



توسعه یک رابطه کاربردی برای تخمین افت فشار در مته حفاری کاجی با استفاده از مدل رئولوژیک بینگهام

سید سعید بحرینیان^{۱*}، امین نباتی^۲ و ابراهیم حاجی دولو^۳

^۱ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی فنی و مهندسی اسفراین، اسفراین، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۳

چکیده

در این مقاله، افت فشار در مته حفاری با شبیه‌سازی جریان سیال غیرنیوتنی محاسبه شده است. مته حفاری کاجی نوع اف-۳ با اندازه ۷-۷/۸ اینچ بوده و دارای سه نازل با اندازه یکسان می‌باشد. محاسبه افت فشار برای نازل‌هایی با اندازه‌های ۷/۳۲، ۹/۳۲، ۱۰/۳۲ و ۱۱/۳۲ اینچ انجام شده است. تحلیل جریان در مته حفاری برای هشت نوع گل حفاری صورت گرفته و از مدل رئولوژیک بینگهام برای تعیین خواص رئولوژیک گل‌های حفاری استفاده شده است. برای تعیین ضرایب مدل رئولوژیک، خواص رئولوژیک گل‌های حفاری با دستگاه ویسکومتر فن اندازه‌گیری شده است. افت‌های فشار محاسبه شده از شبیه‌سازی جریان، با نتایج تجربی و رابطه ایکل-بلستین مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، روش عددی، افت فشار در مته حفاری را با متوسط خطای ۹/۶۶ درصد تخمین می‌زند؛ در حالی که متوسط خطای رابطه ایکل-بلستین ۱۷/۱۶ درصد است. یک رابطه جدید برای تخمین افت فشار در مته حفاری کاجی پیشنهاد شده است، در این رابطه تاثیر خواص رئولوژیک سیال در تخمین افت فشار در نظر گرفته می‌شود. افت‌های فشار محاسبه شده با رابطه جدید، با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد، رابطه جدید، با دقت مناسبی و با خطای ۸/۳۱ درصد افت فشار در مته حفاری را محاسبه می‌کند.

کلمات کلیدی: افت فشار؛ مته حفاری کاجی؛ گل حفاری؛ مدل رئولوژیک بینگهام؛ دینامیک سیالات محاسباتی.

Development of an Applied Relationship for Pressure Drop Estimation in Tri-Cone Drill Bit Using Bingham Rheological Model

S.S. Bahrainian^{1*}, A. Nabati², E. Hajidavalloo³

¹ Prof., Mech. Eng., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

² Assis. Prof., Mech. Eng., Esfarayen University of Technology, Esfarayen, Iran.

³ Prof., Mech. Eng., Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran.

Abstract

In this study, non Newtonian fluid flow simulations are obtained through a tri-cone drilling bit. F-3 drill bit of size 7-7/8 inch is used for pressure drop calculations. The drilling bit contains three nozzles of equal size. Nozzle sizes of 7/32, 9/32, 10/32, and 11/32 inch are selected for simulations and each solution considered three nozzles of equal size. Eight drilling fluids of different density and rheological properties are selected and Bingham rheological model is employed in this study. Rheological data were obtained using a Fann 35 viscometer. To validate the results, calculated pressure drops from flow simulations are compared to experimental data and Eckel-Bielstein equation. The results show that flow simulations have predicted the pressure drop for all nozzle sizes with an absolute average percentage error of 9.66, whereas Eckel-Bielstein equation has an absolute average percentage error of 17.16. A new equation is proposed to calculate the pressure drop in the tri-cone bit for Bingham rheological model. The proposed equation considers effects of rheological parameters on the pressure drop. Comparison of results with experimental data revealed that the proposed equation can predict pressure drops with an absolute average percentage error of 8.31.

Keywords: Pressure Drop; Tri-Cone Bit; Drilling Mud; Bingham Rheological Model; Computational Fluid Dynamics.

۱- مقدمه

گل حفاری در یک سیکل از طریق تجهیزات سطحی وارد چاه شده و پس از عبور از لوله حفاری، مته و فضای دالیز به سطح زمین برمی‌گردد. در مسیر گردش گل حفاری، افت فشار اصطکاک بوجود می‌آید. افت فشار اصطکاک شامل، افت فشار در تجهیزات سطحی، لوله‌های حفاری، مته و دالیز است. افت فشار ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین گل حفاری و سطوح از طریق تنش برشی با خواص رئولوژیک گل حفاری ارتباط مستقیم دارد. تخمین صحیح افت فشار در چاه موجب بهره‌وری بیشتر و افزایش کارایی سیال حفاری می‌شود. برای محاسبه صحیح افت فشار در چاه، باید افت فشار در هر یک از بخش‌های چاه به درستی محاسبه شود. بخش قابل توجهی از افت فشار در مته‌های حفاری بوجود می‌آید. کندال و جونز [۱] به صورت تجربی نشان دادند، ۵۹ تا ۶۶ درصد افت فشار در عملیات حفاری در مته‌های حفاری بوجود می‌آید؛ بنابراین اطلاع دقیق از افت فشار در مته حفاری کمک شایانی به عملیات حفاری می‌کند. مته‌های حفاری انواع مختلفی دارند. مته‌های مخروطی سه کاجی، یکی از پرکاربردترین مته‌ها در صنعت حفاری نفت و گاز است. معمولاً در حفاری سازنده‌های سخت از این نوع مته‌ها استفاده می‌شود. در هنگام حفاری ممکن است، باری حدود ۲۰ تن با سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه بر یاتاقان‌های مته وارد شود، لذا یاتاقان این نوع مته‌ها دارای استحکام و عمر بالا است؛ همچنین یاتاقان‌ها کاملاً آب بندی شده است و توسط گریس موجود در محفظه آن، روانکاری انجام می‌شود. دندان‌های این نوع مته‌ها از فولاد آلیاژی است که سطح آن با استفاده از تنگستن کاربیدی (با استحکام بسیار بالا و مقاومت به سایش بالا) پوشش داده شده است. وجود نازل‌ها در این نوع مته‌ها موجب ایجاد جت سیال با قدرت بسیار بالایی در خروجی مته می‌شود. این جت سیال علاوه بر تمیز کردن کنده‌های حفاری چسبیده به دندان‌ها، به کف چاه نیز برخورد می‌کند که کمک به کنده شده سازند کف چاه و جابجایی ذرات کنده شده می‌کند.

سوتکو و مایرس [۲] به بررسی اثر اندازه نازل، تعداد نازل‌ها و موقعیت آن‌ها بر توزیع فشار در ته چاه پرداختند. نتایج نشان می‌دهند، اندازه و تعداد نازل‌ها اثر مستقیمی بر تمیزکاری چاه دارد. با کاهش تعداد نازل‌ها (از سه به دو نازل) طول نازل باید افزایش یابد تا فرآیند حفاری به نحو

مطلوب انجام شود. تاونسند [۳] با استفاده از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی، تاثیر تعداد نازل‌های مته حفاری را بر عملکرد مته بررسی نمود. وی در بررسی خود از مته مخروطی کاجی^۱ ۷/۸-۷ اینچ استفاده نموده و نتیجه گرفته است که استفاده از دو نازل باعث افزایش نرخ حفاری نسبت به حالت استفاده از سه نازل می‌شود. اسمالینگ و کی [۴] نشان دادند که طول نازل و فاصله نازل‌ها پارامتر مهمی در افزایش فشار مته حفاری و نرخ حفاری می‌باشند. رامسی و همکاران [۵]، فشار ته چاه و افت فشار در مته را هنگام عملیات حفاری اندازه‌گیری کردند. مقایسه نتایج افت فشار در نازل مته با نتایج پیش بینی شده از رابطه ایکل نشان می‌دهد که افت فشار اندازه‌گیری شده، ۱۰ تا ۲۵ درصد کمتر از افت فشار پیش بینی شده توسط رابطه ایکل است. آن‌ها نشان دادند با افزایش دبی جریان، اختلاف افت فشار اندازه‌گیری شده با افت فشار محاسبه شده از رابطه ایکل در نازل مته بیشتر می‌شود. وارن و وینترس [۶]، تاثیر اندازه قطر نازل مته و تعداد نازل‌ها بر پروفیل فشار و میزان سایش در ته چاه را بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهند، استفاده از دو نازل بجای سه نازل موجب افزایش افت فشار در مته حفاری می‌شود. کوک و همکاران [۷] با بررسی نتایج اندازه‌گیری شده از حفاری چند چاه، نشان دادند، افت فشار محاسبه شده از روابط بیشتر از افت فشار اندازه‌گیری شده است. ویلس و پیسایر [۸] نشان دادند، افت فشار در ته چاه و شدت جریان آشفته جت سیال، وابسته به قطر نازل مته حفاری است. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد، با افزایش قطر نازل مته حفاری، شدت آشفته‌گی‌ها در ته چاه کاهش می‌یابد. ژائو و همکاران [۹] با استفاده از شبیه‌سازی عددی جریان، توزیع فشار در ته چاه را بررسی کردند. هانسن [۱۰] نشان داد، بیش از نیمی از افت فشار ایجاد شده توسط پمپ در فرآیند حفاری، در نازل‌های مته حفاری اتلاف می‌شود. مسلمی و همکاران [۱۱] تاثیر تعداد و چیدمان نازل‌های مته حفاری بر هیدرولیک مته را بررسی کردند. مینگ و همکاران [۱۲] به بررسی اثر افت فشار مته حفاری بر نرخ حفاری پرداختند.

در این مقاله، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی جریان در مته حفاری افت فشار در مته حفاری مخروطی کاجی

^۱ Tri-cone bite

زاویه پیچش را برای شش سرعت زاویه ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه دارد. دقت اندازه گیری ویسکومتر فن 35A برابر با ۱ سانتی پواز (معادل ۰/۰۰۱ Pa.s) است. با قرار دادن زاویه پیچش θ در رابطه (۲) تنش برشی سیال محاسبه می‌شود [۱۸].

$$\tau = \frac{k\theta}{2\pi hr^2} \quad (2)$$

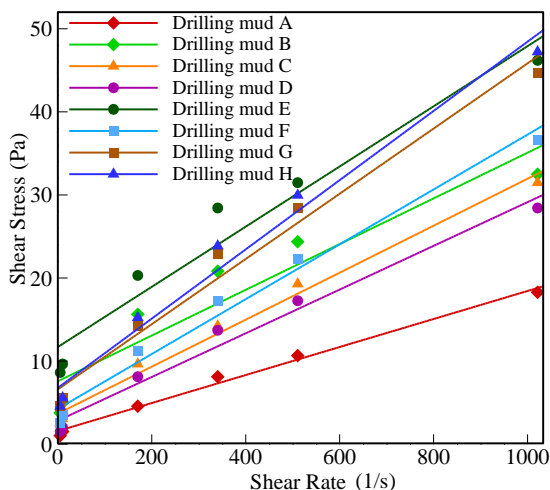
در این رابطه k ثابت پیچشی فنر، θ زاویه پیچش، r شعاع استوانه داخلی و h ارتفاع استوانه است.

همچنین با قرار دادن سرعت زاویه‌ای N در رابطه (۳) نرخ کرنش برشی روی استوانه داخلی بدست می‌آید [۱۸].

$$\dot{\gamma} = \frac{4\pi N}{60 \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^2 \right]} \quad (3)$$

در این رابطه N تعداد دور در دقیقه، R_1 شعاع استوانه داخلی و R_2 شعاع استوانه خارجی دستگاه ویسکومتر دورانی است.

با نتایج اندازه‌گیری شده و روابط (۲) و (۳) تنش برشی و نرخ کرنش برشی محاسبه شده است. شکل ۱ رئوگرام گل‌های حفاری را نشان می‌دهد. این رئوگرام برای مدل رئولوژیک بینگهام است. با استفاده از رئوگرام ترسیم شده و روابط مربوطه، ضرایب ثابت مدل‌های رئولوژیک بینگهام محاسبه شده است. در جدول ۱ ثابت‌های مدل رئولوژیک بینگهام برای هشت گل حفاری آورده شده است.



شکل ۱- رئوگرام هشت نوع گل حفاری مورد بررسی

محاسبه شده است. در مراحل شبیه‌سازی جریان، از مدل رئولوژیک بینگهام برای خواص رئولوژیک سیال استفاده شده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها با نتایج تجربی [۱۳] و نتایج مستخرج از رابطه ایکل-بلاستین [۱۴] مقایسه شده است. سپس تاثیر اندازه نازل‌ها، خواص رئولوژیک گل حفاری و دبی جریان بر افت فشار در مته حفاری بررسی شده است. در ادامه یک رابطه برای محاسبه دقیق افت فشار در مته مخروطی کاجی با مدل رئولوژیک بینگهام پیشنهاد شده است.

۲- خواص رئولوژیک گل حفاری

۲-۱- مدل رئولوژیک بینگهام

بر خلاف سیال نیوتنی که ضریب لزجت در نرخ برش ثابت است، در سیالات غیر نیوتنی یک رابطه غیر خطی بین تنش برشی و نرخ کرنش برشی وجود دارد. مدل‌های متعددی برای سیالات غیر نیوتنی ارائه شده که هر کدام در محدوده خاصی از نرخ برش و تنش اعمال شده اولیه کاربرد دارند [۱۵ و ۱۶]. در این تحقیق، از مدل رئولوژیک بینگهام برای خواص رئولوژیک گل حفاری استفاده شده است. این مدل توسط رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۷].

$$\begin{cases} \tau = \tau_B + \mu_B \dot{\gamma} & \text{if } \tau > \tau_B \\ \tau = 0 & \text{if } \tau < \tau_B \end{cases} \quad (1)$$

در این رابطه τ_B و μ_B ثابت‌های برازش منحنی بوده و به ترتیب بیان کننده تنش تسلیم بینگهام و لزجت پلاستیک بینگهام می‌باشند.

۲-۲- اندازه گیری خواص رئولوژیک

خواص رئولوژیک گل حفاری با یک دستگاه ویسکومتر دورانی فن 35A [۱۷] اندازه‌گیری شده است. این ویسکومتر از دو استوانه هم محور تشکیل شده است. استوانه خارجی ثابت بوده و استوانه داخلی قابلیت چرخش دارد. شعاع استوانه‌های داخلی و خارجی به ترتیب برابر با ۰/۰۱۷۲۴۵ و ۰/۰۱۸۴۱۵ متر، ارتفاع استوانه داخلی ۰/۰۳۸ متر و ثابت فنر پیچشی این ویسکومتر $3/87 \times 10^5$ N/m است. سیال حفاری در فضای بین دو استوانه قرار می‌گیرد. سپس با چرخش استوانه داخلی در سرعت زاویه مشخص، زاویه پیچش اعمال شده به استوانه خارجی اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه توانایی اندازه‌گیری

اجمالی از مراحل شبیه‌سازی آورده شده است. لازم به ذکر است که جزئیات فرآیند مدل‌سازی و شبیه‌سازی در مرجع [۱۹] بیان شده است.

در این مقاله، افت فشار در مته مخروطی کاجی ۷-۷/۸ اینچ، مدل F-3 شرکت اسمیت محاسبه شده است. این مته شامل سه تیغه با شکل‌های متفاوت و سه نازل یکسان است. روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی هندسی و اندازه‌گیری ابعاد اجسام وجود دارد. برای هندسه‌های پیچیده از روش کاربرد همزمان ابزارهای اندازه‌گیری و نرم افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر استفاده می‌شود [۲۰]. شکل ۲ تصویر مته حفاری را نشان می‌دهد.

دامنه محاسباتی شامل یک مته حفاری مخروطی درون یک چاه است. قطر چاه ۳۹۴ میلی‌متر و ارتفاع آن ۹۱۴ میلی‌متر در نظر گرفته شده است؛ بنابراین فضای محاسباتی شامل مجراهای درون مته حفاری و فضای بین مته و دیواره چاه است.

برای تولید شبکه درون میدان جریان، به دلیل پیچیدگی هندسه جسم، از شبکه بی‌سازمان استفاده شده است. شبکه‌های بی‌سازمان به دلیل انعطاف پذیری و کنترل بیشتر بر شکل و اندازه المان‌ها و تطابق بهتر با ساختارهای هندسی پیچیده، کارآمدتر می‌باشند [۲۱].

پس از تولید شبکه محاسباتی، با استفاده از معادلات حاکم بر جریان و اعمال شرایط مرزی، اقدام به حل جریان آشفته سه بعدی شده است. معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله پیوستگی، معادله مومنتم و معادلات آشفتگی می‌باشند [۱۶]. از مدل آشفتگی $k-\omega$ برای بیان آشفتگی جریان استفاده شده است. مدل $k-\omega$ اثرات اعداد رینولدز پایین،



شکل ۲- مته حفاری مخروطی کاجی ۷-۷/۸ اینچ، مدل F-3 شرکت اسمیت

همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، خطوط ترسیم شده کاملاً روی نقاط اندازه‌گیری شده قرار نگرفته است که نشان دهنده خطای رئوگرام ترسیمی، در تعیین مقدار تنش تسلیم و لزجت پلاستیک گل‌های حفاری است. برای بررسی دقت رئوگرام، متوسط خطای برای هر گل حفاری، با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج رئوگرام ترسیمی، محاسبه شده است (جدول ۲).

۳- شبیه‌سازی جریان گل حفاری در مته

بررسی جریان سیال غیر نیوتنی در صنایع دارای اهمیت قابل ملاحظه‌ای است. از آنجائی‌که انجام مطالعات تجربی در این باب مستلزم صرف وقت و هزینه قابل توجهی است، لذا مطالعه عددی دقیق و سریع آن دارای اهمیت فراوانی است [۱۵]. هدف اصلی این مقاله نشان دادن فرآیند استخراج یک رابطه مناسب برای محاسبه افت فشار در مته حفاری است. با توجه به اینکه نتایج استفاده شده برای این کار با مدل‌سازی هندسی و شبیه‌سازی جریان بدست آمده، در این بخش شرح

جدول ۱- خواص گل‌های حفاری

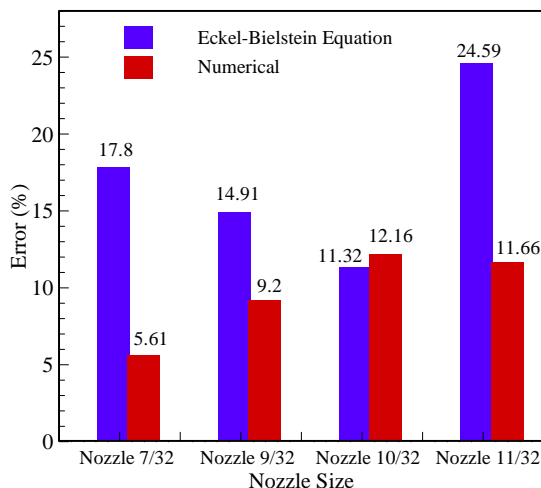
گل حفاری	چگالی (kg/m^3)	تنش تسلیم (Pa)	لزجت پلاستیک (Pa.s)
گل حفاری A	۱۰۲۵	۱/۵۷۹	۰/۰۱۶۸
گل حفاری B	۱۰۹۰	۱۵/۳۶	۰/۰۱۶۸
گل حفاری C	۱۱۲۱/۳	۳/۶۹۹	۰/۰۲۸۲
گل حفاری D	۱۲۰۱/۴	۲/۸۲۱	۰/۰۲۶۳
گل حفاری E	۱۲۴۹/۵	۱۱/۶۹	۰/۰۲۶۲
گل حفاری F	۱۳۲۹/۳	۴/۲۴۷	۰/۰۳۳۰
گل حفاری G	۱۷۱۴	۶/۵۹۵	۰/۰۳۹۲
گل حفاری H	۱۷۴۶	۶/۷۷۹	۰/۰۴۱۶

جدول ۲- متوسط خطای نتایج رئوگرام برای گل‌های حفاری

گل حفاری	A	B	C	D	E	F	G	H
خطا %	۵/۲۸	۱۱/۴	۵/۴۹	۱/۸۵	۶/۰۲	۴/۶۲	۴/۷	۲/۹۴

در این مقاله، با استفاده از نتایج شبیه سازی جریان، افت فشار در مته حفاری محاسبه شده است. برای بررسی صحت نتایج عددی، نتایج حاصل از شبیه سازی جریان با نتایج تجربی [۱۳] مقایسه شده اند. مقایسه و اعتبار سنجی نتایج برای گل حفاری B با چگالی ۱۰۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب، تنش تسلیم Pa ۱۵/۳۶ و لزجت پلاستیک Pa.s ۰/۰۱۶۸ و برای نازل ها با اندازه مختلف انجام شده است. برای هر نازل ۵ دبی جریان در نظر گرفته شده است و در نهایت میانگین خطای پنج دبی برای هر نازل محاسبه شده است. برای مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ افت فشار در دبی های ۸۲، ۱۲۰، ۱۶۲، ۱۹۶ و ۲۲۸ گالن بر دقیقه و برای مته حفاری با نازل های ۹/۳۲ اینچ افت فشار در دبی های ۱۴۲، ۱۷۳، ۲۱۰، ۲۷۲ و ۳۱۸ گالن بر دقیقه محاسبه شده است؛ همچنین محاسبه افت فشار در مته حفاری با نازل های ۱۰/۳۲ اینچی در دبی های ۱۳۴، ۱۷۲، ۲۱۰، ۲۶۱ و ۳۲۴ گالن بر دقیقه و در مته حفاری با نازل های ۱۱/۳۲ اینچی در دبی های ۱۶۱، ۲۳۰، ۲۹۰، ۳۴۷ و ۳۷۰ گالن بر دقیقه انجام شده است. شکل ۳ درصد خطای نتایج شبیه سازی و رابطه ایکل-بلستین را نسبت به نتایج تجربی [۱۳]، برای نازل ها با اندازه مختلف نشان می دهد.

نتایج نشان می دهد، متوسط خطای روش عددی در تخمین افت فشار مته حفاری ۹/۶۶ درصد است و متوسط خطای رابطه ایکل - بلستین ۱۷/۱۶ درصد است؛ بنابراین



شکل ۳- درصد خطای نتایج شبیه سازی و رابطه ایکل - بلستین نسبت به نتایج تجربی [۱۳] برای نازل های مختلف

تراکم پذیری و جدایش جریان های برشی را در نظر می گیرد. مقادیری که این مدل برای نرخ انتشار جریان های آزاد برشی محاسبه می کند، دارای تطابق نزدیکی با مقادیر اندازه گیری شده واقعی در جت های صفحه ای، مدور و شعاعی است. لذا از این مدل می توان در جریان های محصور به دیواره ها و جت های سیال استفاده کرد. این مدل شامل دو رابطه برای انرژی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی آشفتگی است [۲۲]. حل معادلات حاکم بر جریان با استفاده از نرم افزار ANSYS FLUENT انجام شده است. ارتباط بین سرعت و فشار از طریق الگوریتم سیمپلس برقرار شده است. برای گسسته سازی معادلات مومنتم و فشار از طرح پادبادسو مرتبه دوم و برای گسسته سازی معادلات انرژی جنبشی و اتلاف انرژی از طرح پادبادسو مرتبه اول استفاده شده است. خطای ۰/۰۰۱ برای همگرایی نتایج در نظر گرفته شده است.

در ورودی مته حفاری شرط مرزی دبی ورودی و در خروجی آن شرط مرزی فشار خروجی اعمال شده است. مته حفاری با سرعت ثابت ۶۰ دور بر دقیقه و تیغه ها با سرعت ثابت ۷۲ دور بر دقیقه دوران می کنند. دیواره چاه بصورت ثابت فرض شده و در تمام دیواره ها فرض عدم لغزش جریان اعمال شده است. حل جریان برای مته حفاری با نازل های ۷/۳۲، ۹/۳۲، ۱۰/۳۲ و ۱۱/۳۲ اینچ و برای پنج دبی جریان انجام شده است [۱۹].

۴- نتایج محاسبه افت فشار

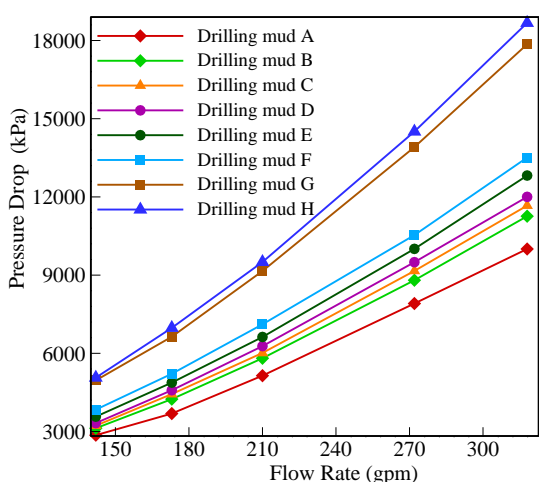
افت فشار در مته حفاری به پارامترهایی مانند نوع مته حفاری، محل نازل ها، تعداد و اندازه نازل ها، نوع نازل، دبی جریان و خواص سیال بستگی دارد. ایکل و بلستین [۱۴] رابطه (۴) را برای محاسبه افت فشار در مته های حفاری ارائه کردند.

$$\Delta P = \frac{\rho Q^2}{KC^2 d_e^4} \quad (4)$$

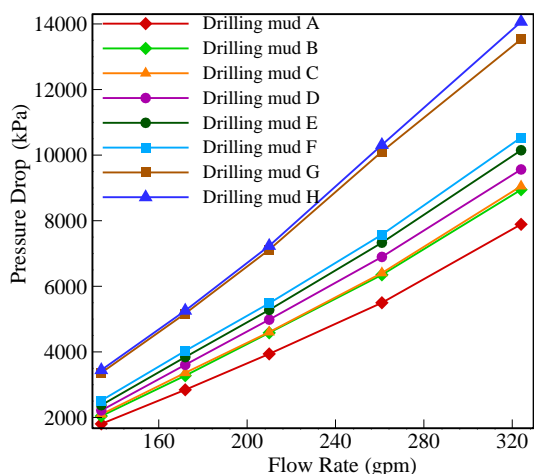
در این رابطه ΔP افت فشار در مته حفاری، Q دبی جریان، K مقدار ثابت برابر با ۱۰۷۷/۶۳، C ضریب تخلیه نازل و برابر با ۰/۹۵ و d_e قطر معادل است. قطر معادل بر حسب قطر نازل (d) و تعداد نازل ها (n) از رابطه $d_e = (nd)^{0.5}$ بدست می آید.

افت فشار برای هشت نوع گل حفاری با دبی‌های ۱۳۴، ۱۷۲، ۲۱۰، ۲۶۱ و ۳۲۴ گالن بر دقیقه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند، با افزایش دبی جریان، اختلاف افت فشار ایجاد شده بین گل‌های حفاری افزایش می‌یابد. بطوریکه در دبی ۱۳۴ گالن بر دقیقه اختلاف افت فشار وجود آمده ۱۶۰۰ کیلو پاسکال و در دبی ۳۲۴ گالن بر دقیقه اختلاف افت فشار وجود آمده ۶۲۰۰ کیلو پاسکال است.

همچنین شکل ۷ افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با نازل‌های ۱۱/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد. محاسبه



شکل ۵- افت فشار بر حسب دبی جریان در مته حفاری با سه نازل ۹/۳۲ اینچ



شکل ۶- افت فشار بر حسب دبی جریان در مته حفاری با سه نازل ۱۰/۳۲ اینچ

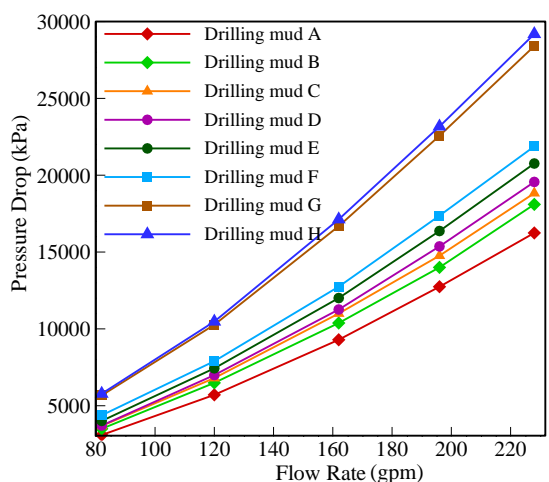
روش عددی استفاده شده با دقت مناسب‌تری نسبت به رابطه ایکل- بلستین افت فشار را در مته حفاری محاسبه می‌کند.

محاسبه افت فشار در مته حفاری برای چهار نازل با اندازه‌های مختلف صورت گرفته است. پنج دبی جریان برای هر یک از چهار نازل در محاسبات استفاده شده است.

شکل ۴ افت فشار بر حسب دبی جریان در مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد. محاسبه افت فشار برای هشت نوع گل حفاری با دبی‌های ۸۲، ۱۲۰، ۱۶۲، ۱۹۶ و ۲۲۸ گالن بر دقیقه انجام شده است. بیشترین افت فشار ۲۹۱۸۵ کیلو پاسکال است که برای گل حفاری H با چگالی ۱۷۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب ایجاد شده است. این مقدار افت فشار، بیشترین افت فشاری است که در مته حفاری با نازل‌های مختلف وجود آمده است.

شکل ۵ افت فشار بر حسب دبی جریان در مته حفاری با نازل‌های ۹/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد. محاسبه افت فشار برای دبی‌های ۱۴۲، ۱۷۳، ۲۱۰، ۲۷۲ و ۳۱۸ گالن بر دقیقه انجام شده است. بیشترین افت فشار ۱۸۶۷۵ کیلو پاسکال است که برای گل حفاری H در دبی ۳۱۸ گالن بر دقیقه ایجاد شده است و کمترین افت فشار ۲۸۶۰ کیلو پاسکال بوده که برای گل حفاری A در دبی ۱۴۲ گالن بر دقیقه وجود آمده است.

نمودارهای شکل ۶ افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با نازل‌های ۱۰/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد. محاسبه



شکل ۴- افت فشار بر حسب دبی جریان در مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ

گرفت. سپس با تعیین ثابت‌های معرفی شده در این رابطه، نقش هر یک از پارامترهای موثر بر افت فشار مته حفاری مشخص می‌شود.

$$\Delta P = \frac{\rho Q^a \tau_B^b \mu_B^c f}{KC^2 d_e^4} \quad (5)$$

در اینجا ΔP افت فشار در مته حفاری، Q دبی جریان، τ_B تنش تسلیم سیال، μ_B لزجت پلاستیک سیال، K مقدار ثابت، C ضریب تخلیه نازل و برابر با $0/95$ ، و d_e قطر معادل است؛ همچنین a ، b و f توان‌های ثابتی می‌باشند که به ترتیب نشان دهنده تاثیر دبی جریان، تنش تسلیم سیال و لزجت پلاستیک سیال بر افت فشار مته حفاری هستند.

در رابطه پیشنهاد شده، تاثیر خواص رئولوژیک سیال نیز در نظر گرفته شده است. برای بدست آوردن توان‌های ثابت a ، b و f در رابطه (۵)، تاثیر هر یک از خواص سیال بر افت فشار مته حفاری بررسی شده است. سپس، با ترسیم نتایج بدست آمده، مقدار توان‌های ثابت محاسبه شده است.

۵-۲- تاثیر دبی جریان بر افت فشار

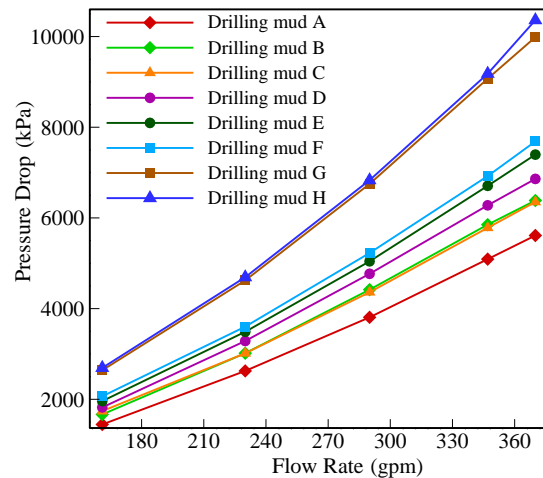
با ترسیم نمودارهای توانی افت فشار بر حسب دبی جریان، مقدار توان دبی جریان، a ، در رابطه (۵) بدست می‌آید. شکل‌های ۸ تا ۱۱ نمودارهای توانی افت فشار بر حسب دبی جریان برای چهار نازل ۷/۳۲، ۹/۳۲، ۱۰/۳۲ و ۱۱/۳۲ اینچ را نشان می‌دهند.

نمودارهای توانی افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ در شکل ۸ آورده شده است. مقادیر a در بازه ۱/۵۷۹ تا ۱/۶۲۳ می‌باشند.

شکل ۹ منحنی‌های توانی افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با نازل‌های ۹/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد. مقدار توان خطوط در بازه ۱/۵۵۸ تا ۱/۶۱۸ است.

همچنین در شکل ۱۰ نمودارهای توانی افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با سه نازل ۱۰/۳۲ اینچ نشان داده شده است. مقادیر a در بازه ۱/۵۸۴ تا ۱/۶۵۸ می‌باشند.

منحنی‌های توانی افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با سه نازل ۱۱/۳۲ اینچ در شکل ۱۱ آورده شده است. مقادیر a در بازه ۱/۵۶۱ تا ۱/۶۳۱ می‌باشند.



شکل ۷- افت فشار بر حسب دبی جریان در مته حفاری با سه نازل ۱۱/۳۲ اینچ

افت فشار برای دبی‌های ۱۶۱، ۲۳۰، ۲۹۰، ۳۴۷ و ۳۷۰ گالن بر دقیقه انجام شده است. نتایج بدست آمده برای دو گل حفاری B و C تقریباً بر یکدیگر منطبق می‌باشند.

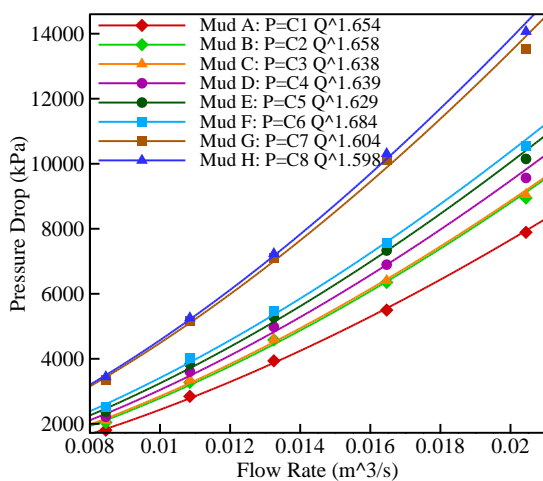
شکل‌های ۴ تا ۷ تاثیر دبی جریان و اندازه نازل مته حفاری را بر افت فشار نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند با افزایش قطر نازل، افت فشار در مته حفاری کاهش می‌یابد و با افزایش دبی جریان، افت فشار در مته حفاری افزایش می‌یابد.

۵- پارامترهای موثر بر افت فشار در مته حفاری

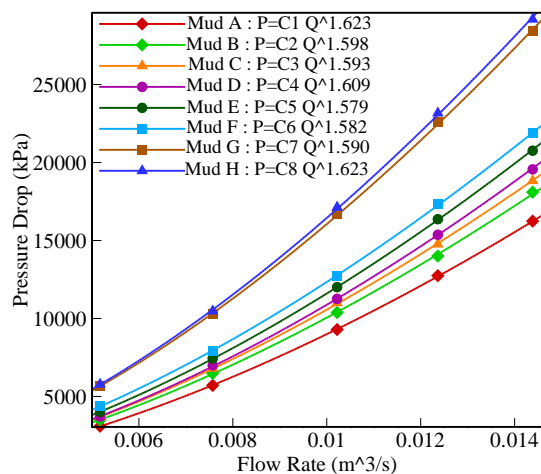
نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد، روش عددی استفاده شده در این مقاله، با دقت بیشتری نسبت به رابطه ایگل-بلستین افت فشار در مته حفاری را تخمین می‌زند؛ بنابراین با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، می‌توان رابطه‌ای پیشنهاد نمود که افت فشار در مته حفاری را با دقت بیشتری نسبت به رابطه ایگل-بلستین محاسبه نماید.

۵-۱- پیشنهاد یک رابطه جدید

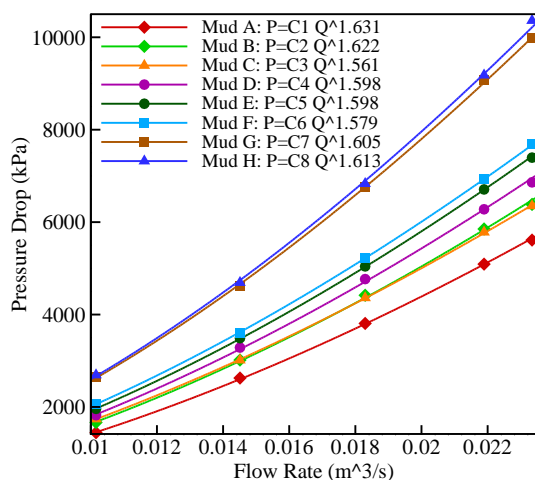
یک رابطه جدید برای محاسبه افت فشار در مته حفاری پیشنهاد شده است. برای ارائه این رابطه، تاثیر هر یک از پارامترهای موثر بر افت فشار در مته حفاری بررسی شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، ارتباط بین پارامترها و افت فشار را می‌توان بصورت رابطه (۵) در نظر



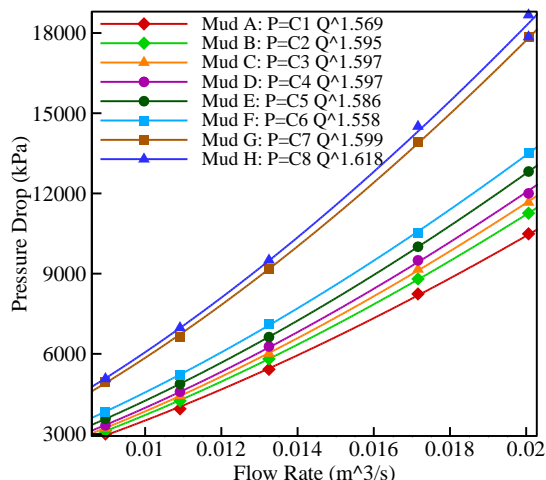
شکل ۱۰- رابطه افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با سه نازل ۱۰/۳۲ اینچ



شکل ۸- رابطه افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ



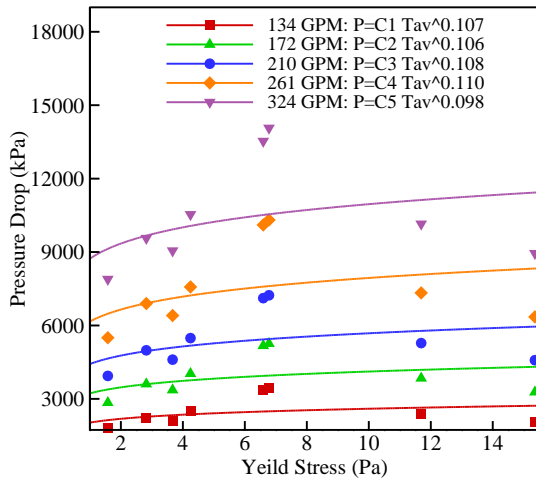
شکل ۱۱- رابطه افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با سه نازل ۱۱/۳۲ اینچ



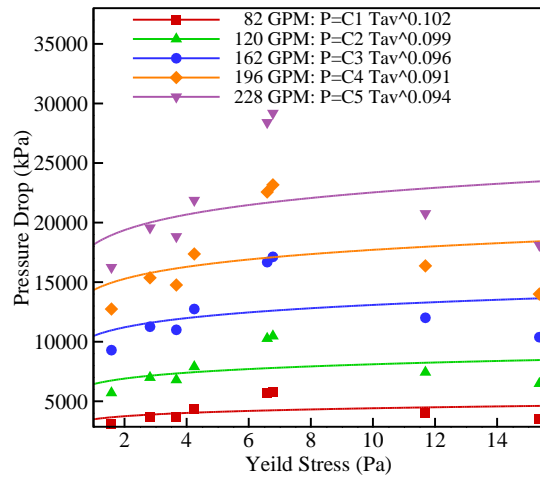
شکل ۹- رابطه افت فشار بر حسب دبی جریان برای مته حفاری با سه نازل ۹/۳۲ اینچ

۵-۳- تاثیر تنش تسلیم گل حفاری بر افت فشار مجدداً فرآیند قبل برای محاسبه توان b در رابطه (۵) انجام می‌شود. به این صورت که با ترسیم نمودارهای توانی افت فشار بر حسب تنش تسلیم گل‌های حفاری، مقدار توان b بدست می‌آید. شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نمودارهای توانی افت فشار بر حسب تنش تسلیم برای چهار نازل ۹/۳۲، ۷/۳۲، ۱۰/۳۲ و ۱۱/۳۲ اینچ را نشان می‌دهند. توان رابطه منحنی‌های ترسیم شده تعیین کننده مقدار ثابت b در رابطه (۵)

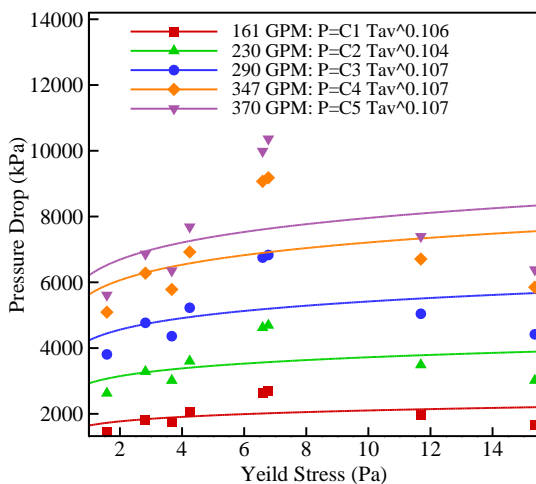
نتایج شکل‌های ۸ تا ۱۱ نشان می‌دهند، توان منحنی-های ترسیم شده برای نازل‌های مختلف و به ازای گل‌های حفاری مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشند؛ اما با توجه به نزدیک بودن توان‌ها، می‌توان مقدار متوسط آن‌ها را به عنوان ثابت a در نظر گرفت. متوسط مقدار توان‌ها برای هر چهار نازل برابر با $1/604$ است؛ بنابراین توان دبی جریان (مقدار ثابت a) در رابطه (۵) برابر $1/604$ در نظر گرفته شده است.



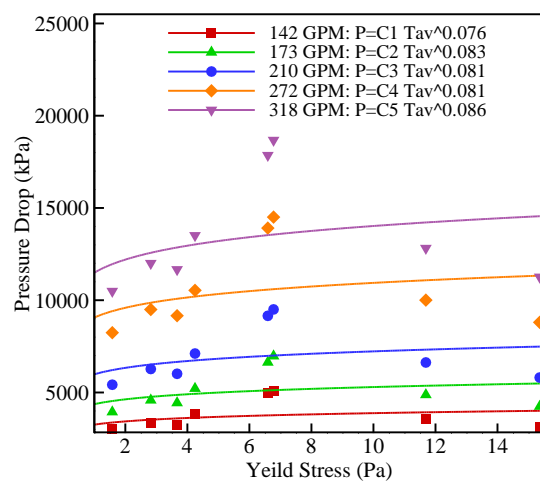
شکل ۱۴- افت فشار بر حسب تنش تسلیم گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۱۰/۳۲ اینچ



شکل ۱۲- افت فشار بر حسب تنش تسلیم گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ



شکل ۱۵- افت فشار بر حسب تنش تسلیم گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۱۱/۳۲ اینچ



شکل ۱۳- افت فشار بر حسب تنش تسلیم گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۹/۳۲ اینچ

همچنین در شکل ۱۵ منحنی‌های توانی افت فشار بر حسب تنش تسلیم برای مته حفاری با سه نازل ۱۱/۳۲ اینچ نشان داده شده است.

نتایج شکل‌های ۱۲ تا ۱۵ نشان می‌دهند، توان رابطه منحنی‌های ترسیم شده برای نازل‌های مختلف و به ازای گل‌های حفاری مختلف با یکدیگر متفاوت می‌باشند، اما با توجه به نزدیک بودن مقدار توان‌ها، مقدار متوسط آن‌ها به عنوان ثابت b در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد، مقدار توان b در رابطه (۵) برابر ۰/۱ است.

می‌باشند. شکل ۱۲ نمودارهای توانی افت فشار بر حسب تنش تسلیم برای مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد.

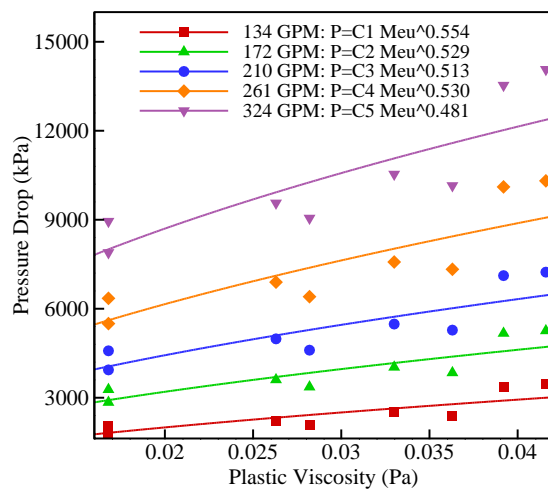
منحنی‌های توانی افت فشار بر حسب تنش تسلیم برای مته حفاری با سه نازل ۹/۳۲ اینچ در شکل ۱۳ آورده شده است. توان رابطه منحنی‌های ترسیم شده در بازه ۰/۰۷۶ تا ۰/۰۸۶ می‌باشند. شکل ۱۴ نمودارهای افت فشار بر حسب تنش تسلیم برای مته حفاری با سه نازل ۱۰/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد.

شکل‌های ۱۷ و ۱۸ منحنی‌های توانی افت فشار بر حسب لگاریتم لزجت پلاستیک برای مته حفاری با نازل‌های ۹/۳۲ و ۱۰/۳۲ اینچ را نشان می‌دهند.

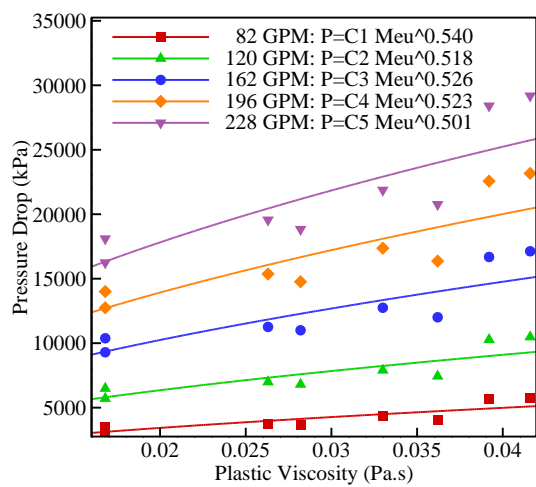
همچنین شکل ۱۹ نمودارهای افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک برای مته حفاری با نازل‌های ۱۱/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد. مقادیر f در بازه ۰/۴۹۲ تا ۰/۵۳۷ می‌باشند.

نتایج شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ نشان می‌دهند، متوسط توان رابطه منحنی‌های ترسیم شده برای هر چهار نازل برابر با ۰/۵۱ است، بنابراین مقدار f در رابطه (۵) برابر ۰/۵۱ در نظر گرفته می‌شود.

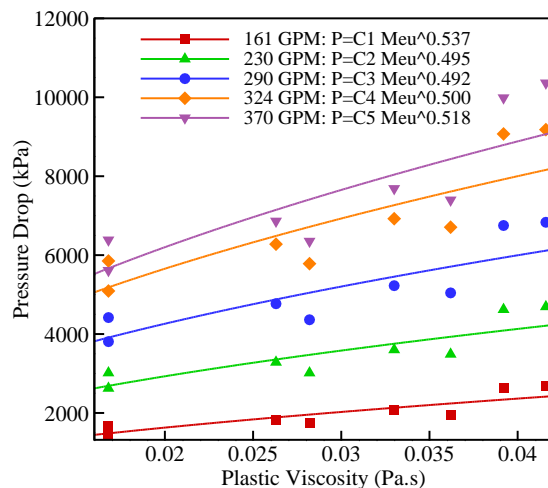
۴-۵- تاثیر لزجت پلاستیک گل حفاری بر افت فشار در نهایت برای محاسبه مقدار ثابت f در رابطه (۵) نمودارهای توانی افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک گل‌های حفاری ترسیم شده است. شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ نمودارهای افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک برای چهار نازل ۷/۳۲، ۹/۳۲، ۱۰/۳۲ و ۱۱/۳۲ اینچ را نشان می‌دهند. شکل ۱۶ نمودارهای توانی افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک برای مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ را نشان می‌دهد. مقادیر f در بازه ۰/۵۰۱ تا ۰/۵۴۰ می‌باشند.



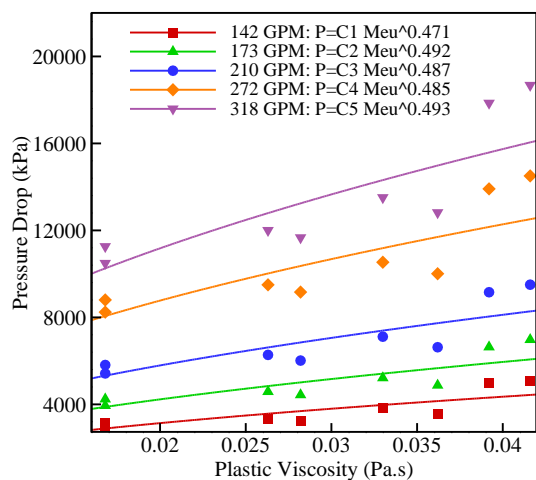
شکل ۱۸- افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۱۰/۳۲ اینچ



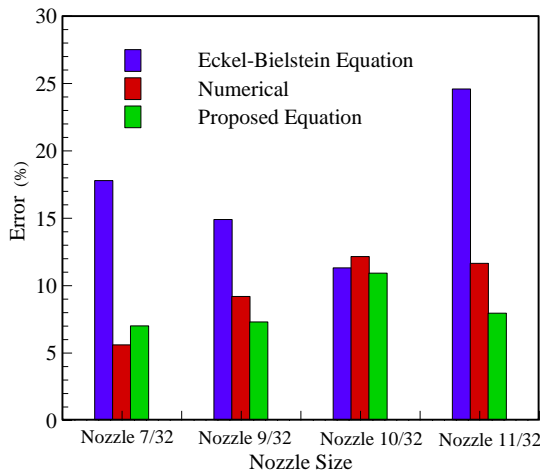
شکل ۱۶- افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۷/۳۲ اینچ



شکل ۱۹- افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۱۱/۳۲ اینچ



شکل ۱۷- افت فشار بر حسب لزجت پلاستیک گل‌های حفاری، برای مته حفاری با سه نازل ۹/۳۲ اینچ



شکل ۲۰- درصد خطا نسبت به نتایج تجربی [۱۳] برای رابطه ایکل- بلستین، نتایج عددی، و رابطه جدید ارائه شده (۶)

انجام شده است. مقایسه نشان می‌دهد، متوسط خطای روش عددی در تخمین افت فشار مته حفاری ۹/۶۶ درصد است و متوسط خطای رابطه ایکل- بلستین ۱۷/۱۶ درصد است. این درصد خطاها حاکی از آن است که روش عددی توانسته است با خطای کمتر نسبت به رابطه ایکل- بلستین افت فشار در مته حفاری را محاسبه کند.

تأثیر دبی جریان، قطر نازل مته حفاری، و خواص رئولوژیک گل‌های حفاری بر افت فشار در مته مخروطی کاجی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند، با افزایش قطر نازل، افت فشار در مته حفاری کاهش می‌یابد و با افزایش دبی جریان، افت فشار در مته حفاری افزایش می‌یابد.

یک رابطه بر اساس نتایج شبیه‌سازی برای محاسبه افت فشار در مته حفاری ارائه شده است. در این رابطه تأثیر خواص رئولوژیک سیال بر افت فشار مته حفاری در نظر گرفته شده است. مقایسه نتایج حاصل از رابطه معرفی شده با نتایج تجربی [۱۳] نشان می‌دهد، این رابطه افت فشار در مته حفاری را با خطای ۸/۳۱ درصد محاسبه می‌کند که در مقایسه با خطای ۱۷/۱۶ درصد رابطه ایکل- بلستین، ۸/۸۵ درصد خطای تخمین افت فشار در مته حفاری مخروطی کاجی را کاهش داده است. افزایش دقت محاسبات با این رابطه به دلیل در نظر گرفتن تأثیر خواص رئولوژیک سیال حفاری بر افت فشار مته حفاری است.

با توجه به نتایج بدست آمده، رابطه (۵) با اعداد توان‌های محاسبه شده بصورت رابطه (۶) معرفی می‌شود.

$$\Delta P = \frac{\rho Q^{1.6} \tau_B^{0.1} \mu_B^{0.51}}{1.8518 C^2 d_e^4} \quad (6)$$

برای اعتبار سنجی این رابطه، افت فشار مته حفاری با استفاده از رابطه (۶) محاسبه شده و با نتایج تجربی [۱۳] مقایسه شده است. مقایسه نتایج برای گل حفاری با چگالی ۱۰۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب (گل حفاری B) و برای نازل‌ها با اندازه مختلف انجام شده است. برای هر نازل ۵ دبی جریان در نظر گرفته شده است که میانگین خطای پنج دبی برای هر نازل، به عنوان خطای نتایج لحاظ شده است. شکل ۲۰ درصد خطای نتایج رابطه جدید، نتایج شبیه‌سازی و نتایج رابطه ایکل- بلستین را نسبت به نتایج تجربی [۱۳] برای نازل‌ها با اندازه مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، متوسط خطای رابطه (۶) برای تخمین افت فشار مته حفاری ۸/۳۱ درصد است و متوسط خطای رابطه ایکل- بلستین ۱۷/۱۶ درصد است. به عبارت دیگر، رابطه ارائه شده افت فشار در مته حفاری مخروطی کاجی را با ۸/۸۵ درصد خطای کمتر نسبت به رابطه ایکل- بلستین محاسبه می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی جریان در مته حفاری افت فشار در مته حفاری مخروطی کاجی شرکت اسمیت با اندازه ۷-۷/۸ اینچ محاسبه شده است. برای استخراج یک رابطه نیاز به دامنه وسیعی از نتایج افت فشار است؛ بنابراین، محاسبه افت فشار در مته حفاری با نازل‌هایی با اندازه‌های متفاوت انجام شده است. این نازل‌ها شامل چهار نازل با اندازه ۷/۳۲، ۹/۳۲، ۱۰/۳۲ و ۱۱/۳۲ اینچ می‌باشند. پنج دبی جریان برای هر یک از چهار نازل در محاسبات استفاده شده است؛ همچنین تحلیل جریان در مته حفاری برای هشت نوع گل حفاری صورت گرفته است. برای بیان خواص رئولوژیک آن‌ها از مدل رئولوژیک بینگهام استفاده شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی جریان با نتایج تجربی [۱۳] مقایسه و اعتبار سنجی شده است. مقایسه نتایج برای گل حفاری با چگالی ۱۰۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب (گل حفاری B)

برای استفاده از ابزارها، و تجهیزات آزمایشگاهی و در اختیار گذاشتن گل‌های حفاری و مته حفاری تشکر و قدردانی می‌کنند.

۹- مراجع

- [1] Kendall HA, Goins WC (1960) Design and operation of jet-bit programs for maximum hydraulic horsepower, impact force or jet velocity. *Tram AIME* 219: 238-250.
- [2] Sutko AA, Myers GM (1971) The effect of nozzle size, number, and extension on the pressure distribution under a tri-cone bit. *J Pet Technol* 1299-1304.
- [3] Townsend SC (1976) Comparison of two-nozzle and three-nozzle drilling under simulated field conditions. Master's Thesis, University of Tulsa.
- [4] Smalling DA, Key TA (1979) Optimization of jet bit hydraulics using impact pressure. SPE 8440, 54th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada.
- [5] Ramsey MS, Robinson LH, Miller JF, Morrison ME (1983) Bottomhole pressures measured while drilling. IADC/SPE Paper No. 11413, IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana.
- [6] Warren T, Winters W (1984) The effect of nozzle diameter on jet impact for a tri cone bit. *SPE J* 24(1).
- [7] Cook RL, Nicholson JW, Sheppard MC, Westlake W (1989) First real time measurements of downhole vibrations, forces, and pressures used to monitor directional drilling operations. SPE/IADC 18651 Drilling Conference held in New Orleans, Louisiana.
- [8] Wells MR, Pessier RC (1993) The effects of asymmetric nozzle sizing on the performance of roller cone bits. *SPE J* 25738.
- [9] Zhao J, Xu YJ, Ren JH, Hou DJ (2014) Numerical simulation of the bottom hole flow field of particle impact drilling. *APED* 8(1): 18-23.
- [10] Hansen E (2012) Automatic evaluation of drilling fluid properties. Master's Thesis, University of Stavanger.
- [11] Moslemi A, Rahmani R, Graham R, Ivie B (2015) Hydraulic design of shale drill bit using an integrated numerical and experimental approach. Society of Petroleum Engineers, SPE-173038-MS, SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, England.
- [12] Meng X, Zhou H, Fan H, Peng Q, Deng S (2016) A systematic drilling hydraulics optimization method for improving rate of penetration and its application in ultra-deep wells. IPTC-18829-MS,

۷- فهرست علائم

توان ثابت	a
توان ثابت	b
ضریب تخلیه نازل	c
قطر نازل، m	d
قطر معادل نازل، m	d_e
توان ثابت	f
ارتفاع استوانه، m	h
ثابت پیچشی فنر، kg/s^2	k
سرعت زاویه‌ای، rpm	N
تعداد نازل‌ها	n
افت فشار، Pa	ΔP
دبی جریان، m^3/s	Q
شعاع استوانه، m	r
شعاع استوانه داخلی، m	R_1
شعاع استوانه خارجی، m	R_2
علائم یونانی	
نرخ کرنش برشی، $1/s$	γ
زاویه پیچش، rad	θ
لزجت پلاستیک بینگهام، $Pa.s$	μ_B
چگالی، kg/m^3	ρ
تنش برشی، Pa	τ
تنش تسلیم، Pa	τ_B

۸- تقدیر و تشکر

نویسندگان از دانشگاه شهید چمران اهواز برای استفاده از تجهیزات آزمایشگاه و حمایت‌های مرتبط با این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند؛ همچنین از اداره کل حفاری اهواز

- [18] Bourgoyne AT, Chenevert ME, Millheim KK, Young FS (1991) Applied drilling engineering. SPE Textbook Series, 2, Richardson, TX.
- [19] Bahrainian SS, Nabati A, Hajidavalloo E (2018) Effect of different rheological models on prediction of tri-cone bit pressure drop. Int J Oil Gas Coal Technol 18(3/4): 305-323.
- [۲۰] نادران طحان م، بحرینیان س س (۱۳۹۲) تأثیر تغییر نسبت فشار بر مشخصه‌های عملکرد یک توربین جریان شعاعی دوقلو با استفاده از مدل‌سازی هندسی و شبیه سازی جریان. مهندسی مکانیک مدرس ۲۳۲-۲۲۰: ۱۳(۱۴).
- [21] Bahrainian SS, Mehrdoost Z (2012) An automatic unstructured grid generation method for viscous flow simulations. Math Comput Simul 83: 23-43.
- [22] Xue S, Li J, Peng H, Chen Z, Wang Y, Zhu H (2005) Numerical simulation of ultra-high pressure rotary atomizing water jet flow field. WJTA American Water jet Conference, Houston, Texas.
- International Petroleum Technology Conference, Bangkok, Thailand.
- [13] Brown ET, Green SJ, Black AD, Tibbitts GA (1982) The influence of jet-bit hydraulics on drilling performance in shale. SPE-11283-MS.
- [14] Eckel JR, Bielstein WJ (1951) Nozzle design and its effect on drilling rate and pump operation. Drill And Prod Prac API 28-46.
- [۱۵] نظری م، محبی ر، کیهانی م ح (۱۳۹۲) تحلیل عددی انتقال حرارت سیال غیر نیوتنی در محیط متخلخل. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۱۰۹-۱۰۵: ۳(۱).
- [۱۶] احمدی ا، مجدع، نوروزی م (۱۳۹۴) بررسی اثر سیال غیرنیوتنی در جریان غیرماندگار در سیستم لوله‌ها. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها ۲۱۹-۲۱۱: ۵(۱).
- [17] Versan M, Tolga A (2005) Effect of polymers on the rheological properties of KCl/polymer type drilling fluid. Energy Sources 27: 405-415.