



مدل‌سازی عددی اثر اتصالات لوله حفاری بر روی افت فشار اصطکاکی گل حفاری هرشل-بالکی در حفاری چاه‌های نفتی

محمد مرادمند ضیاءبری¹، محمدحسن نوبختی^{2*}، مرتضی خیاط³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

3- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

* تهران، m.nobakhti@srbiau.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 دی 1399

پذیرش: 28 خرداد 1400

ارائه در سایت: 14 مرداد 1400

چکیده

در این مقاله، بررسی رفتار جریان سیال غیرنیوتنی و به‌طور ویژه افت فشار اصطکاکی در اتصالات جوشکاری شده در هندسه‌های متفاوت با توجه به استاندارد IADC [1] از طریق شبیه‌سازی عددی انجام پذیرفته است. فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از 6 سیال حفاری دارای خواص ویسکوپلاستیک متفاوت، پیرو مدل غیرنیوتنی هرشل-بالکی (6 سیالی که در میادین نفتی جنوب کشور استفاده می‌شوند) انجام شده است و جهت مقایسه و اعتبارسنجی از دو مدل توانی و نیوتنی کمک گرفته شده است. پس از آن اثر متغیرهای هندسی مانند نسبت قطر و خروج از مرکز فضای حلقوی در این هندسه خاص مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که وجود اتصالات تأثیر بسزایی در افزایش افت فشار در چاه دارد. برای مدل نیوتنی حداکثر تا 18 درصد، و برای مدل‌های توانی و هرشل-بالکی به ترتیب حداکثر تا 7 و 3 درصد افزایش در افت فشار فضای حلقوی مشاهده شد.

کلیدواژگان

گل حفاری

مدل هرشل - بالکی اتصالات لوله

حفاری

مته چرخان

شبیه‌سازی عددی

Numerical modeling of tool-joint effect on non-Newtonian drilling fluids following the Herschel-Bulkley model flow behavior in oil well drilling

Mohamad Moradmand Ziabari¹, Mohammad hasan Nobakhti^{2*}, Morteza Khayat³

1- Department of Mechanical Engineering, SRBIAU Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, SRBIAU Branch, **Islamic Azad University**, Terhan, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, SRBIAU Branch, **Islamic Azad University**, Tehran, Iran

* Tehran, Iran, m.nobakhti@srbiau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received 1 January 2021

Accepted 18 June 2021

Available Online 5 August 2021

Keywords

Drilling fluid

Non-Newtonian fluids

oil-well drilling, tool-joint effect

Herschel-Bulkley

ABSTRACT

In this paper, the behavior of fluid flows and frictional pressure losses in weld-on tool-joints of different grades according to the IADC standard manual was studied using CFD simulations. The simulations were conducted using six drilling fluids with different viscoplastic properties, following the Herschel-Bulkley model of Non-Newtonian fluids. (these six fluids used in oil fields in the south of the country). Also Power-Law and Newtonian models are used for validation. Then the effect of geometric variables like diameter ratio and eccentricity of the circular space in this particular geometry is investigated. The results show that tool-joints significantly affect the frictional pressure loss in the annulus. The frictional pressure loss increased up to 18% for Newtonian model and up to 7% and 3% for Power-Law and Herschel-Bulkley models respectively.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Mohamad Moradmand Ziabari, Mohammad hasan Nobakhti, Morteza Khayat, Numerical modeling of tool-joint effect on non-Newtonian drilling fluids following the Herschel-Bulkley model flow behavior in oil well drilling, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 12, No. 2, pp. 37-47, 2021 (In Persian)

1- مقدمه

اتصالات را بخشی از همان فضای حلقوی فقط با قطر متفاوت فرض می‌کند، که این مدل با توجه به صرف‌نظر از اثرات ورودی و خروجی مقدار افت فشار را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. جنونگ و شاه در سال 2004 [3]، اثر این اتصالات را در لوله‌های حفاری صرف‌نظر از اثر دوران مته حفاری بررسی کردند، ایشان در بررسی تجربی خود با دو لوله آزمایش یکی دارای اتصال در میان لوله و دیگری بدون اتصال، اثر آن را برای هندسه‌های مختلف چاه مطالعه کردند.

پژوهشگران دیگری نیز با استفاده از شبیه‌سازی عددی سعی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی اثر این اتصالات بر روی جریان سیال در فضای حلقوی داشته‌اند. دخانی در سال 2013 [4]، با شبیه‌سازی عددی جریان حول اتصالات را برای هندسه‌های مختلف بررسی کرد که این شبیه‌سازی برای برخی هندسه‌ها و سیالی با ویسکوزیته مشابه آب تا 30 درصد افزایش افت فشار را پیش‌بینی کرده است. همفیل در سال 2007 [5] نیز در پژوهشی این افزایش افت فشار را تا 12 درصد پیش‌بینی کرده است. در پژوهشی دیگری، کریمی در سال 2015 [6]، اثر اتصال را بر روی چگالی معادل دورانی³ در چاه‌های عمیق در میادین آبی با فرض سیال توانی و نیوتنی، شبیه‌سازی کرده و به افزایش افت فشاری تا 30 درصد دست یافته است.

3- روابط و معادلات حاکم، شبیه‌سازی عددی

در شبیه‌سازی پیشرو فرض‌های تراکم‌ناپذیری و تکدمایی⁴ استفاده شده‌اند. در فرآیند حفاری با توجه به سرعت‌های استفاده شده، جریان معمولاً آرام (و یا گذرا) است. مدلسازی‌ها برای شرایط جریان پایا و آرام انجام شده‌اند. در نتیجه معادله پیوستگی به صورت رابطه 1 خلاصه خواهد شد:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial q} (v_q) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z) = 0 \quad (1)$$

و همچنین مؤلفه‌های سه‌گانه معادله بقای ممنتوم به صورت رابطه 2-4 خواهد بود:

مؤلفه در راستای r

اتصالات لوله مته حفاری نقش مهمی در عملکرد لوله حفاری چاه دارد. این قطعات به صورت جداگانه از بدنه لوله ساخته شده و سپس به انتهای لوله جوش داده می‌شوند. این اتصالات معمولاً از جنس فولادی می‌باشند که با عملیات حرارتی به سختی بالاتری رسانده شده‌اند، تا توان برقراری اتصالی با قدرت بالا و دارای مقاومت در برابر فشار بالای چاه و تعداد بیشمار انقباض و انبساط‌ها بدلیل انجام فرایند حفاری را داشته باشند [1].

مطالعات پیرامون اثر اتصالات لوله حفاری در برآورد افت فشار اصطکاکی تنها محدود به چند مطالعه تجربی و شبیه‌سازی عددی بر روی گل‌های حفاری با پایه آب و مبتنی بر مدل غیرنیوتنی توانی¹ بوده است. از آنجا که این اتصالات نقش مهمی در عملکرد لوله حفاری دارد، تأثیر آن بر افت فشار را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. همچنین با توجه به پیشرفت روزافزون تکنولوژی حفاری و نیاز به کنترل دقیق فشار در چاه‌های فشار بالا، امروزه گل‌های حفاری باید از ویژگی‌های خاصی مانند تامین یکپارچگی ساختاری چاه²، انتقال بهینه تکه‌های حفاری شده از بخش سر مته به سطح چاه، روان‌کاری و انتقال حرارت از لوله حفاری برای انجام وظیفه به‌عنوان یک سیال حفاری واجد شرایط و مؤثر برخوردار باشند، بنابراین روز به روز گل‌های حفاری پیچیده‌تر و گران‌تری استفاده می‌شوند و انتخاب گل حفاری مناسب از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین دلیل گل‌های حفاری با پایه روغن که اکثراً دارای خواص ویسکوپلاستیک می‌باشند نیز در عملیات حفاری استفاده فراوانی دارند، درحالی‌که برای این گل‌های حفاری مطالعه‌ای برای پیش‌بینی تأثیر اتصالات بر افت فشار اصطکاکی و رفتار جریان انجام نشده است.

2- پیشینه پژوهش

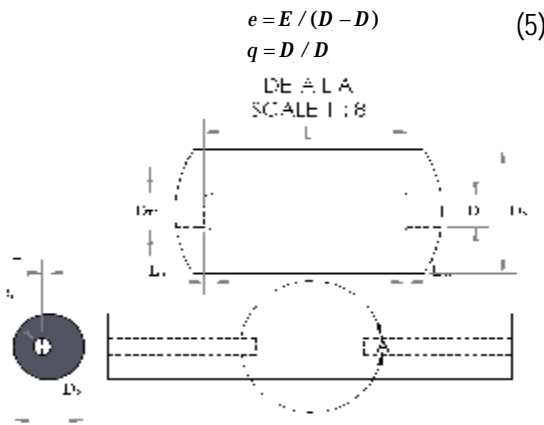
کارتالوس و دوپوس در سال 1993 [2]، دریافتند که تغییرات در قطر فضای حلقوی مانند اتصالات، اثراتی بر روی افت فشار خواهد داشت، آن‌ها با صرف‌نظر از اثر ورودی و خروجی به این ناحیه، مدل ساده‌ای ارائه کردند تا این افزایش افت فشار به سبب حضور اتصالات را محاسبه کنند. مدل پیشنهادی

³ Equivalent Circulating Density (ECD)

⁴ Isothermal and incompressible

¹ Power-Law

² Well formation integrity



شکل 1 تصویر شمای کلی هندسه شبیه‌سازی شده [7]

در تصویر و روابط بالا، D_o ، D_i و D_{TJ} به ترتیب قطر لوله حفاری، قطر دیواره چاه (قطر خارجی فضای حلقوی) و قطر خارجی محل اتصال می‌باشند، L_{in} ، L_{out} طول ورودی و خروجی به ناحیه اتصال می‌باشند، همچنین E فاصله مرکز تا مرکز لوله حفاری و چاه، ε ضریب خروج از مرکز و θ نسبت قطر می‌باشند.

جدول 1 مقادیر متغیرهای هندسی اتصال لوله حفاری استاندارد [7]

نام متغیر	نشان متغیر	دامنه تغییرات
قطر خارجی اتصال	D_{TJ}	$2\frac{7}{8} - 7''$
طول ورودی و خروجی اتصال	L_{in} L_{out}	-
ضریب خروج از مرکز	ε	$0 \leq \varepsilon \leq 0.99$
نسبت قطر	θ	$0.2 < \theta < 0.9$

با توجه به مقادیر جدول 1، برای تمامی نمودارهایی که هدفشان بررسی اثر ضریب خروج از مرکز و نسبت قطر نمی‌باشد از مقادیر جدول 2 استفاده شده است.

$$r(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_r}{\partial q} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_r^2}{r}) = -\frac{\partial P}{\partial r} - (\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rt_{rr})) + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \frac{qr}{r} + \frac{\partial t}{\partial r} \frac{zr}{r} - \frac{t}{r} \frac{qq}{r} \quad (2)$$

مؤلفه در راستای θ

$$r(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_r}{\partial q} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{v_r v_r}{r}) = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial q} - (\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(r^2 t_{rq})) + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial q} \frac{qq}{r} + \frac{\partial t}{\partial z} \frac{zq}{r} \quad (3)$$

مؤلفه در راستای Z

$$r(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \frac{\partial v_r}{\partial q} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z}) = -\frac{\partial P}{\partial z} - (\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rt_{rz})) + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial q} \frac{qz}{r} + \frac{\partial t}{\partial z} \frac{zz}{r} + rg_z \quad (4)$$

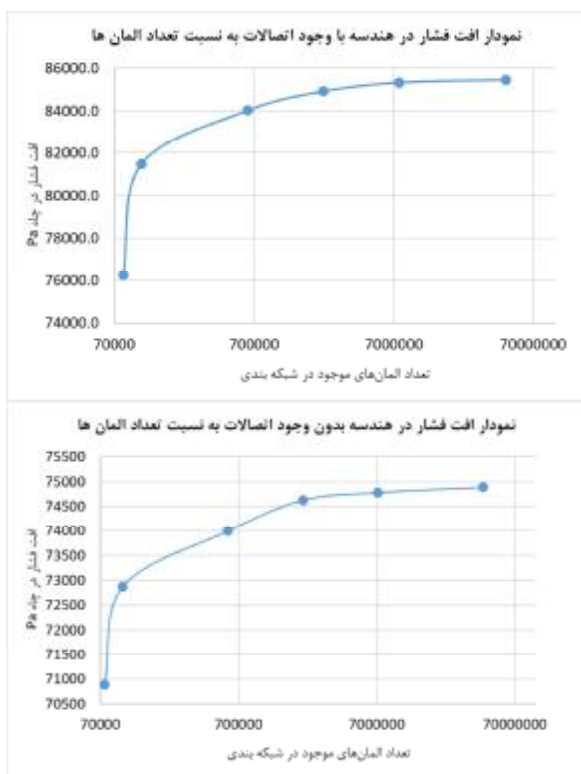
جهت محاسبه افت فشار با توجه به پیچیدگی هندسه و مدل‌های غیرنیوتنی، شبیه‌سازی عددی و پژوهش‌های تجربی ابزارهای قدرتمند و کارآمد می‌باشند. شبیه‌سازی عددی امروزه روشی متداول و فراگیر جهت مطالعه و بهینه‌سازی جریان سیالات غیرنیوتنی در کاربری‌های متفاوت است. در مقاله حاضر از نرم‌افزار فلونت نسخه 20 استفاده شده است.

4- تعریف مسأله

شکل 1 تصویری شمای کلی هندسه شبیه‌سازی شده را به نمایش گذاشته است، مشخصات اتصال با توجه به استاندارد حفاری اتحادیه بین‌المللی حفاری [1]¹ تعیین شده است. هم چنین دامنه تغییرات متغیرهایی مانند نسبت قطر و خروج از مرکز با توجه به بررسی‌های پودریابینکین [7]² در رابطه با چاه‌های نفتی در مکزیک و امریکای شمالی تعیین گشته است. هندسه‌های تعریف شده و استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها در جدول 1 آورده شده است. همچنین متغیرهای هندسی مسئله به صورت زیر تعریف شده‌اند:

¹ IADC: International Association of Drilling Contractors

² Podryabinkin



شکل 2 بالا، نمودار بررسی استقلال از اثر تعداد مش بر روی هندسه با وجود اتصالات (فضای حلقوی ساده)، پایین، نمودار بررسی استقلال از اثر تعداد مش بر روی هندسه بدون وجود اتصالات

همچنین جدول 3 نشان‌دهنده اطلاعاتی درباره اثر اندازه مش و درصد خطای هر کدام می‌باشد:

جدول 3 جدول اطلاعات شبکه‌بندی‌های انجام‌شده در مطالعه اثر اندازه مش - هندسه دارای اتصال و خروج از مرکز

درصد خطا	مقدار افت فشار در فضای حلقوی Pa -	بیشینه طول المان شبکه بندی - mm
6,41%	76253,0	15
3,02%	81476,5	12
1,06%	84016,2	10
0,48%	84916,3	5
0,14%	85328,3	3
-	85482,2	1

جدول 2 مقادیر استفاده شده برای متغیرهای هندسی اتصال لوله

حفاری

نام متغیر	نشان متغیر	دامنه تغییرات
قطر دیواره چاه (متغیر)	D_o	120.65 mm
قطر لوله حفاری	D_i	60.325 mm
قطر خارجی اتصال	D_{TJ}	72.4 mm
طول ورودی و خروجی اتصال	L_{in}, L_{out}	25 mm
زاویه چمفر ورودی و خروجی		18
ضریب خروج از مرکز (متغیر)	ϵ	0,125
نسبت قطر (متغیر)	θ	0,5

پس از ایجاد هندسه، شبکه‌بندی انجام گرفت. در این مرحله هندسه به سلول‌های کوچک‌تر برای حل معادلات تقسیم می‌گردد. برای هندسه فوق شبکه‌بندی تتراهدرال¹ استفاده شده است، برای تأیید شبکه‌بندی از سایزهای مش 5، 10، 15، 20 و 25 میلیمتر استفاده شده است، ولی به دلیل زمان‌بر بودن شبکه‌بندی 5 و 10 میلیمتری و عدم تفاوت نتایج از شبکه‌بندی 15 میلیمتری برای باقی شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. نمودار بررسی استقلال از شبکه در شکل 2 موجود می‌باشد.

¹ Tetrahedral meshing

که جریان سیالات حفاری با خاصیت نازک‌شونده برشی¹ را با آن شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل توانایی پیش‌بینی تنش تسلیم در سیالات غیرنیوتنی را ندارد. مدل سیال توانی طبق رابطه 6 بیان می‌شود:

$$t = k \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

که در آن k و n به ترتیب به‌عنوان ضریب ثابت² و شاخص جریان شناخته می‌شوند. و واحد k در سیستم SI، $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ می‌باشد.

شکل 4 جدول مقادیر خواص برای گل‌های حفاری مورد استفاده در

شبیه‌سازی [8]

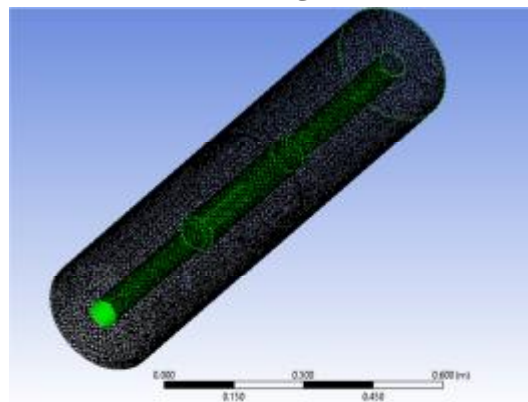
Rheological Models	Constant parameters	Fluid A	Fluid B	Fluid C	Fluid D	Fluid E	Fluid F
Newtonian model	μ (pois)	0.35	0.19	0.53	0.33	0.30	0.45
Bingham Plastic	τ_0 (lb/100 ft)	7.306	3.296	24.415	7.663	5.892	8.889
	μ_0 (pois)	0.30	0.17	0.36	0.28	0.26	0.39
Power Law	m (lb _s ⁿ /100 ft ⁿ)	1.863	0.890	10.181	2.254	1.220	2.521
	n	0.497	0.514	0.305	0.459	0.543	0.486
Herschel-Bulkley	τ_0 (lb/100 ft)	3.122	1.692	15.998	4.442	2.368	5.497
	μ_0 (lb _s ⁿ /100 ft ⁿ)	0.447	0.165	0.758	0.272	0.261	0.240
	n	0.717	0.735	0.681	0.783	0.783	0.849
Casson	τ_0 (lb/100 ft)	3.076	1.360	15.519	3.580	2.084	3.893
	μ_0 (pois)	0.20	0.12	0.17	0.18	0.19	0.26
Robertson-Stiff	m (lb _s ⁿ /100 ft ⁿ)	0.574	0.157	3.164	0.510	0.374	0.395
	v_0 (s ⁿ)	17.13	27.02	31.68	25.29	15.13	31.45
	n	0.685	0.789	0.489	0.695	0.731	0.778
Proposed equation	τ_0 (lb/100 ft)	2.172	0.952	12.947	2.634	1.387	2.797
	μ_0 (pois)	0.15	0.09	0.10	0.13	0.15	0.20

مدل دیگری که برای شبیه‌سازی سیالات غیرنیوتنی شبه پلاستیک که دارای تنش تسلیم اولیه برای جریان یافتن می‌باشد استفاده می‌شود، مدل هرشل-بالکلی نام دارد. به بیان ساده، این مدل ترکیبی از مدل پلاستیک بینگهام و مدل توانی می‌باشد. مدل هرشل-بالکلی بصورت رابطه 7 تعریف می‌گردد:

$$\begin{cases} t = t_y + k \dot{\gamma}^n & |t| \geq |t_y| \\ \dot{\gamma} = 0 & |t| < |t_y| \end{cases} \quad (7)$$

که در آن $|t|$ اندازه تنسور تنش، t_y تنش تسلیم و $\dot{\gamma}$ نرخ برش می‌باشد، ضرایب k و n نیز به مانند مدل سیال توانی بوده و وابسته به جنس سیال می‌باشند.

به جهت افزایش دقت حل در ناحیه اتصال (دیواره داخلی) از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است، قطر این ناحیه یک اینچ، و نرخ رشد در این ناحیه 1,1 می‌باشد، شکل 3 نمونه شبکه‌بندی را به نمایش می‌گذارد.



شکل 3 شبکه‌بندی برای هندسه با اتصالات انقباض و انبساط تدریجی

شرایط مرزی در ورودی، شرط مرزی دبی جرمی ورودی و در خروجی شرط مرزی فشار (از آنجایی که هدف محاسبه افت فشار در این مقطع می‌باشد، مقدار دقیق فشار در خروجی دارای اهمیت نمی‌باشد و فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است) می‌باشند، دیواره خارجی فضای حلقوی ثابت و بدون لغزش و دیواره داخلی در حال دوران با سرعت 7 رادیان بر ثانیه است.

گل حفاری

گل‌های حفاری متفاوتی در دسترس می‌باشند و معمولاً بر اساس سیال پایه موجود در گل به دسته‌های کلی، گل‌ها با پایه آب، گل‌ها با پایه روغنی، گل‌ها با پایه‌های مصنوعی، امولسیون‌ها، هوا و فوم‌ها دسته‌بندی می‌شوند. گل‌های حفاری پایه روغنی که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند، گل پایه روغنی هستند که در میدین نفتی جنوب غربی ایران استفاده می‌شوند، گل‌های با پایه روغن به‌طور معمول در مواردی استفاده می‌شوند که نیاز به پایداری بالا در برابر حرارت می‌باشد. سعید بحرینیان در پژوهش خود [8]، با استفاده از ویسکومتر Fann_35، ثوابت غیرنیوتنی مدل‌های مختلف از جمله هرشل-بالکلی را برای این 6 سیال به دست آورده است که با خطای میانگین 3,6 درصد به ثوابت موجود در شکل 4 رسیده است. مدل توانی از جمله مدل‌هایی است

¹ Shear-thinning
² Consistency Coefficient

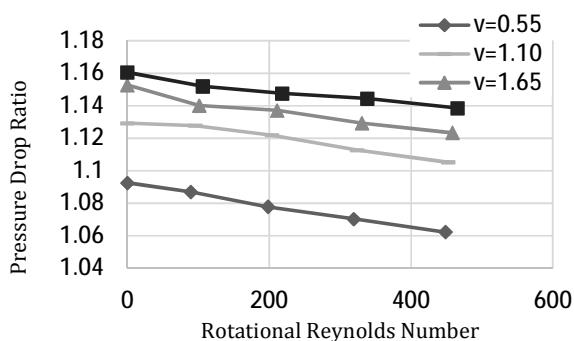
5- نتایج

اثرات نوع سیال و دبی عبوری از فضای حلقوی

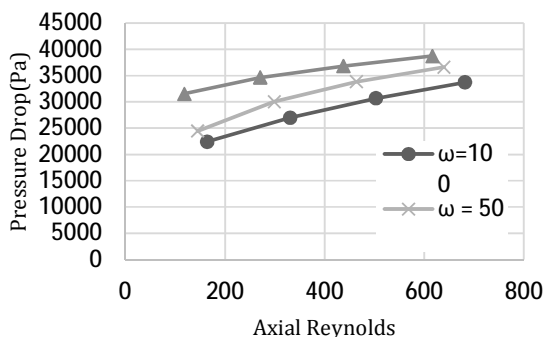
نسبت افت فشار در لوله با وجود اتصالات به افت فشار در لوله‌ای مشابه ولی بدون وجود اتصالات به صورت زیر تعریف شده است:

$$PressureDropRatio = \frac{\Delta P_{WithTJ}}{\Delta P_{WithoutTJ}} \quad (8)$$

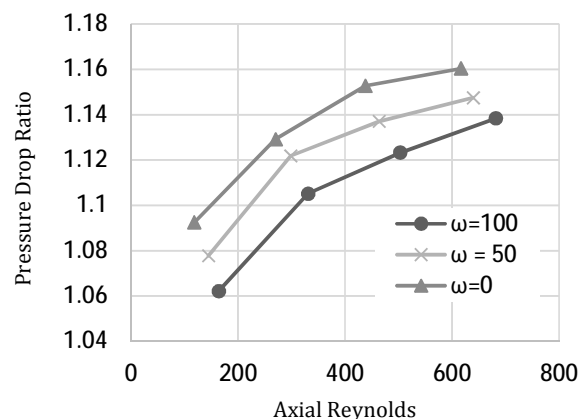
با افزایش در عدد رینولدز محوری مقدار اثر اتصالات نیز افزایش یافته و با افزایش عدد رینولدز شعاعی مقدار اثر اتصالات کاهش یافته است، با این وجود، به دلیل کاهش اثر تنش تسلیم و کوچک‌تر شدن ناحیه تسلیم نشده¹ با افزایش سرعت ورودی سیال (و به تبع آن افزایش نرخ برش)، شاهد کم‌شدن شیب نمودار اثر اتصالات با افزایش عدد رینولدز محوری می‌باشیم. (شکل 5-8)



شکل 6 نمودار نسبت افت فشار برای سیال هرشل بالکی با فرض ثابت بودن سرعت ورودی و افزایش سرعت دوران دیواره داخلی فضای حلقوی



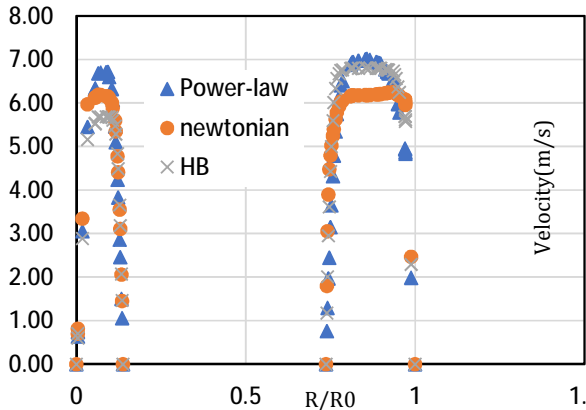
شکل 7 نمودار افت فشار در هندسه با وجود اتصالات لوله حفاری برای سیال هرشل بالکی با فرض سرعت دوران دیواره ثابت برای فضای حلقوی و تغییر سرعت ورودی



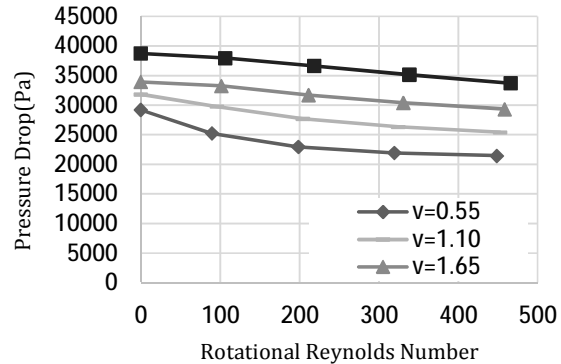
شکل 5 نمودار نسبت افت فشار برای سیال هرشل بالکی با فرض سرعت دوران دیواره داخلی ثابت برای فضای حلقوی و تغییر سرعت ورودی

¹ Plug region

نمودار مقایسه پروفیل سرعت سیال های نیوتنی، توانی و هرشل-بالکی



شکل 10 مقایسه پروفایل سرعت سیال‌های نیوتنی توانی و هرشل بالکی در هندسه با وجود اتصالات

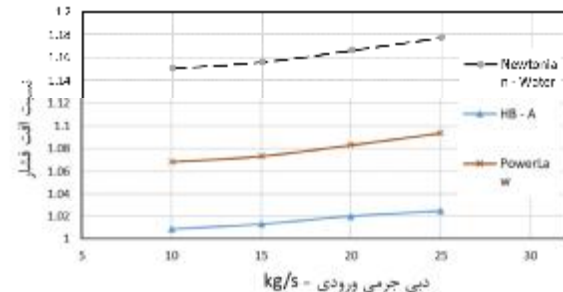


شکل 8 نمودار افت فشار در هندسه با وجود اتصالات برای سیال هرشل بالکی با ثابت بود سرعت ورودی و افزایش سرعت دوران دیواره داخلی فضای حلقوی

بررسی اثر متغیرهای هندسی خروج از مرکز¹ و نسبت شعاعی یکی از متغیرهای مهمی که همواره تأثیر بسزایی بر روی جریان گل‌های حفاری داشته است مقدار خروج از مرکز لوله حفاری بوده است، به‌طور معمول در چاه‌های حفاری متداول این متغیر بین 0 تا 0,9 متغیر می‌باشد، با افزایش خروج از مرکز ناحیه به ترتیب سه حالت خاص بوجود می‌آید:

- 1) در خروج از مرکز پایین تغییر خاصی در حجم ناحیه تسلیم نشده به وجود نمی‌آید ولی تقارن محوری موجود در شکل ناحیه تسلیم نشده تغییر می‌کند.
- 2) با افزایش خروج از مرکز ناحیه تسلیم نشده که به‌صورت یک تکه وجود داشت به دو تکه تقسیم می‌شود یکی در قسمت باریک‌تر فضای حلقوی و دیگری در فضای ضخیم‌تر، هر کدام از این تکه‌ها با سرعت محوری متفاوتی حرکت می‌کنند که این اختلاف سرعت حرکت با افزایش خروج از مرکز افزایش می‌یابد.
- 3) در خروج از مرکزهای بسیار زیاد ناحیه تسلیم نشده در بخش باریک جریان به‌طور کلی از بین می‌رود و جریان به‌طور کلی از فضای ضخیم عبور می‌کند. (شکل 11)

در نمودارهای 9 و 10 به مقایسه این رفتار در سیال‌های نیوتنی و توانی با سیال هرشل بالکی پرداخته شده است. برای هر سه سیال همانطور که انتظار می‌رود با افزایش عدد رینولدز محوری (سرعت ورودی) نسبت افت فشار افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند، همچنین کاهش شیب نمودار که به دلیل وجود ناحیه تسلیم نشده سیال هرشل بالکی نیز به‌وضوح در نمودار قابل مشاهده است. بعلاوه بدلیل اینکه سیال توانی و هرشل بالکی دارای خواص روان‌شوندگی می‌باشند، اثر افت فشار ناشی از اتصالات در آن‌ها کمتر از سیال نیوتنی می‌باشد. بعلاوه در نمودار مقایسه پروفایل سرعت سه سیال، وجود ناحیه تسلیم نشده در سیال هرشل بالکی به‌طور کامل مشخص است.



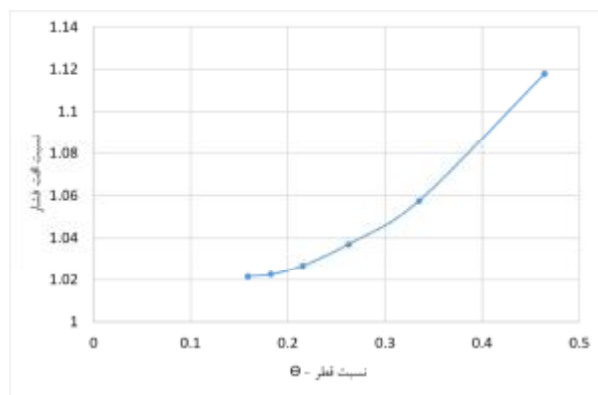
شکل 9 مقایسه نسبت افت فشار برای سیال های نیوتنی (آب)، غیرنیوتنی توانی و غیرنیوتنی هرشل بالکی

¹ Eccentricity

در جریان با وجود چرخش دیواره داخلی و خروج از مرکز دو حالت قابل پیش‌بینی می‌باشد، حالت اول مواردی با خروج از مرکز پایین (که اکثر شبیه‌سازی‌های این پژوهش در این بخش می‌باشند) می‌باشد که در این حالت جریان در جهت چرخش دیواره داخلی حرکت می‌کند، اما با افزایش خروج از مرکز جریان دیگر نمی‌تواند از ناحیه باریک فضای حلقوی عبور کند، بنابراین بر خلاف جهت چرخش دیواره داخلی شروع به حرکت می‌کند و با افزایش مقدار خروج از مرکز و رسیدن آن به مقدار 1 تمامی جریان در جهت خلاف دوران دیواره داخلی، دوران خواهد کرد. دوران در فضای حلقوی با خروج از مرکز سیال را از نزدیکی دیواره‌ها با سرعت محوری پایین به مرکز کانال هدایت می‌کند و بنابراین لایه‌های با سرعت متفاوت سیال با هم ترکیب می‌شوند، و این ترکیب لایه‌ها باعث افزایش افت فشار در فضای حلقوی می‌گردد، همچنین دوران دیواره داخلی، نرخ برش و به سبب آن لزجت در نزدیکی دیواره را افزایش می‌دهد، که این فرآیند اثر عکس ترکیب لایه‌ها را داشته و افت فشار را کاهش می‌دهد.

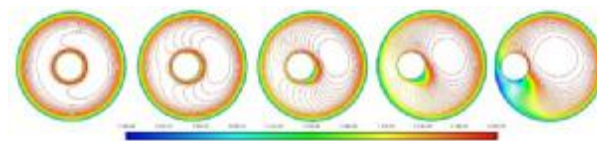
تأثیر نسبت شعاعی بر روی افت فشار

همچنین متغیر هندسی مهم دیگر در جریان گل‌های حفاری نسبت شعاعی می‌باشد که به‌طور معمول در بازه 0,2 تا 0,9 متغیر است. و بدلیل اینکه معمولاً قطر لوله حفاری (قطر داخلی) ثابت است و بنابراین قطر اتصالات نیز تغییری نمی‌کنند، با افزایش قطر خارجی و به سبب آن کاهش نسبت قطر، اثر اتصالات بر جریان کاهش خواهد یافت و در نهایت به صفر نزدیک می‌شود. (شکل 13)



شکل 13 نمودار بررسی تأثیر اتصال حفاری بر افت فشار با تغییر نسبت قطر داخلی به خارجی لوله حفاری

مقدار خروج از مرکز برای هر حالت بالا، بستگی به مقدار تنش تسلیم و همچنین نسبت قطر جریان دارد. هرچه قطر دیواره داخلی کمتر باشد تأثیر خروج از مرکز نیز کمتر می‌گردد و بنابراین حالت‌های دوم و سوم در مقدار خروج از مرکزهای بالاتر رخ می‌دهند.

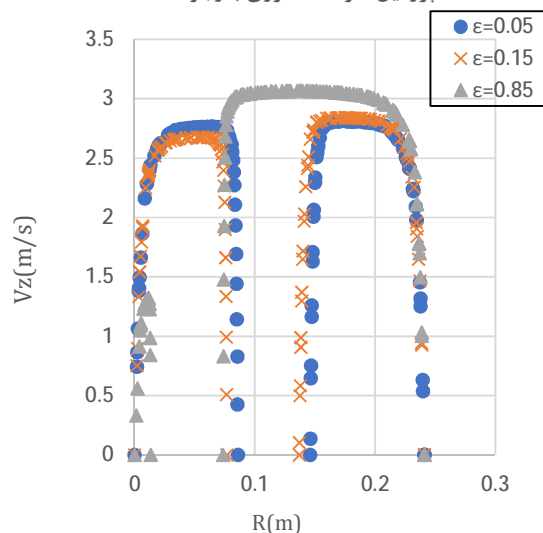


شکل 11 حالت‌های متفاوت برای کانتور سرعت جریان در مقطع اتصالات با افزایش ضریب خروج از مرکز، از چپ به راست:

$$1 - e = 0.05 \quad 2 - e = 0.15 \quad 3 - e = 0.3 \quad 4 - e = 0.5 \quad 5 - e = 0.85$$

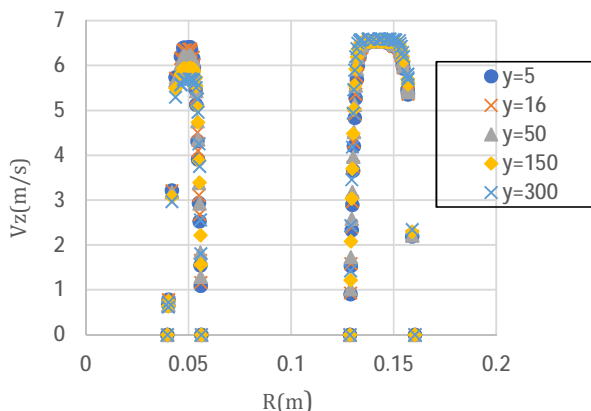
بدون وجود چرخش در جریان، با افزایش خروج از مرکز مقدار افت فشار و نسبت افت فشار هر دو کاهش می‌یابند. و کاهش افت فشار می‌تواند در مواردی تا 50 درصد باشد. دلیل این تغییر در افت فشار به سبب افزایش خروج از مرکز، شکست ناحیه تسلیم نشده به دو بخش (حالت 2) می‌باشد.

بررسی اثر خروج از مرکز در دوران ثابت بر روی پروفیل سرعت محوری با وجود اتصالات



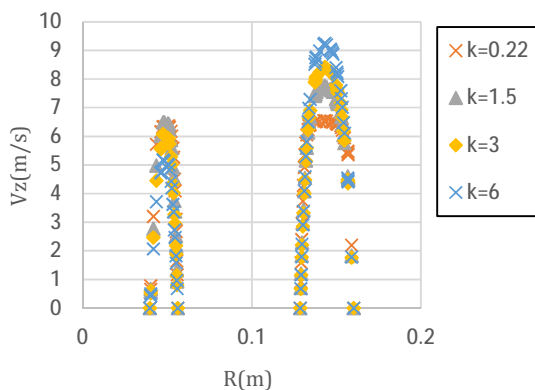
شکل 12 تأثیر ضریب خروج از مرکز بر پروفایل سرعت محوری در هندسه با وجود اتصالات و تقسیم ناحیه تسلیم نشده به دو قسمت با افزایش خروج از مرکز

بررسی اثر تنش تسلیم (t_y) بر روی پروفیل سرعت با وجود اتصالات



شکل 15 نمودار اثر تنش تسلیم بر روی سرعت محوری در هندسه با وجود اتصالات و ضریب خروج از مرکز 0,5

بررسی اثر ضریب ثبات (K) بر روی پروفیل سرعت با وجود اتصالات



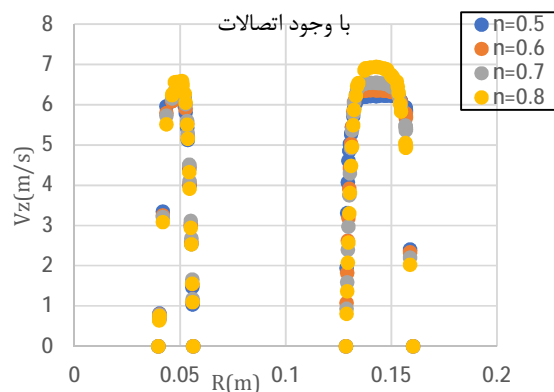
شکل 16 نمودار اثر ضریب ثبات K بر روی سرعت محوری در هندسه با وجود اتصالات و ضریب خروج از مرکز 0,5

بررسی اثر متغیرهای سیال حفاری هرشل بالکی K و n و تنش

تسلیم بر پروفیل سرعت در لوله حفاری با وجود اتصالات

در این بخش اثر تغییر 3 مشخصه اصلی سیال غیرنیوتنی هرشل بالکی (به ترتیب اثر شاخص جریان n ، ضریب ثبات K و مقدار تنش تسلیم t_y) بر روی پروفیل سرعت محوری در هندسه لوله حفاری با وجود اتصالات بررسی شده است. با افزایش شاخص رفتاری جریان و ضریب ثبات اثر نرخ برش بر جریان افزایش می‌یابد و بنابراین باعث افزایش لزجت و به سبب آن افزایش سرعت در فضای حلقوی می‌گردد، تأثیر تنش تسلیم اما متفاوت است و همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد باعث ایجاد شکست در ناحیه تسلیم نشده و تبدیل آن به دو تکه با سرعت‌های متفاوت می‌گردد که این اختلاف سرعت همان‌طور که مشخص است با افزایش تنش تسلیم افزایش می‌یابد. (شکل 14-16)

بررسی اثر شاخص جریان (n) بر روی پروفیل سرعت



شکل 14 نمودار اثر شاخص جریان n بر روی سرعت محوری در هندسه با وجود اتصالات و ضریب خروج از مرکز 0,5

6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که وجود اتصالات لوله‌های حفاری موجب تغییر در شکل جریان و افزایش افت فشار در فضای حلقوی می‌گردد، که تأثیر اتصالات با کنترل دبی پمپاژ گل حفاری و سرعت دوران مته (اعداد رینولدز محوری و دورانی) و همچنین با کنترل خواص رئولوژیکی گل حفاری قابل کاهش می‌باشد.

با افزایش دبی پمپاژ گل حفاری (افزایش عدد رینولدز محوری) لزجت سیال کاهش یافته و همین امر موجب کاهش افت فشار در چاه خواهد شد، اما به دلیل افزایش سرعت گل در چاه تأثیر اتصالات در افت فشار چاه افزایش می‌یابد. بنابراین کنترل مناسب دبی جرمی با در نظر گرفتن اثر اتصالات می‌بایست در محاسبات هیدرولیکی چاه منظور گردد.

همچنین با بررسی وابستگی افت فشار در چاه و اثر اتصالات بر افت فشار، به خواص رئولوژیک گل حفاری مشاهده شد که با تغییر این خواص از طریق افزودنی‌های شیمیایی گل حفاری می‌توان به کنترل افت فشار در محاسبات هیدرولیکی چاه پرداخت. همچنین اثر متغیرهای هندسی همانند نسبت قطر و خروج از مرکز با وجود اتصالات بررسی شد که می‌تواند در بهبود این محاسبات مفید واقع شود.

7- فهرست علائم

جدول 5 جدول علائم انگلیسی و یونانی

علائم انگلیسی	
D_i	قطر داخلی فضای حلقوی، m
D_o	قطر خارجی فضای حلقوی، m
E	فاصله مراکز لوله و چاه حفاری، m
K	ضریب ثبات سیال هرشل بالکی، Pa.s ⁿ
ΔP_{withTJ}	افت فشار با وجود اتصالات، pa
$\Delta P_{withoutTJ}$	افت فشار بدون وجود اتصالات، pa
n	شاخص رفتاری جریان
L_{in}	طول ورودی اتصال، m
L_{out}	طول خروجی اتصال، m
D_{TJ}	قطر خارجی اتصال، m
علائم یونانی	
ξ	نرخ برش
t	تنش برشی
t_y	تنش تسلیم

- [1] International Association of Drilling Contractors. (2015). IADC drilling manual. Houston, TX.
- [2] Cartalos, U., & Dupuis, D. (1993). An Analysis Accounting for the Combined Effect of Drillstring Rotation and Eccentricity on Pressure Losses in Slimhole Drilling. *SPE/IADC Drilling Conference*.
- [3] Jeong, Y.-T., & Shah, S. N. (2004). Analysis of Tool Joint Effects for Accurate Friction Pressure Loss Calculations. *IADC/SPE Drilling Conference*. doi: 10.2118/87182-ms
- [4] Dokhani, V., Shahri, M. P., Karimi, M., & Salehi, S. (2013). Evaluation of Annular Pressure Losses while Casing Drilling. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
- [5] Hemphill, T., Ravi, K., Bern, P. A., & Rojas, J. (2008). A Simplified Method for Prediction of ECD Increase with Drillpipe Rotation. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- [6] Vajargah, A. K., Fard, F. N., Parsi, M., & Hoxha, B. B. (2014). Investigating the Impact of the "Tool Joint Effect" on Equivalent Circulating Density in Deep-Water Wells. *SPE Deepwater Drilling and Completions Conference*.
- [7] E. Podryabinkin, V. Rudyak, A. Gavrilo, and R. May, "Detailed modeling of drilling fluid flow in a wellbore annulus while drilling," Proc. Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng. - OMAE, vol. 6, no. June, 2013, doi: 10.1115/OMAE2013-11031.
- [8] Bahrainian, S., Nabati, A., and Hajidavalloo, E. (2018). Improved Rheological Model of Oil-Based Drilling Fluid for South-western Iranian