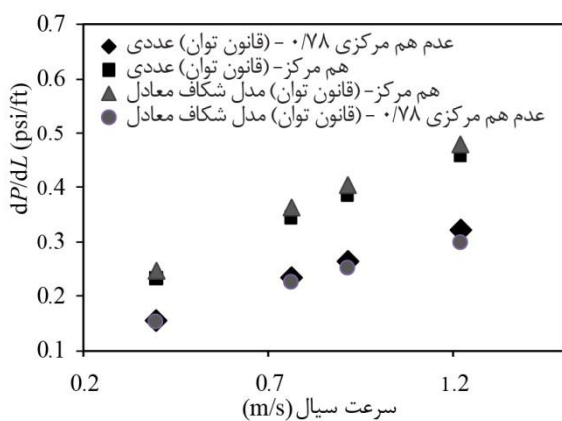




شکل ۸ مقایسه افت فشار حاصل از حل عددی در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (چرخش لوله ۰ rpm)



شکل ۹ افت فشار حاصل از حل عددی برای کیفیت‌های مختلف کف (سرعت سیال 0/762 m/s)



شکل ۱۰ افت فشار حاصل از حل عددی و شکاف معادل در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز (چرخش لوله ۰ rpm)

با توجه به نتایج حاصل که اختلاف بین مقادیر حل عددی و

### ۵-۲- تأثیر سرعت سیال بر افت اصطکاکی فشار

شکل ۸، مقایسه بین نتایج حاصل از حل عددی را برای سیال مدل هرشل-بالکلی و مدل قانون توان برای دو فضای حلقوی هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز ( $e=0/78$ ) در سرعت‌های مختلف سیال در کیفیت کف 0/8 نشان می‌دهد. افت فشار با افزایش سرعت سیال در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز، افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود که افت فشار در فضای حلقوی غیرهم‌مرکز در صورت ثابت بودن پارامترهای دیگر، نسبت به حالت هم‌مرکز حدود 30٪ کمتر است. علت این امر این است که در فضای حلقوی هم‌مرکز عبور جریان از کل فضای حلقوی است و اصطکاک بیشتری بین سیال و دیواره‌ها به وجود می‌آید و افت فشار بیشتر می‌شود.

### ۵-۳- تأثیر کیفیت کف بر افت اصطکاکی فشار

شکل ۹، مقایسه بین افت فشار حاصل از حل عددی برای کیفیت‌های مختلف کف با مدل رئولوژیکی هرشل-بالکلی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش کیفیت کف، افت فشار نیز افزایش می‌یابد که متأثر از پارامترهای رئولوژیکی است. چون با افزایش کیفیت کف، تراکنش بین حباب‌ها و ویسکوزیته مؤثر سیال افزایش می‌یابد و باعث افزایش افت فشار می‌شود.

### ۵-۴- مقایسه نتایج روش شکاف معادل و حل عددی برای مدل رئولوژیکی قانون توان

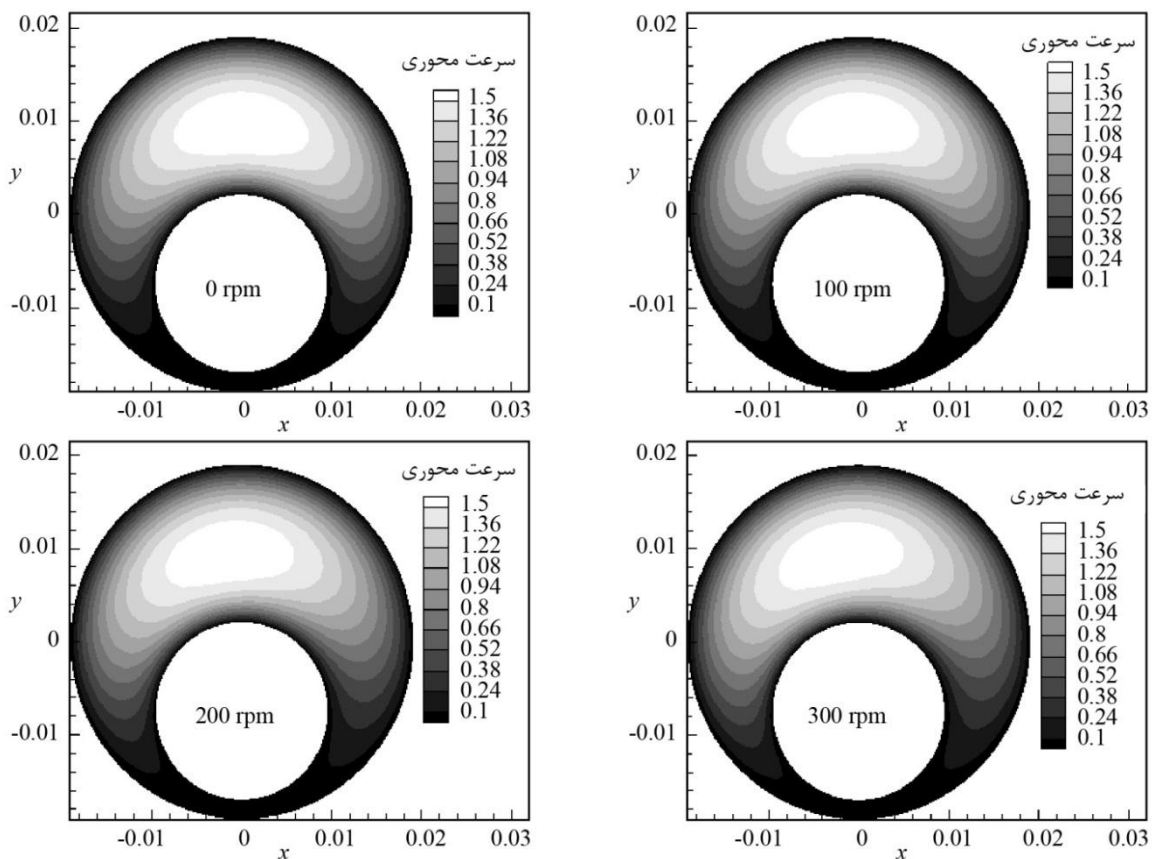
در شکل ۱۰، نتایج افت فشار حاصل از مدل‌سازی عددی و روش شکاف معادل برای سیال قانون توان در حالتی که لوله حفاری بدون چرخش است، در سرعت‌های مختلف سیال کف با کیفیت 0/8 در فضای حلقوی هم‌مرکز و فضای حلقوی غیرهم‌مرکز ( $e=0/78$ ) نشان داده شده است. با توجه به پارامترهای مسأله و معادله (۱۵)، مقدار ضریب تصحیح فضای حلقوی در شکاف معادل برابر با 0/624 محاسبه شد، یعنی  $(\Delta P_{ecc} = 0.624 \Delta P_{con})$ . مقایسه نتایج بین مقادیر افت فشار حاصل از حل عددی و مدل شکاف معادل حاکی از انطباق خوب آنها بوده و اختلاف جزئی (خطای نسبی کمتر از 5٪) با همدیگر دارند.

بیشتر جریان سیال از قسمت گشادتر شکاف می‌گذرد و سرعت محوری در قسمت باریک حتی با چرخش لوله، اغلب صفر است. نتایج حل عددی نشان می‌دهند که چرخش لوله تأثیر چشم‌گیری در پروفیل سرعت محوری در فضای حلقوی غیرهم‌مرکز (۰/۷۸) ندارد و هسته سرعت محوری بیشینه را در جهت چرخش لوله به مقدار کم جابجا می‌کند. چرخش لوله باعث توزیع دوباره سرعت در فضای حلقوی شده که این حالت بیشتر در تمیزسازی چاه‌های افقی و شیب‌دار مؤثر است و از تشکیل بستر خرده‌ها در فضای حلقوی جلوگیری می‌کند. پروفیل سرعت مماسی وابسته به چرخش لوله است و با شعاع کاهش می‌یابد و به تدریج در دیواره لوله خارجی به صفر می‌رسد. شکل ۱۲، سرعت مماسی در فضای حلقوی غیرهم‌مرکز (۰/۷۸) را نشان می‌دهد. با افزایش سرعت چرخش لوله، تأثیر آن بر سرعت مماسی بیشتر شده و از گستردگی بیشتری در قسمت پهن فضای حلقوی برخوردار می‌شود.

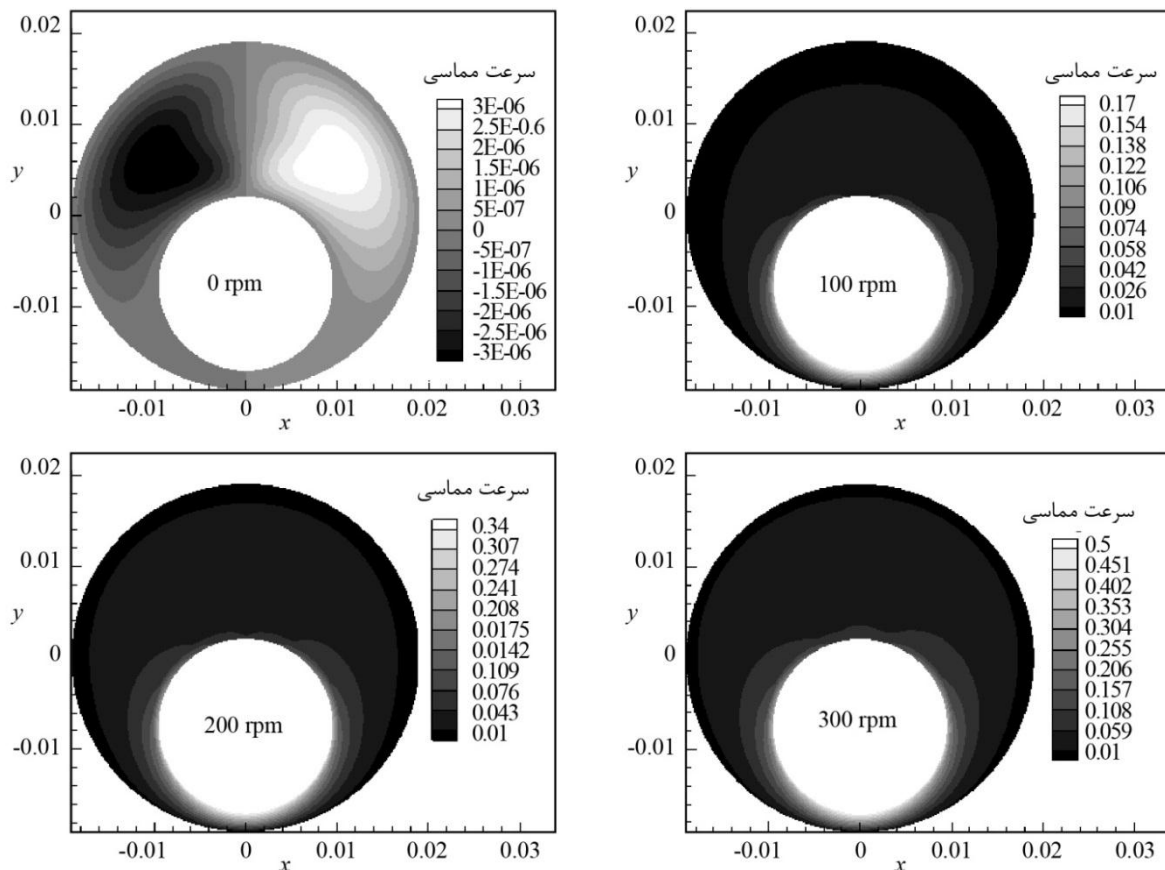
آزمایشگاهی کمتر از ۵٪ است، می‌توان از حل عددی در محاسبه افت فشار در حالت‌های مختلف چرخش لوله و هندسه‌های هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز استفاده نمود. نتایج افت فشار حاصل از حل عددی می‌تواند در طراحی فشار مورد نیاز پمپ در حفاری مفید واقع شود و از هزینه‌های جانبی بکاهد.

#### ۵-۵- تأثیر چرخش لوله داخلی بر پروفیل سرعت جریان سیال کف

چرخش لوله باعث ایجاد جریان‌های ثانویه در فضای حلقوی می‌شود. سرعت ثانویه در فضای حلقوی دارای تأثیر بسزایی در تمیزسازی چاه و در برهم زدن بستر تشکیل‌شده از خرده‌ها در فضای حلقوی است. در این مطالعه پروفیل‌های سرعت جریان سیال کف با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی بدست آمده‌اند. شکل ۱۱، سرعت محوری را در فضای حلقوی با عدم هم‌مرکزی ۰/۷۸ نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ کنتور سرعت محوری (m/s) جریان کف با کیفیت ۰/۸ در فضای حلقوی غیرهم‌مرکز در سرعت‌های مختلف چرخش لوله (سرعت ورودی سیال ۰/۷۶۲ m/s و مدل هرشل-بالکلی)



شکل ۱۲ کنتور سرعت مماسی (m/s) جریان سیال کف با کیفیت ۰/۸ در حلقوی غیرهم‌مرکز (۰/۷۸) در سرعت‌های مختلف چرخش لوله (سرعت ورودی سیال ۰/۷۶۲m/s و مدل هرشل-بالکلی)

عددی نشان می‌دهد که افت فشار با افزایش سرعت سیال و کیفیت کف افزایش و با افزایش چرخش لوله کاهش می‌یابد. همچنین افت فشار حاصل برای فضای حلقوی هم‌مرکز در شرایط جریانی یکسان، نسبت به فضای حلقوی غیرهم‌مرکز بیشتر است. چرخش لوله تأثیر چشم‌گیری در سرعت محوری ندارد و به مقدار کم باعث جابجایی هسته سرعت محوری بیشینه در جهت چرخش لوله در عدم هم‌مرکزی بالا (۰/۷۸) می‌شود. ولی با توجه به ایجاد سرعت مماسی با چرخش لوله، این پدیده در تمیزسازی چاه در حالت‌های افقی و شیب‌دار بسیار مفید است.

## ۷- مراجع

- [1] Ramalho J., "Underbalanced Drilling in the Reservoir, An Integrated Technology Approach[C]", *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Moscow, Russia, 2006.*

## ۶- نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی عددی افت فشار با استفاده از روش حجم محدود در فضای حلقوی هم‌مرکز و غیرهم‌مرکز چاه انجام گرفت. تأثیر پارامترهای مختلف از جمله رئولوژی سیال کف، سرعت سیال کف، کیفیت کف، چرخش لوله حفاری و عدم هم‌مرکزی لوله و چاه، بر افت فشار بررسی شدند. نتایج عددی در تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی پیشین است. میانگین خطای نسبی بین مقادیر آزمایشگاهی و عددی برای دو مدل HB و PL برای کف ۰/۷، به ترتیب برابر با ۳٪ و ۳/۱٪، برای کف ۰/۸ برابر با ۰/۸٪ و ۰/۵٪ و برای کف ۰/۹ برابر با ۵/۱٪ و ۱۱٪ است. بنابراین اگر خطای حاصل از برازش دو مدل به داده‌های تنش- کرنش ناچیز باشد، می‌توان از مدل قانون توان معادل با مدل هرشل-بالکلی، با توجه به سادگی این مدل، در شبیه‌سازی‌های عددی استفاده کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی

- [14] Al-Kayiem HH., MohdZaki N., Asyraf MZ., Elfee ME., "Simulation of The Cuttings Cleaning During The Drilling Operation", *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, No. 6, 2010, pp. 800-806.
- [15] Sorgun M., Ozbayoglu ME., "Predicting Frictional Pressure Loss during Horizontal Drilling for non-Newtonian Fluids", *Energy Sources, Part A*, Vol. 33, 2011, pp.631-640
- [16] Pereira FAR., Ataide CH., Barrozo MAS., "CFD Approach using A Discrete Phase Model for Annular Flow Analysis", *Latin American Applied Research*, Vol. 40, 2010, pp. 53-60.
- [17] Li Y., Kuru E., "Numerical Modeling of Cuttings Transport with Foam in Vertical Wells", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 44, No.3, 2005, pp. 31-39.
- [18] Wang R., Cheng R., Wang H., Bu Y., "Numerical Simulation of Transient Cuttings Transport with Foam Fluid in Horizontal Wellbore", *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 214, 2009, pp. 437-444.
- [19] Herzhaft B., "Rheology of Aqueous Foams: A Literature Review of Some Experimental Works", *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 54, No. 5, 1999, pp. 587-596.
- [20] Sanghani V., Ikoku CU., "Rheology of Foam and Its Implication in Drilling and Cleanout Operations", *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 105, No. 3, 1983, pp. 362-371.
- [21] Enzendorfer C., Harris R., Valko P., Economides M., "Pipe Viscometry of Foams", *Journal of Rheology*, Vol. 39, 1995, pp.345-358.
- [22] Beyer AH., Millhone RS., Foote RW., "Flow Behavior of Foam as a Well Circulating Fluid", *Proceedings of the 47th Annual Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME*, San Antonio, TX, 1972.
- [23] Blauer RE, Mitchel BJ, Kohlhaas CA., "Determination of Laminar, Turbulent, and Transitional Foam Flow Losses in Pipes", *Proceedings of the SPE Annual California Regional Meeting*, San Francisco, California, USA, 1974.
- [24] Kakadjian S., Herzhaft B., Neau L., "HP/HT Rheology of Aqueous Compressible Fluids for Underbalanced Drilling using a Recirculating Rheometer", SPE 80207, *International Symposium on Oilfield Chemistry*, Houston, Texas, USA, 2003.
- [25] Bonilla LF., Shah SN., "Experimental Investigation on the Rheology of Foams", *Proceedings of the SPE/CERI Gas Technology Symposium*, Calgary, Canada, 2000.
- [26] Saintpere S., Marcillat Y., Bruni F., Toure A., "Hole Cleaning Capabilities of Drilling Foams Compared to Conventional Fluids", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Dallas-Texas, USA, 2000.
- [27] Ahmed R., Takach NE., Khan UM., Taoutaou S., James S., Saasen A, and Godoy R., "Rheology of
- [2] Zhu T., Volk L., Carroll H., "Industry State –of-the Art in Underbalanced Drilling", *Project Report*, USA, 1995, pp. 1-38.
- [3] Heller JP., Kuntamukkula MS., "Critical Review of the Foam Rheology Literature", *Industrial Engineering and Chemical Research*, Vol. 26, No.2, 1987, pp. 318-325.
- [4] Sani AM., Shah SN., "Experimental Investigation of Xanthan Foam Rheology", *SPE Production and Operation Symposium*, Oklahoma, USA, 2001.
- [5] Chen Z., Ahmed RM., Miska SZ., Takachi NE., Yu M., Pickell MB., Hallman JH., "Rheology of Aqueous Drilling Foam using a Flow-Through Rotational Viscometer", *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*, Texas, USA, 2005.
- [6] Duan M., Miska S., Yu M., Takach N., Ahmed R., Hallman J., "The Effect of Drillpipe Rotation on Pressure Losses and Fluid Velocity Profile in Foam Drilling", *SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting*, California, 2008.
- [7] Duan M., "Study of Cuttings Transport using Foam with Drill Pipe Rotation under Simulated Downhole Conditions", *PhD Thesis*, Tulsa University, USA, 2007.
- [8] Luorenco AMF., Miska S., Reed TD., Pickell MB., Takach NE., "Study of the Effects of Pressure and Temperature on the Viscosity of Drilling Foams and Frictional Pressure Losses", *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Colorado, USA, 2003.
- [9] Ozbayoglu E., Kuru E., Miska S and Takach N., "A Comparative Study of Hydraulic Models for Foam Drilling", *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 41, No. 6, 2002, pp. 52-61.
- [10] Demirdal B., Cunha JC., "Pressure Losses of non-Newtonian Fluids in Drilling Operations", *International Oil Conference and Exhibition*, Veracruz, Mexico, 2007.
- [11] Ahmed R., Miska S., "Experimental Study and Modeling of Yield Power Law Fluid Flow in Annuli with Pipe Rotation", *IADC/SPE Drilling Conference*, Orlando, 2008.
- [12] Kelessidis VC., Dalamarinis P., Maglione R., "Experimental Study and Predictions of Pressure Losses of Fluids Modeled as Herschel-Bulkley in Concentric and Eccentric Annuli in Laminar, Transitional and Turbulent Flows", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 77, 2011, pp. 305-312.
- [13] Bilgesu HI., Mishra N., Ameri S., "Understanding the Effects of Drilling Parameters on Hole Cleaning in Horizontal and Deviated Wellbores using Computational Fluid Dynamics", *SPE Eastern Regional Meeting held in Lexington*, Kentucky, USA, 2007.

- [31] Hacıislamoglu M., Cartalos U., "Practical Pressure Loss Predictions in Realistic Annular Geometries", *SPE 69th Annual Technical Conference*, New Orleans, 1994, pp.113-126.
- [32] Rooki R., Doulati Ardejani F., Moradzadeh A., Mirzaei H., Kelessidis V.C., Maglione, R. Norouzi, M., "Optimal Determination of Rheological Parameters for Herschel–Bulkley Drilling Fluids using Genetic Algorithms (GAs)", *Korea-Australia Rheology Journal*, Vol. 24, No. 3, 2012, pp. 163-170.
- Foamed Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, No. 4, 2009, pp. 353-361.
- [28] Versteeg HK., Malalasekera W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method", 2<sup>nd</sup> edition, Pearson, Prentice Hall, 2007.
- [29] Bourgoyne AT., Chenevert ME, Millheim KK, Young FS., "Applied Drilling Engineering", SPE Textbook Series, Richardson TX, 1991.
- [30] Dodge DW., Metzner AB., "Turbulent Flow in non-Newtonian Systems", *AIChE Journal*, Vol. 5, 1959, pp.189-204.