

تأثیر متغیرهای رئولوژی و نرخ جریان سیال بر افت فشار در سیستم گردش سیال حفاری

حسین پیراسته‌نیا*، شرکت ملی حفاری • منصور طالبی^۱، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۵/۰۸/۰۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۵/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۱۱/۰۵

چکیده

امروزه جهت بهره‌برداری نفت و گاز ابتدا گروه‌های اکتشاف، مناطق مورد نظر را شناسایی می‌کنند و در صورت مشاهده‌ی لایه‌های نفتی، با حفر چاه‌های متعدد بهره‌برداری از مخازن آغاز می‌گردد. سیستم گل حفاری، در عملیات حفاری نقش به‌سزایی ایفا می‌کند و می‌توان آنرا به دستگاه گردش خون در بدن تشبیه کرد. سیال حفاری محیط پیوسته‌ای است که توان تولید شده در پمپ‌ها را به نوک مته منتقل می‌کند. در برنامه‌ریزی سیال حفاری، باید به هیدرولیک آن توجه کرد؛ یعنی باید سرعت گردش سیال، خواص فیزیکی و نوع ذرات جامد معلق در سیال و درصد آنها را طوری در نظر گرفت که توان پمپ‌ها تنها اندکی تلف شود و بیشتر این توان در مته و برای تمیز کردن ته چاه مصرف گردد.

در این مطالعه هیدرولیک سیال میدان گازی پارس جنوبی از پمپ‌های حفاری تا خروج از مته، از نظر افت فشار بررسی شده است. در این تحلیل با استفاده از مدل قانون توانی^۲ سیال (ارتباط بین افزایش تنش برشی و نرخ برشی) به کمک نرم‌افزار فلونت افت فشار در رشته‌ی حفاری تجزیه و تحلیل شده است. در قسمت اول، نرخ جریان ثابت و متغیرهای رئولوژی سیال حفاری^۳ متغیر و در قسمت دوم، نرخ جریان متغیر و متغیرهای رئولوژی سیال حفاری ثابت فرض گردیده و افت فشار در سیستم گردش سیال بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که گرانیوی پلاستیک^۴ برابر با ۱۵، نقطه‌ی واروی^۵ برابر ۲۱ و وزن سیال حفاری^۶ برابر ۱۰/۲ پوند بر گالن است افت فشار در متغیرهای رئولوژی بیشینه است. همچنین با افزایش جریان خروجی پمپ‌ها از ۸۵۰ به ۱۲۰۰ گالن در دقیقه افت فشار در سیستم سیال حفاری روند افزایشی دارد. با توجه به محدودیت‌های فشاری سیستم گردش سیال حفاری و تجهیزات سطحی، امکان افزایش نرخ جریان خارج از مقدار بهینه‌ی محاسبه شده وجود ندارد.

واژگان کلیدی:

متغیرهای رئولوژی، سیال حفاری، افت فشار، مدل توانی

مقدمه

فضای حلقوی و حرکت رشته‌ی حفاری به سمت بالا و پایین بدون گردش سیال حفاری یا ترکیبی از هر دو حالت است. در حالت دینامیک جریان گل، افزایش فشاری در سیال درون رشته‌ی حفاری و فضای حلقوی ایجاد می‌کند. اگر این فشار به‌طور مناسب کنترل نشود سبب شکست سازند یا ترکیدن خطوط لوله‌ی سطحی گردش گل می‌شود. این مشکلات علاوه بر افزایش هزینه‌ها، برای پرسنل حفاری نیز خطرناک است. از وظایف مهم یک سیال حفاری حمل کنده‌های حفاری و انتقال آنها به سطح زمین است که این عمل شامل حمل ذراتی مانند شیل‌های ریزشی که از قسمت‌های مختلف دیواره‌ی چاه وارد حفره می‌شوند نیز هست. عدم تمیزسازی چاه می‌تواند سبب مشکلات زیادی از قبیل پر شدن ته چاه از کنده‌های بعد از لوله‌ی بالا و ایجاد نقاط تنگ در چاه یا گیر کردن لوله‌ها گردد. توانایی سیال حفاری در تمیزسازی چاه، به هیدرولیک سیستم و خواص سیال حفاری بستگی دارد.

به‌علت مشترک بودن میدان گازی پارس جنوبی، سرعت عملیات حفاری جهت بهره‌برداری هرچه سریع‌تر از لایه‌های نفت و گاز اهمیت ویژه‌ای دارد. افزایش نرخ نفوذ مته^۷ که موجب افزایش سرعت عملیات حفاری می‌شود به عواملی مثل نوع مته، خصوصیات سازند، خصوصیات سیال حفاری، شرایط اعمالی بر مته (وزن روی مته^۸ و سرعت دوران^۹)، سایش دندان‌های مته و هیدرولیک^{۱۰} بستگی دارد. بنابراین افزایش سرعت عملیات حفاری (که به‌علت کاهش زمان تمام‌شده‌ی حفاری یک چاه، سبب کاهش هزینه‌ها نیز می‌شود) نیازمند بررسی متغیرهای مؤثر بر آنست.

هیدرولیک حفاری: هیدرولیک شاخه‌ی مهمی از مهندسی سیالات حفاری است که درباره‌ی این سیالات در دو وضعیت استاتیک و دینامیک بحث می‌کند. در شرایط استاتیک سیال حفاری و رشته‌ی حفاری در حالت سکون هستند و شرایط دینامیک شامل گردش سیال حفاری درون رشته‌ی حفاری و

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (h.pirastenia@gmail.com)

از متغیرها و همچنین تأثیر چندین متغیر بر طراحی لوله‌های حفاری ارزیابی شده‌اند [۲].

می و همکاران به کمک دینامیک سیالات محاسباتی از جهات گوناگون، انتقال کنده‌های حفاری در فضای حلقوی را شبیه‌سازی کرده‌اند. حمل مؤثر کنده‌های حفاری از عوامل اصلی یک برنامه‌ی سیال حفاری خوب است. برای بهتر فهمیدن تأثیر برخی متغیرها بر حمل کنده‌های حفاری، توسط معادلات ناویراستوکس^{۱۱} و معادلات پیوستگی^{۱۲} و با استفاده از مدل پاورلا، مدل ریاضی انتقال کنده‌های حفاری در فضای حلقوی به دست آمده است. آنها سه مدل سیال حفاری با رئولوژی گوناگون را ارزیابی کرده و با کمک دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر جریان حاکم در فضای حلقوی، رفتار سیال حفاری در هنگام رقیق شدن، اندازه‌ی کنده‌های حفاری و شکل آنها در هنگام حمل کنده‌ها در موقعیت‌های مختلف در درون‌چاه را بررسی کرده‌اند. همچنین با توجه به اینکه در حفاری انحرافی، در جایی که فضای حلقوی غیرهم‌مرکز است کنده‌ها تمایل دارند در شکاف‌های^{۱۳} باریک که سرعت سیال بسیار کم است جمع شوند، جهت طراحی سیال حفاری، پروفایل سرعت در فضای حلقوی را بررسی کرده و عملکرد آنها را با نتایج و گزارش‌های حاصل بررسی نموده‌اند [۳].

کبیر و گامو به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، دیواره‌ی چاه‌های عمودی را در فشار و دمای زیاد شبیه‌سازی و مدل‌سازی کرده‌اند. در این تحقیق با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، فیلتر کیک روی دیواره‌ی چاه عمودی را در فشار بیشتر از ۱۷۵/۸ مگاپاسکال یا ۲۵۵۰۰ پام و در دمای ۱۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد شبیه‌سازی کرده‌اند. سیال حفاری از یک سیال دو فازی که از ذرات جامد معلق در سیال نیوتنی است و ذرات با اندازه‌ی ۷ و ۴۵ میکرومتر تشکیل شده که شرایط حفاری با فشار و دمای زیاد مقایسه شده‌اند. مقایسه‌ی هر دو سناریو نشان می‌دهد که فیلتر کیک گل حفاری تشکیل شده برای ذرات ۴۵ میکرومتر ضخیم‌تر از ذرات ۷ میکرومتر است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که کیک گل تشکیل شده در طول فرآیند حفاری، برای اعماق بیشتر، ضخیم‌تر است و برای اعماق کمتر، ضخامت کمتری دارد [۴].

مهدی متین و همکاران سیال حفاری را از نظر میزان هرزروی در میدان نفتی مارون بهینه‌سازی کرده‌اند. ابتدا مشخصات کلی مخزن بیان شده و سپس هرزروی در سایر چاه‌ها بررسی گردیده است. با توجه به رابطه‌ی هرزروی با فشار سیال و وزن گل، مقدار بهینه‌ی وزن گل به دست آمده و در پایان با تجزیه‌ی و تحلیل انجام شده، مقدار و نوع مواد کنترل‌کننده‌ی هرزروی برای استفاده در این منطقه معرفی شده است [۵].

مصطفی شجری جهت بهینه‌سازی عملیات حفاری در میدان نفتی - در جنوب غربی ایران مدل‌های مختلف را تحلیل کرده است. در

متغیرهای متعددی بر افزایش نرخ نفوذ مته مؤثرند که هر یک تأثیر ویژه‌ای بر سرعت حفاری دارند. یکی از مهم‌ترین این عوامل هیدرولیک سیال حفاری است که اگر به درستی رعایت نشود فشار زیاد پمپاژ سیال سبب ریزش سازندهای سست و ناپایدار و گیر کردن لوله‌ها و در نتیجه کاهش سرعت حفاری، هزینه‌ی زیاد ناشی از هدر رفتن مواد و هزینه‌ی انتظار یا حتی از دست رفتن چاه می‌شود. بنابراین تعیین مناسب‌ترین و بهینه‌ترین مقدار پمپاژ سیال حفاری از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از اهداف هیدرولیک حفاری که در مقاله‌ی حاضر نیز مدنظر است محاسبه‌ی افت فشارهای ناشی از نیروهای اصطکاک در هر قسمت از سیستم گردش گل است. این افت فشار را می‌توان در چهار قسمت افت فشار در اتصالات سطحی، در داخل لوله، در مته و در دالیز بررسی کرد. البته افت فشار به نوع سیال مورد استفاده و نوع جریان در سیستم گردش گل بستگی دارد. در این مقاله با بررسی گزارش‌های روزانه‌ی حفاری، افت فشار در سیستم گردش سیال حفاری با هدف به دست آوردن بهینه‌ترین مقدار پمپاژ برای حفاری "۱۲-۱ میدان گازی پارس جنوبی بررسی می‌شود. در این مطالعه، افت فشار تجهیزات سطحی، لوله‌های حفاری و مته‌ی حفاری بررسی خواهد شد. سپس با تغییر نرخ جریان و خواص رئولوژی سیال حفاری، بهینه‌ترین فشار پمپاژ معرفی می‌گردد.

۱- مروری بر مطالعات پیشین

دو شرکت حفاری لینگ و شلمبرژر به روش دینامیک سیالات محاسباتی با هدف گسترش و ساده‌سازی طراحی مته، مته و جریان اطراف آنرا شبیه‌سازی کرده‌اند. آنها به کمک نمونه‌ای از سیال، حمل کنده‌های حفاری و خنک‌کاری مته حفاری را شبیه‌سازی کرده‌اند. سرعت زیاد جریان موجب خوردگی مته‌ی حفاری شده و سرعت کم جریان موجب توقف انتقال کنده‌ها می‌گردد که این موارد می‌تواند سبب گیر کردن لوله‌ها و همچنین ژله‌ای شدن سیال حفاری شود که این امر صرف نیروی زیادی برای بازگشت به حفاری را طلب می‌کند. از این رو در تحقیق حاضر طراحی برای سیال حفاری و ساده‌سازی مته ارائه شده است [۱].

دایکس با روش دینامیک سیالات محاسباتی جهت طراحی لوله‌های حفاری، انتقال کنده‌های حفاری را شبیه‌سازی کرده است. در این تحقیق ابتدا برای مدل‌سازی انتقال کنده‌ها در فضای حلقوی از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده گردیده و نتیجه با نتایج تجربی قبلی مقایسه شده‌اند و در بخش دوم تأثیر متغیرها بر لوله‌ی حفاری در حال چرخش، سرعت سیال حفاری، خروج از مرکز لوله‌های حفاری، شیب چاه و تأثیر انباشت کنده‌های حفاری بر نرخ نفوذ مته در لوله‌های مختلف و اندازه‌های چاه‌های مختلف بررسی گردیده و نتایج تأثیر هر یک

الماس به کمک افزایش سرعت سیال قابل دست‌یابی است. این رابطه در محدوده‌ی گسترده‌ای از انواع مته و اندازه‌ی مته معتبر است. بر اساس این نتایج در طراحی جدید نازل‌های مته از مکانیسم افزایش سرعت سیال جهت دست‌یابی به بیشترین نرخ نفوذ مته استفاده شده است [۷].

پریرا و همکاران پروفایل سرعت و فشار سیال حفاری در فضای حلقوی را شبیه‌سازی کرده‌اند و با شبیه‌سازی سیال غیرنیوتنی در فضای حلقوی، فضای بین دو لوله‌ی هم‌مرکز و هم‌محور را بررسی نموده‌اند. در این آنالیز تأثیر سرعت، پروفایل مرکزی سرعت و خارج از مرکز شدن دو لوله‌ی هم‌مرکز را روی تلفات هیدرویکی بررسی نموده و نتایج را با نتایج سایر گزارش‌ها بررسی کرده‌اند [۸]. مهدی تدینی تأثیر نرخ نفوذ مته در عملکرد دکل‌های حفاری، همچنین نوع و قدرت دستگاه حفاری، نوع مته و جنس سازند، عمق سازند و فشار گل حفاری را بررسی کرده است. در این تحقیق تأثیر هر یک از عوامل بر نرخ نفوذ مته بررسی و پیشنهادهایی برای گل حفاری و تجهیزات دکل‌های حفاری ارائه شده است [۹].

در این مطالعه افت فشار در سیستم سیال حفاری در هنگام حفاری حفره‌ی "۱۲-۱/۴" میدان گازی پارس جنوبی بررسی می‌شود. در این میدان استفاده از سیال حفاری پایه آبی و پلیمری خاص (با توجه

این تحقیق دست‌یابی به متغیرهای بهینه در یک میدان نفتی واقع در جنوب غربی ایران دنبال شده و تقابل متغیرهای قابل کنترل در روش بهینه‌سازی حفاری بررسی شده است. متغیرهای مورد توجه شامل وزن روی مته، سرعت چرخش آن و توان هیدرولیکی است. روابط نرخ نفوذ و عمر مته با رابطه‌ی هزینه‌ی حفاری ترکیب شده و نتایج حاصل از تابع هزینه با متغیرهای قابل کنترل به حداقل رسیده و در حقیقت تأثیر متغیرهای مختلف حفاری از یک مدل را بر نرخ نفوذ پیش‌بینی کرده است. برای بهینه‌سازی حفاری سازند با استفاده از داده‌های حفاری، معادله‌ای که نشان‌دهنده‌ی نرخ نفوذ حفاری در مخزن آسماری در یکی از میادین نفتی جنوب غرب کشور است را ارائه شده است [۶].

میشل ولز و همکاران از شرکت بیکر برای کاهش تجمع کنده‌ها روی مته‌های حفاری، مته‌ی الماس^{۱۴} طراحی کرده‌اند. برای پیش‌بینی تجربی مقدار جمع شدن کنده‌های حفاری روی مته از متغیرهای محل جمع شدن کنده‌های حفاری^{۱۵}، سطح مته^{۱۶} و فشار هیدرولیکی استفاده می‌شود. با این روش بیشترین نرخ نفوذ مته قابل دست‌یابی است. با استفاده از این اصول به کمک شبیه‌ساز نتایج دقیقی برای مته‌هایی با اندازه‌ی بیش از "۱۲-۱/۴" به دست آمده است. علاوه بر این بیشینه‌ی نرخ نفوذ مته‌ی

ابعاد دقیق هر بخش از هندسه



Section	No	Name	Length (m)	D (in)	D (mm)	Direction
1. SURFACE	1	Pump Out-1	10	6.5	165.1	+X
	3	Pump Out-2	10	6.5	165.1	+Y
	5	Pump Out-3	30	6.5	165.1	+X
	8	Stand Pipe	20	5	127.0	+Y
	11	Hose	30	3	76.2	+X
2. DRILL PIPE	1	Drill Pipe	1180.14	5.153	130.9	-Y
	2	12*HWDP	112.06	4.125	104.775	-Y
	3	X/O 6 5/8" Reg-XT57	1.14	4.0625	103.188	-Y
	4	2*8 1/4" Steel D.C	18.92	2.875	73.025	-Y
	5	8" Jar Accelerator	8.59	2.9375	74.6125	-Y
	6	2*8 1/4" Steel D.C	18.92	2.875	73.025	-Y
	7	8" Drilling Jar	9.88	3.0625	77.7875	-Y
	8	9*8 1/4" Steel D.C	84.67	2.875	73.025	-Y
3.DRILL BIT	1	Drill Bit	0.4786	4.0625	103.188	-Y

به حفاری در دریا و محدودیت‌های زیست‌محیطی) و همچنین خصوصیات لایه‌ی زمین در آن منطقه (وجود لایه‌های شیلی ریزی) که موجب گیر کردن لوله‌های حفاری می‌شود سبب به‌وجود آمدن دیدگاهی متفاوت در خصوص هیدرولیک سیال حفاری برای به‌دست آوردن بهترین تمیزسازی و افزایش سرعت حفاری خواهد شد و به‌همین دلیل تاکنون مدل‌سازی میدان پارس جنوبی انجام نشده است.

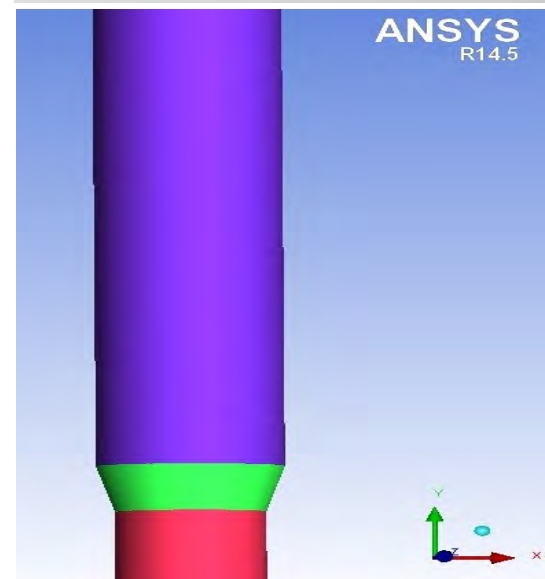
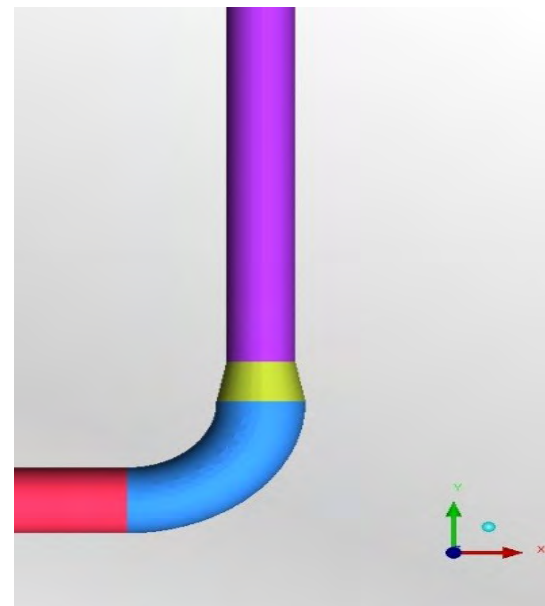
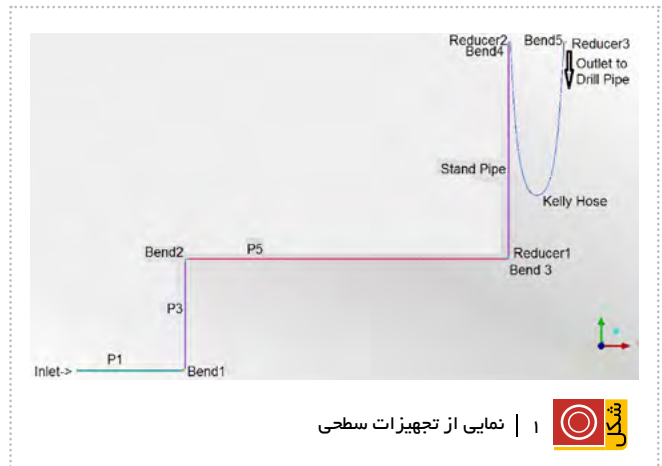
۲- بیان مسأله

در مطالعه‌ی حاضر با هدف دستیابی به مقدار افت فشار در چاه‌های نفت و گاز، مراحل شبیه‌سازی جریان سیال از پمپ تا مته بر اساس اطلاعات جمع‌آوری شده از گزارش‌های روزانه‌ی حفاری چاه‌های میدان پارس جنوبی بررسی می‌شود. در جدول ۱- ابعاد دقیق تجهیزات سطحی، لوله‌های حفاری و مته بر اساس گزارش‌ها و اندازه‌های واقعی ارائه شده است. این فرآیند را می‌توان به‌صورت جداگانه در سه مرحله‌ی تجهیزات سطحی، لوله‌های حفاری و مته‌ی حفاری بررسی کرد. برای مدل‌سازی جریان سیال از نرم‌افزار فلوئنت استفاده شده است. بنابراین همان‌گونه که در شکل ۱- نشان داده شده، هندسه‌ی هر بخش تولید شده است. در بخش‌های گوناگون بین لوله‌های اصلی اتصال خم^{۱۷} در نظر گرفته شده و اگر قطر لوله‌ها ناهمسان بوده، اکسپندر یا ردیوسر در نظر گرفته شده است (شکل ۲).

برای شبیه‌سازی هندسه‌ی شلنگ اتصال یا Hose از رابطه‌ی کابل استفاده شده است. با استفاده از نقاط دو سر شلنگ و در ازای آن، معادله‌ی ۱- به‌دست آمده است.

$$y = 4.9858 + 0.6531 * \cosh [1.531(x-2.5)] \quad (1)$$

سپس با قراردادن نقاط، هندسه‌ی شلنگ اتصال به‌دست آمده است. نقاط هندسه‌ی شلنگ اتصال در جدول ۲- ارائه شده که در این



شکل ۲ | نمایی از اتصالات سطحی و لوله‌های حفاری

جدول ۲ | مختصات نقاط روی شلنگ

O	X	Y	5-X
۱	۰/۱	-۲/۱۳۱۷	۴/۹
۲	۰/۲۵	-۴/۷۷۱۲	۴/۷۵
۳	۰/۵	-۸/۰۲۰۵	۴/۵
۴	۱	-۱۱/۷۳۶	۴
۵	۱/۵	-۱۳/۴۳۴	۳/۵
۶	۲	-۱۴/۱۶	۳

مورد نظر داشته و باید کیفیت آن بسیار بالا باشد تا در مراحل تحلیل، از تولید خطاهای عددی (هرچند ناچیز) جلوگیری شود. از دید زمان نیز پرهزینه‌ترین بخش کار همین مرحله خواهد بود. برای هندسه‌های با ساختار منظم و متقارن تا حد ممکن از شبکه‌ی با سازمان استفاده گردیده و برای هندسه‌های پیچیده، شبکه‌ی بی‌سازمان به کار گرفته می‌شود. مزیت استفاده از فلونت، دقت و حساسیت آن نسبت به مسیر جریان سیال است؛ زیرا در فلونت باید دقیقاً مسیر جریان برای نرم‌افزار مشخص شود و تفاوت داده‌های حاصل از آن بدین صورت است که افت فشار را در تک‌تک نازل‌های مته ارائه می‌دهد؛ نه اینکه مانند برخی نرم‌افزارها به صورت یک جا افت فشاری در مته ارائه کند؛ چراکه این امر در طراحی مته‌ها و همچنین تعیین نوع مته با ترکیب شکلی نوع نازل‌ها برای جلوگیری از هرزروی سیال حفاری از اهمیت خاصی برخوردار است؛ زیرا شما دقیقاً می‌دانید کدام نازل چقدر افت فشار ایجاد می‌کند. معادلات حاکم عبارتند از: معادلات پیوستگی، معادلات انرژی و بقای جرم (معادلات ۲-۵):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dh}{Dt} - \nabla \cdot k \nabla T - \nabla \cdot \left(\sum_j \gamma_j h_j \nabla m_j \right) - \mu \phi - \frac{DP}{Dt} - S = 0 \quad (5)$$

در این بررسی نیز به همین دلیل برای دو بخش تجهیزات سطحی و لوله‌ی حفاری، شبکه‌بندی به‌روش با سازمان و برای بخش مته‌ی حفاری (به‌دلیل پیچیدگی) شبکه‌بندی به‌روش بی‌سازمان انجام شده که کیفیت شبکه‌ها در شکل ۳- نشان داده شده‌اند.

برای بررسی دقیق‌تر کیفیت شبکه‌های تولیدی از متغیرهای کیفیت موجود در نرم‌افزار ICEM استفاده شده است. برخی از این ویژگی‌ها

رابطه به‌ازای x از ۰/۱ تا ۲ مقادیر Y بین ۲/۱۳۱۷- تا ۱۴/۱۶- به‌دست آمده است.

پس از اتصالات لوله‌ی شلنگی، لوله‌ی حفاری و اتصالات وابسته است که ارتباط بین لوله‌های سطحی با مته‌ی حفاری را برقرار می‌کند. پس از لوله‌ی حفاری هفت اتصال دیگر نیز وجود دارد که هر جا قطر تجهیزات متفاوت بود در بین آنها اکسپندر یا ردیوسر در نظر گرفته شده است. سومین بخش نیز به‌عنوان بخش پایانی مته‌ی حفاری، مته‌ی الماس با قطر ورودی تقریبی "۴" است.

۲-۱- روش حل

روش حل بدین صورت است که ابتدا معادلات حاکم بر جریان شامل پیوستگی، مومنتوم و انرژی به‌روش حجم محدود محاسبه شده و با حل آنها مشخصه‌های جریان از قبیل سرعت، فشار و دما به‌دست می‌آید. حل توسط نرم‌افزار انسیس فلونت (نرم‌افزاری چندمنظوره در زمینه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی برای مدل‌سازی جریان سیال در هندسه‌های پیچیده) انجام شده است. با توجه به محیط مناسب نرم‌افزار جهت تعریف مسأله و شرایط پیچیده، تعریف شرایط مرزی گوناگون و حل مسائل پیچیده شامل تأثیر پدیده‌های مختلف به‌کمک این نرم‌افزار قابل حل است.

فلونت برای تحلیل مسائل خاص از روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری متفاوتی استفاده می‌کند. این نرم‌افزار با زبان برنامه‌نویسی C نوشته شده و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می‌برد و در نتیجه با استفاده از ساختار مناسب داده‌ها و اطلاعات، حافظه‌ی دینامیک و کنترل انعطاف‌پذیر، محاسبات را ممکن می‌سازد. نوع مش‌های قابل تولید و دریافت در فلونت شامل شبکه‌های مثلثی و چهار ضلعی برای هندسه‌های دوبعدی و شبکه‌های چهاروجهی، شش‌وجهی، هرمی یا گوه‌ای برای هندسه‌های سه‌بعدی است. همچنین فلونت اجازه‌ی بهبود شبکه را می‌دهد که این بهینه‌سازی برای حل و شبکه‌ی قابلیت در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا نتایج را در ناحیه‌هایی که گردهای بزرگ دارند دقیق‌تر کند.

در تولید شبکه این مرحله بیشترین اهمیت را در دست‌یابی به دقت زیاد

۳ | مشخصات شبکه‌بندی هر بخش و بررسی نشانگرهای کیفیت

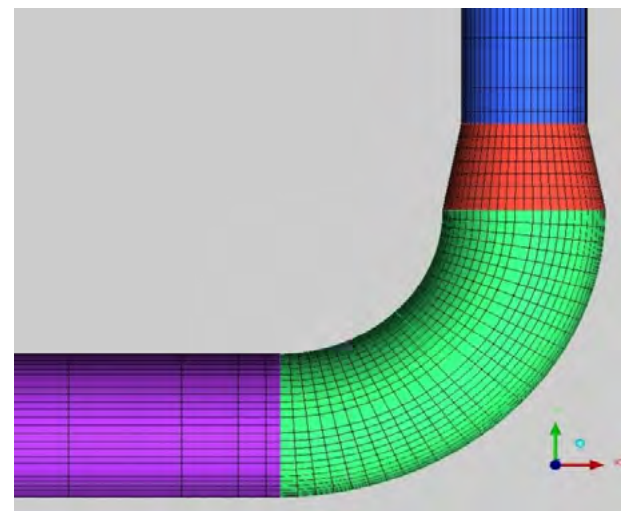
Cells No	Part Name	Grid Type	Cells	ICEM		Fluent	
				min Q	min Angle	min Ortho.	max AR
۱	Surface	Structured+O-Grid	۶۲۹/۱۶۰	۰/۴۷	۳۸	۰/۵۹	۸۸
۲	Drill Pipe	Structured+O-Grid	۷۶۵/۸۴	۰/۵۵	۵۴	۰/۷۹	۷۰۱
۳	Drill Bit	Unstructured	۱۲۴/۰۳۷	۰/۲۸	۱۹	۰/۲۹	۲۰
Total			۱/۵۱۹/۰۸۱				

شرایط خروجی پمپ به عنوان ورودی بخش نخست در نظر گرفته شده و نرخ خروجی به عنوان شرط مرزی خروجی خواهد بود. بدین ترتیب در هر بخش از هندسه، فشار خروجی مرحله، پیش شرط مرزی ورودی و نرخ خروجی، شرط مرزی خروجی خواهد بود.

در جدول ۳ بیان شده‌اند. چنان‌که دیده می‌شود در هر سه بخش، کیفیت شبکه کاملاً بهتر از مقدار قابل قبول است. در ادامه نمونه‌ی شبکه‌بندی تولیدی برای بخش‌های گوناگون هندسه ارائه شده است. فایل خروجی حاصل، ورودی نرم‌افزار است. فرآیند حل سه بخش بدین ترتیب خواهد بود که

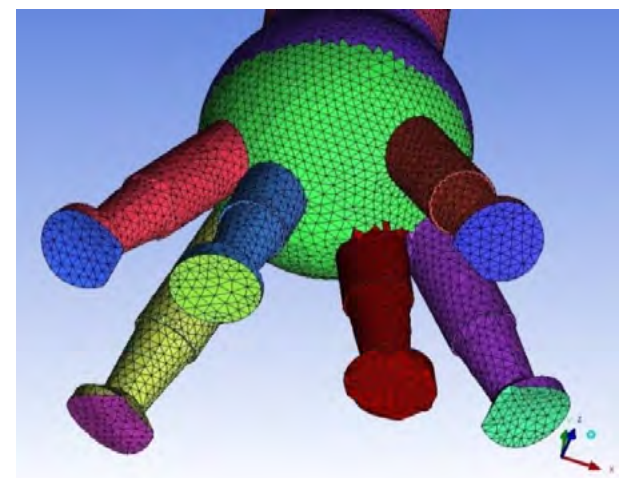
جدول ۵ | شرایط مرزی مدل لزجت

Method	Unit	Shear Rate Dependent
Consistency Index (K)	۷/۵۲	kg.s ⁽ⁿ⁻²⁾ /m
Power Law Index (n)	۰/۴۷	
Min Viscosity Limit	۰/۰۴۵	kg/ms
Max Viscosity Limit	۰/۶۵	kg/ms



جدول ۶ | افت فشار در سه بخش

No	Name	Cells	P-in (Pa)	P-in (Psi)	P-out (Pa)	P-out (Psi)
1	Surface	۶۲۹,۱۶۰	۱۰,۸۲۷,۰۰۰	۱۵۷۰	۱۰,۲۳۷,۰۰۰	۱۴۸۴
2	Drill Pipe	۷۶۵,۸۱۴	۱۰,۲۳۷,۰۰۰	۱۴۸۴	۸,۵۴۵,۵۲۴	۱۲۳۹
3	Drill Bit	۱۲۴,۰۳۷	۸,۵۴۵,۵۲۴	۱۲۳۹	۸,۱۱۶,۷۳۰	۱۱۷۷



جدول ۷ | حالت‌های مختلف تغییر متغیرهای رئولوژی

NO	GPM	MW	θ_{600}	θ_{300}	PV	YP	N	K
۱	۹۰۰	۹/۸	۳۷	۲۷	۱۰	۱۷	۰/۴۵	۸/۱۱
۲	۹۰۰	۹/۸	۴۱	۳۰	۱۱	۱۹	۰/۴۵	۹/۲۴
۳	۹۰۰	۱۰/۲	۴۴	۳۲	۱۲	۲۰	۰/۴۶	۹/۳۴
۴	۹۰۰	۱۰/۲	۵۱	۳۶	۱۵	۲۱	۰/۵۰	۸/۰۲

شکل ۳ | نمایی از شبکه‌ی لوله‌ها و منتهی حفاری

جدول ۸ | حالت مختلف تغییر نرخ جریان

NO	GPM	MW	θ_{600}	θ_{300}	PV	YP	N	K
۱	۸۵۰	۹/۸	۳۶	۲۶	۱۰	۱۶	۰/۴۷	۷/۵۲
۲	۹۵۰	۹/۸	۳۶	۲۶	۱۰	۱۶	۰/۴۷	۷/۵۲
۳	۱۰۰۰	۹/۸	۳۶	۲۶	۱۰	۱۶	۰/۴۷	۷/۵۲
۴	۱۲۰۰	۹/۸	۳۶	۲۶	۱۰	۱۶	۰/۴۷	۷/۵۲

جدول ۹ | شرایط مرزی جریان

Density	lb/gal=	۹/۸	kg/m3=	۱۱۷۴/۲۹۸۷
Flow	GPM=	۹۰۰	m3/s=	۰/۰۵۶۷۹
Mass Flow	kg/s=	۶۶/۶۸۸		
Velocity	FPS=	۸/۷۰۳	m/s=	۲/۶۵۳
Pressure	psi=	۱۵۷۰	Pascal=	۱۰,۸۲۴,۷۷۳

۲-۲- شرایط مرزی

بر اساس رئولوژی سیال در هنگام حفاری عمق ۱۴۷۷ متری در جدول-۵ ارائه شده است.

پس از انجام تنظیمات اولیه طبق جدول-۵ حل هر بخش بدین صورت بود که خروجی هر بخش به عنوان ورودی بخش بعدی در نظر گرفته شد. پس از اطمینان از همگرایی پاسخها داده‌های حاصل در جدول-۶ مرتب شده‌اند.

۲-۳- تأثیر رئولوژی بر افت فشار

پس از به دست آوردن افت فشار بر اساس اطلاعات گزارش‌های روزانه حفاری، تأثیر تغییرات خواص رئولوژی در مقدار افت فشار بررسی می‌شود. برای این منظور با استفاده از برنامه‌ی سیال حفاری در چاه مورد بررسی، چند متغیر رئولوژی سیال را در محدوده‌ای قابل قبول تغییر داده و تأثیر آن بر افت فشار را بررسی می‌کنیم. با مقایسه‌ی مقادیر حاصل از شبیه‌سازی بهترین افت فشار پیشنهاد داده می‌شود.

ابتدا با توجه به محدوده‌ی قابل قبول رئولوژی سیال حالت‌های مختلف رئولوژی بررسی می‌شود. در هر حالت با توجه به نرخ جریان ورودی به تغییر متغیرهای گرانیوی پلاستیک، نقطه‌ی واروی و وزن سیال حفاری طبق جدول-۷، افت فشار بررسی شده است.

۲-۴- تأثیر نرخ جریان بر افت فشار

در مرحله‌ی بعد تأثیر نرخ جریان بر افت فشار سیستم گردش سیال حفاری بررسی شده است. بنابراین تأثیر تغییر نرخ جریان ورودی از ۸۵۰ تا ۱۲۰۰ گالن در دقیقه بر مقدار افت فشار در چهار حالت دیگر بررسی می‌شود. در هر حالت با ثابت نگاه داشتن رئولوژی نرخ جریان‌های ۸۵۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ گالن در دقیقه بررسی می‌شود (جدول-۸).

۳- نتایج، بحث و بررسی

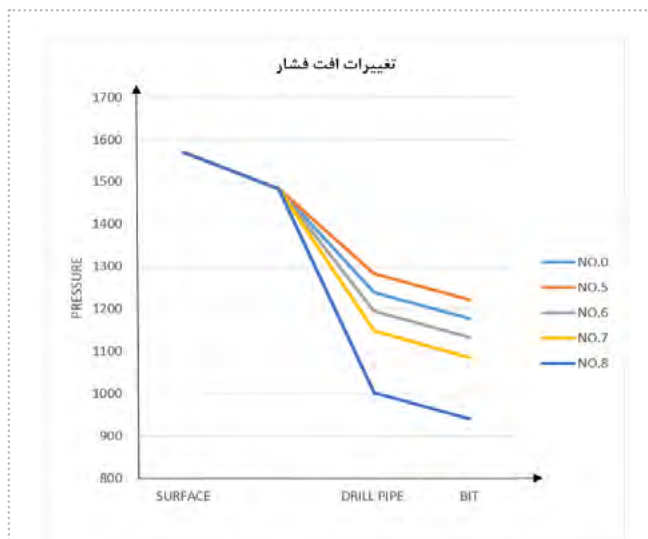
با توجه به مطالعات و بررسی‌های انجام شده برای به دست آوردن افت فشار از پمپ تا مته‌ی حفاری، ابتدا توسط داده‌های حاصل از گزارش‌های روزانه‌ی حفاری چاه‌های میدان پارس جنوبی و سپس شبیه‌سازی آن به کمک نرم‌افزار، مقدار افت فشار در هر قسمت از تجهیزات سطحی، لوله‌های حفاری و مته‌ی حفاری به دست آمده است. در قسمت نخست با در نظر گرفتن برنامه‌ی سیال حفاری با تغییر رئولوژی حفاری مقدار افت فشار برای چهار حالت به دست آمده که در شکل-۴ نتایج با نتایج حالت صفر مقایسه شده است. در حالت چهارم با PV برابر با ۱۵، YP برابر ۲۱ و وزن گل برابر ۱۰/۲ پوند بر گالن بیشترین مقدار افت فشار مشاهده شد. در قسمت دوم با تغییر نرخ جریان، مقدار افت فشار برای چهار حالت نرخ جریان‌های ۸۵۰، ۹۵۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ گالن بر دقیقه به دست آمده است. در شکل-۵ نتایج با نتایج حالت صفر مقایسه شده است که بیشترین افت فشار در حالت هشتم در نرخ جریان ۱۲۰۰ گالن بر دقیقه به دست آمد.

شرایط مرزی جریان خروجی پمپ بر اساس گزارش روزانه‌ی حفاری چاه در هنگام حفاری عمق ۱۴۷۷ متری در سازندهای سورمه و هیس با لیتولوژی دولومیت و اندریت در شکل-۴ ارائه شده است. (این حالت با توجه به گزارش‌های روزانه‌ی حفاری، برنامه‌ی حفاری یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی و موقعیت عملیاتی ویژگی‌های جریان استفاده می‌شود).

پس از بررسی مقالات مربوطه، به کارگیری مدل پاورلا کاربردی‌تر به نظر می‌رسد [۱۰]. سیال مورد استفاده، گل حفاری پایه آبی پلیمری^{۱۸} است که برای مدل‌سازی آن از مدل لزجت پاورلا غیرنیوتنی استفاده شده است. مشخصات مدل به کار رفته



شکل ۴ | تغییرات افت فشار با تغییر متغیرهای رئولوژی



شکل ۵ | تغییرات افت فشار با تغییر نرخ جریان

نتیجه گیری

■ بیشترین افت فشار در خروجی مته در حالت هشتم اتفاق می افتد (۹۴۱ پام).
 ■ از آنجا که افت فشار تأثیر زیادی بر تمیزسازی کنده های حفاری از ته چاه دارد، هرچه افت فشار بعد از خروج از مته بیشتر باشد قدرت حمل و انتقال کنده های حفاری به سطح بیشتر خواهد بود. البته با توجه به محدودیت های فشاری لوله های حفاری و شکست سازند نمی توان فشار را تا هر مقدار افزایش داد.
 ■ بررسی گزارش های روزانه ی حفاری میدان پارس جنوبی نشان داد که در حفاری حفره ی "۱۲-۱" در نرخ جریان ۱۲۰۰ گالن در دقیقه سازند دچار شکست شده و هرزروی گل حفاری شدید خواهد بود.
 ■ درست است که بهترین افت فشار (که بهترین تمیزسازی را در پی دارد) در نرخ جریان ۱۲۰۰ گالن در دقیقه حاصل می شود اما جهت افزایش اطمینان برای جلوگیری از ریزش دیواره و شکست سازند، نرخ جریان حداکثر تا ۱۰۰۰ گالن در دقیقه پیشنهاد می گردد.

در این مطالعه با هدف دست یابی به افت فشار سیستم گردش سیال حفاری، از پمپ های گل حفاری تا خروج از مته تأثیر دو عامل رئولوژی سیال حفاری و نرخ جریان سیال حفاری و تغییرات آنها بر افت فشار بررسی شده است. با حل معادلات مومنوم و پیوستگی و با در نظر گرفتن شرایط مرزی با توجه به شرایط حفاری یکی از چاه های میدان پارس جنوبی، تغییرات افت فشار بررسی شده است. شایان ذکر است با توجه به طراحی خاص و انحصاری تجهیزات حفاری از جمله مته ی حفاری، شبیه سازی با مشکلات زیادی روبرو شده است. از این رو نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:
 ■ مقدار افت فشار در متغیرهای رئولوژی در حالت چهارم بیشترین است که در این حالت PV برابر با ۱۵، YP برابر ۲۱ و وزن گل حفاری برابر ۱۰/۲ پوند بر گالن است.
 ■ در حالت هشتم با تغییر نرخ جریان، مقدار افت فشار بیشترین است (نرخ جریان خروجی پمپ ها ۱۲۰۰ گالن در دقیقه است)

پانویس ها

- | | | |
|------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1. mstalebi@aeoi.org.ir | 8. Weight On Bit | 15. Junk Slot Area (JSA) |
| 2. Power Law | 9. Rotation Per Minute | 16. Face Volume (FV) |
| 3. Drilling Fluid Rheology | 10. Hydraulic | 17. Bending |
| 4. Plastic Viscosity (PV) | 11. Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) | 18. Hydro-Foil (KCI/PHPA polymer) |
| 5. Yield Point (YP) | 12. Continuity Equation | |
| 6. Drilling Fluid Mud Weight | 13. Narrowest Gap | |
| 7. Rate Of Penetration (ROP) | 14. Polycrystalline Diamond Compact (PDC) | |

منابع

- [1] J. Hamne, CFD Modeling of Mud Flow around Drill Bit, Master of Science in Engineering Technology Industrial Design Engineering, 2014.
- [2] Gregory B. Dykes, CUTTINGS TRANSPORT IMPLICATIONS FOR DRILL STRING DESIGN: A STUDY WITH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS 2014.
- [3] U.Mme, P.Skalle, CFD Calculations Of Cuttings Transport Through Drilling Annuli At Various Angles, International Journal Of Petroleum Science and Technology, 2012, NO. 2, 129-141
- [4] M. A. Kabir, I. K. Gamwo, Filter cake formation on the vertical well at high temperature and high pressure: Computational fluid dynamics modeling and simulations, Journal of Petroleum and Gas Engineering Vol. 2(7), 2012, 146-164
- [5] متین، مهدی، بهینه سازی سیال حفاری از نظر میزان هرزروی در یکی از میدانی نفتی ایران، ماهنامه ی اکتشاف و تولید، ۱۳۹۱، شماره ی ۹۸، ۶۰-۶۴
- [6] شجری، مصطفی، تحلیل کاربردی مدل های مختلف ارائه شده برای بهینه سازی عملیات حفاری در میدان نفتی A در جنوب غربی ایران، ماهنامه ی اکتشاف و تولید، ۱۳۹۰، شماره ی ۷۹، ۶۸-۷۵
- [7] Dr. Michael Wells, T. Marvel, C. Beuershausen, H. Christensen, a baker Hughes Company, Bit Balling Mitigation In PDC Bit Design, IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference And Exhibition, 2008, 114673.
- [8] F.A.R. Pereira, M.A.S. Barrozo, C.H. Ataide, CFD Predictions Of Drilling Fluid Velocity And Pressure Profiles In Laminar Helical Flow, School Of Chemical Engineering Federal University Of Uberlandia, 2007, NO 04, 587-595, USA 77267.
- [9] تدینی، مهدی، تأثیر نرخ نفوذ مته (ROP) در عملکرد دکل های حفاری، ماهنامه ی اکتشاف و تولید، ۱۳۸۸، شماره ی ۶۰، ۱۵-۱۷
- [10] Baker Hughes Inteq, Fluid Facts Engineering Handbook, Houston TX, 1999.
- [11] Baker Hughes Inteq, Drilling Engineering Workbook, Houston TX, 1995. USA 77073.