

سید المرسلین



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-حفاری

روشی جدید برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری، با در نظر گرفتن ECD و تمیز سازی چاه

نگارنده: مسعود نوعی

استاد راهنما:

دکتر مهرداد سلیمانی منفرد

دکتر محمد فضائلی زاده

اردیبهشت ۱۳۹۶



دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: نفت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم مسعود نوعی به شماره دانشجویی: ۹۳۱۷۹۰۴

تحت عنوان:

روش جدید برای بهینه سازی هیدرولیک حفاری، با در نظر گرفتن ECD و تمیز سازی چاه

در تاریخ ۱۳۹۶/۲/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ

مادر مہربانم کہ زندگی ام را دیون مہر و عطف آن می دانم

پدرم، کوبی استوار و حامی من در طول تمام زندگی ام

بہم سرم، نشانہ لطف الہی در زندگی ام، پناہ محبتی ام و امید بودم

دخوشی ہای ہمیشگی ام، برادران عزیزم

و بہ تمام آزاد مردانی کہ نیک می اندیشند و جز رضای الہی و سعادت جامعہ، ہدفی ندارند.

باشکر

به رسم ادب و قدرشناسی این جانب بر خود لازم می‌دانم که در این چند خط از اساتید ارجمندم؛

جناب آقای دکتر مهرداد سلیمانی متفرد که در کمال سعادت با حسن خلق و فروتنی، از پیچ‌کلی در این

عرصه بر من دریغ نمودند و زحمات راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ همچنین از استاد صبور و

باتقوا، جناب آقای دکتر محمد فضائی زاده، که زحمات راهنمایی این رساله را در حالی متقبل شدند که

بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید تشکر و قدردانی کنم.

در پایان از زحمات همسر عزیزم که سایه مهربانش سایه ساز زندگی ام است و در سایه همیاری و همدلی

او بود که به این منظور نائل شدم تشکر و قدردانی می‌کنم.

تعهد نامه

اینجانب مسعود نوعی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه روشی جدید برای بهینه سازی هیدرولیک حفاری، با در نظر گرفتن ECD و تمیز سازی چاه تحت راهنمایی دکتر مهرداد سلیمانی منفرد و دکتر محمد فضائلی زاده متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

چکیده

امروزه به منظور دستیابی به منابع جدیدتر نفت و گاز موجود در اعماق زمین و زیر اقیانوس‌ها، حفر چاه‌های انحرافی، افقی، چاه‌هایی با دسترسی توسعه یافته (ERW^1) و چند شاخه‌ای بسیار متداول است. با افزایش عمق و زاویه چاه‌ها، تمیز سازی چاه مشکل‌تر و همچنین پنجره ایمن گل نیز کوچک‌تر می‌شود. همین امر باعث بروز مشکلات فراوانی نظیر گیر لوله حفاری، بسته شدن چاه، هرز روی سیال و سایر مشکلات حفاری می‌شود که اگر این مشکلات به خوبی کنترل و مدیریت نشوند در نهایت منجر به از دست رفتن چاه و اتلاف هزینه می‌گردد. بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری بهترین ابزار برای پیشگیری و کنترل مشکلاتی از این دست می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده راجع به اهمیت توجه به تمیز سازی چاه و وزن معادل گل در حال چرخش (ECD^2) در حفاری مدرن، لزوم بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری با در نظر گرفتن تمیز سازی کامل چاه و وزن معادل گل در حال گردش (ECD) بیش از پیش احساس می‌شود.

در این روش بهینه‌سازی، به دنبال دبی و اندازه نازل‌هایی هستیم که ضمن در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی، تمیز سازی کامل چاه و پایداری دیواره چاه (قرارگیری وزن معادل گل حفاری در پنجره ایمن گل حفاری) را تضمین می‌کنند. برای انجام این فرآیند بهینه‌سازی، نیاز به محاسبه دقیق افت فشارها و محاسبات تمیز سازی چاه است که انتخاب نوع مدل رئولوژی بکار رفته نیز نقش کلیدی در دقت این محاسبات ایفا می‌کند.

در این پایان‌نامه ابتدا به منظور یافتن بهترین مدل رئولوژی برای پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی و محاسبه افت فشار سیال، هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری نظیر بینگهام پلاستیک^۳،

¹ Extended Reach Well

² Equivalent Circulation Density (ECD)

³ Bingham Plastic

پاورلاو^۱، API^۲، هرشل بالکلی^۳، کی سون^۴، رابرتسون-استیف^۵ و سیسکو^۶ مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مدل کی سون بهترین مدل برای محاسبات افت فشار است. سپس برای بررسی وضعیت تمیز سازی چاه، با ترکیب سه مدل تحلیلی-تجربی پراکندگی، اصلاح شده لارسن و روبیاندینی روشی یکپارچه برای تخمین حداقل دبی مورد نیاز حمل کننده‌ها ارائه می‌شود که نتایج حاکی از دقت بالای این روش نسبت به سایر مدل‌های تحلیلی-تجربی است. سپس برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری با در نظر گرفتن تمیز سازی کامل چاه و وزن معادل گل در حال گردش، از پنجره هیدرولیک فضای حلقوی و پنجره بهینه‌سازی هیدرولیک مته استفاده می‌شود. در نهایت این روش بهینه‌سازی و مدل‌های ارائه شده، برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری در چاه‌های یک جکت^۷ دریایی واقع در میدان پارس جنوبی استفاده می‌شود.

کلمات کلیدی:

بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری، تمیز سازی چاه، وزن معادل گل در حال گردش (ECD)، افت فشار، رئولوژی، کنده‌های حفاری، گل حفاری

¹ Power Law

² American Petroleum Institute

³ Herschel-Bulkley

⁴ Casson

⁵ Robertson-Stiff

⁶ Sisko

⁷ Jakcet

۱	فصل اول کلیات.....	
۲	مقدمه.....	۱-۱
۴	اهداف تحقیق.....	۲-۱
۵	ضرورت تحقیق.....	۳-۱
۶	مطالعه کارهای قبلی.....	۴-۱
۶	هیدرولیک.....	۱-۴-۱
۹	تمیز سازی چاه.....	۲-۴-۱
۱۳	بهینه سازی هیدرولیک حفاری.....	۳-۴-۱
۱۶	روش انجام تحقیق.....	۵-۱
۱۸	ساختار پایان نامه.....	۶-۱
۱۹	فصل دوم روش های بهینه سازی هیدرولیک حفاری، محاسبات افت فشار و تمیز سازی چاه.....	
۲۰	مقدمه.....	۱-۲
۲۰	مفهوم بهینه سازی هیدرولیک حفاری.....	۲-۲
۲۲	معیارهای بهینه سازی هیدرولیک حفاری.....	۳-۲
۲۳	معیار حداکثر قدرت هیدرولیکی مته.....	۱-۱-۳-۲
۲۵	معیار حداکثر نیروی ضربه ای جت.....	۲-۱-۳-۲
۲۷	معیار حداکثر سرعت جت سیال در نازل ها.....	۳-۱-۳-۲
۲۸	محدودیت های بهینه سازی هیدرولیک حفاری.....	۴-۲
۳۱	مکانیسم بهینه سازی هیدرولیک حفاری.....	۵-۲
۳۲	پنجره هیدرولیک فضای حلقوی.....	۱-۵-۲
۳۳	پنجره بهینه سازی هیدرولیک مته.....	۲-۵-۲
۴۲	رئولوژی.....	۶-۲

۴۵	دسته‌بندی گل‌های حفاری	۱-۶-۲
۴۷	اندازه‌گیری خصوصیات رئولوژیکی گل حفاری	۲-۶-۲
۴۸	مدل‌سازی رئولوژیکی	۳-۶-۲
۴۹	هیدرولیک حفاری	۷-۲
۴۹	رژیم‌های جریان	۱-۷-۲
۵۰	سیستم هیدرولیکی گردش گل	۲-۷-۲
۵۱	افت فشارهای اصطکاکی	۳-۷-۲
۵۳	افت فشار تجهیزات سطحی	۱-۳-۷-۲
۵۴	افت فشار در رشته حفاری و فضای حلقوی (جریان در لوله و فضای حلقوی)	۲-۳-۷-۲
۵۶	افت فشار در مته	۳-۳-۷-۲
۵۷	وزن معادل گل در حال گردش (ECD)	۴-۷-۲
۵۸	تمیز سازی چاه	۸-۲
۵۹	تمیز سازی ته چاه	۹-۲
۶۰	انتقال کننده‌ها به سطح	۱۰-۲
۶۰	مکانیسم انتقال کننده‌ها	۱-۱۰-۲
۶۵	تمیز سازی چاه در بخش‌های عمود و نزدیک به عمود	۲-۱۰-۲
۶۶	مدل پراکندگی	۱-۲-۱۰-۲
۶۹	تمیز سازی چاه در بخش‌های مایل و افقی چاه	۳-۱۰-۲
۷۲	مدل‌ها و روابط محاسبه حداقل دبی موردنیاز حمل کننده‌ها در چاه‌های مایل و افقی	۱-۳-۱۰-۲
۷۵	فصل سوم بررسی مدل‌های رئولوژیکی و ارائه روش پیشنهادی برای تمیز سازی چاه	
۷۶	مقدمه	۱-۳
۷۶	انتخاب بهترین مدل رئولوژی	۲-۳
۸۰	آنالیز داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی با مدل‌های رئولوژیکی و هیدرولیکی	۱-۲-۳
۸۱	داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده	۱-۱-۲-۳
۸۱	بررسی و تحلیل داده‌های میدانی و مدل‌های رئولوژی	۲-۱-۲-۳

۸۳.....	بررسی و تحلیل داده‌های میدانی و مدل‌های هیدرولیکی	۳-۱-۲-۳
۸۶.....	محاسبه حداقل دبی موردنیاز برای حمل کنده‌ها و تمیز سازی چاه به روش پیشنهادی	۳-۳
۹۵.....	فصل چهارم رفتار سنجی و بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری یک جکت دریایی	
۹۶.....	مقدمه	۱-۴
۹۷.....	معرفی جکت (چاه‌های) دریایی مورد مطالعه	۲-۴
۹۷.....	استخراج داده‌ها	۳-۴
۹۸.....	تحلیل و بررسی رفتار هیدرولیکی چاه‌ها و بهینه‌سازی آن	۴-۴
۹۸.....	حفره ۲۴ اینچ	۱-۴-۴
۱۰۹.....	حفره ۱۶ اینچ	۲-۴-۴
۱۱۵.....	حفره ۱۲/۲۵ اینچ	۳-۴-۴
۱۲۱.....	حفره ۸/۵ اینچ	۴-۴-۴
۱۲۵.....	فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادها	
۱۲۶.....	نتیجه‌گیری	۱-۵
۱۲۸.....	پیشنهادها	۲-۵
۱۳۱.....	پیوست‌ها	
۱۳۲.....	پیوست "الف"	
۱۳۵.....	منابع و مراجع	

- شکل ۱-۲ محدوده عملیاتی هیدرولیک حفاری ۲۱
- شکل ۲-۲ پنجره هیدرولیک فضای حلقوی چاه ۳۳
- شکل ۳-۲ پنجره بهینه‌سازی هیدرولیک مته ۳۴
- شکل ۴-۲ اثر دبی بر روی افت فشار و هیدرولیک مته ۳۶
- شکل ۵-۲ مقادیر توان هیدرولیکی مته، نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته و سرعت نازل‌های مته به‌عنوان تابعی از دبی؛ در یک فشار ثابت پمپ ۳۹
- شکل ۶-۲ تنش برشی در رژیم جریان آرام، برای یک سیال نیوتونی ۴۵
- شکل ۷-۲ انواع مختلف سیالات پرکاربرد در صنعت حفاری ۴۶
- شکل ۸-۲ دستگاه ویسکومتر FAAN 35A که برای اندازه‌گیری خصوصیت‌های رئولوژی استفاده می‌شود ۴۷
- شکل ۹-۲ سیستم گردش گل حفاری ۵۱
- شکل ۱۰-۲ پنجره ایمن گل حفاری ۵۸
- شکل ۱۱-۲ نیروهای وارد بر کنده‌های معلق در گل حفاری ۶۱
- شکل ۱۲-۲ شماتیکی از فرآیند انتقال کنده‌ها به سطح، در چاه‌های عمودی و مایل یا افقی ۶۳
- شکل ۱۳-۲ مکانیسم‌های مختلف حمل کنده‌ها ۶۴
- شکل ۱۴-۲ سرعت ته‌نشینی یا سرخوردگی کنده‌ها در چاه‌های عمودی و زاویه‌دار ۷۰
- شکل ۱-۳: نمودار نرخ برش - تنش برشی برای یک سیال غیر نیوتنی ۷۸
- شکل ۲-۳ پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی یک سیال غیر نیوتونی توسط هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری ۷۹
- شکل ۳-۳ داده‌های رئولوژی اندازه‌گیری شده بر روی نمودار نرخ برش - تنش برشی برای سیال حفاری ۸۲
- شکل ۴-۳ پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی سیال حفاری توسط هفت مدل‌های رئولوژی رایج ۸۲
- شکل ۵-۳ مقایسه حداقل دبی موردنیاز محاسبه‌شده توسط روش‌های اصلاح‌شده لارسن، روبیاندینی و مدل ملک‌زاده و محمدصالحی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) ۸۷
- شکل ۶-۳ مقایسه حداقل دبی موردنیاز محاسبه‌شده توسط روش‌های اصلاح‌شده لارسن، روبیاندینی، ملک‌زاده و محمدصالحی، روش پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰)؛ برای حالت بدون چرخش رشته حفاری ۹۱

- شکل ۳-۷ مقایسه حداقل دبی موردنیاز محاسبه‌شده توسط روش‌های اصلاح‌شده لارسن، روبیاندینی و روش پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰)؛ همراه با چرخش رشته حفاری. ۹۲
- شکل ۴-۱ حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌های محاسبه‌شده توسط روش پیش‌نهادی در طول اولین رانش مت‌در حفره ۲۴ اینچ چاه ۱، در صورت استفاده از آب دریا. ۱۰۱
- شکل ۴-۲ حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌های محاسبه‌شده توسط روش پیش‌نهادی در طول اولین رانش مت‌در حفره ۲۴ اینچ چاه ۱، در صورت استفاده از سیال جدید. ۱۰۳
- شکل ۴-۳ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۱ (آب دریا)؛ زاویه شیب چاه ۱/۵ الی ۱۵/۵ درجه است. ۱۰۵
- شکل ۴-۴ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۹ (آب دریا)؛ زاویه شیب چاه ۰ الی ۱۵ درجه است. ۱۰۵
- شکل ۴-۵ تأثیر استفاده از گل طراحی‌شده بر کاهش حداقل دبی حمل‌کننده‌ها در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۱/۵ الی ۱۵/۵ درجه است. ۱۰۶
- شکل ۴-۶ تأثیر استفاده از گل طراحی‌شده بر کاهش حداقل دبی حمل‌کننده‌ها در چاه ۹؛ زاویه شیب چاه ۰ الی ۱۵ درجه است. ۱۰۶
- شکل ۴-۷ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۶۰ درجه است. ۱۱۱
- شکل ۴-۸ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۲؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۴۵ درجه است. ۱۱۱
- شکل ۴-۹ تأثیر استفاده از گل طراحی‌شده بر کاهش حداقل دبی حمل‌کننده‌ها در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۶۰ درجه است. ۱۱۲
- شکل ۴-۱۰ تأثیر استفاده از گل طراحی‌شده بر کاهش حداقل دبی حمل‌کننده‌ها در چاه ۲؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۴۵ درجه است. ۱۱۲
- شکل ۴-۱۱ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است. ۱۱۷

شکل ۴-۱۲ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۹؛ زاویه شیب چاه ۴۵ درجه است. ۱۱۸.....

شکل ۴-۱۳ تأثیر استفاده از گل طراحی‌شده بر کاهش حداقل دبی حمل کنده‌ها در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است. ۱۱۸.....

شکل ۴-۱۴ تأثیر استفاده از گل طراحی‌شده بر کاهش حداقل دبی حمل کنده‌ها در چاه ۹؛ زاویه شیب چاه ۴۵ است. ۱۱۹
شکل ۴-۱۵ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است. ۱۲۲.....

شکل ۴-۱۶ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۷؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است. ۱۲۲.....

شکل ۴-۱۷ دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۸؛ زاویه شیب چاه ۴۵ درجه است. ۱۲۳.....

شکل الف-۱ شماتیکی از چاه و لوله جداری. ۱۳۲.....

جدول ۱-۲ اثر شاخص آشفستگی جریان روی درصد افت فشار اعمال شده به مته، به منظور بهینه‌سازی هیدرولیک مته. ۳۷	
جدول ۲-۲ قطر داخلی و طول تجهیزات سطحی..... ۵۳	
جدول ۳-۲ طول معادل لوله حفاری برای ترکیب‌های معمول تجهیزات سطحی..... ۵۳	
جدول ۱-۳ رئولوژی اندازه‌گیری شده یک نمونه گل توسط ویسکومتر در شرایط استاندارد..... ۷۷	
جدول ۲-۳ مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری به همراه درصد خطای آن‌ها. ۸۰	
جدول ۳-۳ دقت مدل‌های رئولوژی در پیش‌بینی خواص رئولوژیکی سیال حفاری..... ۸۳	
جدول ۴-۳ مقادیر فشار لوله ایستا اندازه‌گیری شده و محاسبه شده..... ۸۴	
جدول ۵-۳ درصد خطای مدل‌های هیدرولیکی در پیش‌بینی فشار لوله ایستا (افت فشار اصطکاکی)..... ۸۴	
جدول ۶-۳ دقت مدل‌های لارسن، روبیاندینی، ملک‌زاده و محمد صالحی و روش پیشنهادی در محاسبه حداقل دبی؛ برای حالت بدون چرخش رشته حفاری..... ۹۱	
جدول ۷-۳ دقت مدل‌های اصلاح شده لارسن، روبیاندینی و روش پیشنهادی؛ همراه با چرخش رشته حفاری..... ۹۳	
جدول ۱-۴ پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۲۴ اینچ چاه‌های ۱ و ۹..... ۱۰۸	
جدول ۲-۴ پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۱۶ اینچ چاه‌های ۱ و ۲..... ۱۱۴	
جدول ۳-۴ پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۱۲/۲۵ اینچ چاه‌های ۱ و ۹..... ۱۲۰	
جدول ۴-۴ پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۸/۵ اینچ چاه‌های ۱، ۷ و ۸..... ۱۲۴	
جدول الف-۱ ابعاد لوله جداری و چاه..... ۱۳۳	
جدول الف-۲ داده‌های رئولوژی اندازه‌گیری شده در شرایط استاندارد..... ۱۳۳	
جدول الف-۳ ابعاد رشته حفاری..... ۱۳۴	

۱ فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه با توسعه صنعت حفاری، روند رو به رشد حفر چاه‌های عمیق انحرافی، افقی، چند شاخه‌ای^۱ شتاب روزافزونی یافته است. افزایش عمق و هندسه پیچیده و زاویه‌دار چاه‌ها باعث سخت‌تر شدن حمل‌کنده‌ها^۲، تمیز سازی نامناسب چاه و همچنین باعث کوچک شدن پنجره ایمن گل حفاری^۳ (نزدیک شدن فشار منفذی^۴ به گرادیان شکست^۵ سازند) می‌شود [۱].

تمیز سازی نامناسب چاه و کوچک شدن پنجره ایمن گل حفاری باعث بروز مشکلاتی نظیر افزایش زمان و هزینه حفاری، کاهش نرخ نفوذ^۶ (ROP^۶)، گیر کردن لوله^۷، بسته شدن چاه^۸، اعمال خمش و کشش^۹ بیش از حد به رشته حفاری، سایش و خردگی مته، کاهش عمر مته، بروز مشکل در جدار گذاری^{۱۰} و سیمان کاری و نمودار گیری چاه^{۱۱}، افزایش وزن گل، افزایش وزن معادل گل در حال گردش^{۱۲} (ECD^{۱۲}) و هرز روی سیال حفاری، ورود سیال سازند به چاه، ریزش دیواره و عدم پایداری چاه می‌شود [۲]. اگر این مشکلات به خوبی کنترل نشوند می‌توانند به مشکلات بزرگ‌تری مانند خروج از مسیر چاه و یا در بدترین حالت، از دست دادن چاه منجر شوند. مطالعات انجام‌شده توسط شرکت آماکو^{۱۳} نیز نشان می‌دهد که ۷۰٪ زمان تلف‌شده (به دلیل اتفاقات برنامه‌ریزی نشده) مربوط به گیر کردن رشته حفاری در چاه است و حدود یک‌سوم از گیر لوله‌ها به دلیل حمل نامناسب کنده‌ها به سطح و تجمع آن‌ها در اطراف رشته حفاری صورت می‌گیرد. [۳]

¹ Multi Lateral

² Cuttings Transport

³ Safe Mud Window

⁴ Pore Pressure

⁵ Fracture Grdadiant

⁶ Rate of Penetration

⁷ Pipe Sticking

⁸ Hole Pack off

⁹ Torque and Drag

¹⁰ Casing Runing

¹¹ Well Logging

¹² Equivalent Circulation Density

¹³ AMACO

در حفاری دورانی^۱، گل حفاری وظایف و کاربردهای متنوعی دارد که مهم‌ترین وظیفه گل، حمل کنده‌های تولیدشده به سطح (تمیز سازی چاه^۲) و پایداری دیواره چاه است [۴]. کلید اصلی رسیدن به تمیز سازی مناسب چاه و پایدار نگه‌داشتن دیواره چاه، بهینه‌سازی خصوصیات سیال و پارامترهای هیدرولیکی می‌باشد که منجر به یک عملیات حفاری ایمن و کم‌هزینه می‌شود [۵].

بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری همانند بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مهندسی، شامل پارامترهای مستقلى است که برای به دست آوردن مقدار حداقل یا حداکثر یک یا چند پارامتر وابسته استفاده می‌شود که در این فرآیند فاکتور هزینه، ایمنی و ویژگی‌های فیزیکی سیستم نیز در نظر گرفته می‌شود. بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری توسط عوامل مختلفی نظیر حداکثر فشار و توان قابل تولید پمپ، حداکثر فشار قابل تحمل لوله ایستا^۳ و تجهیزات سطحی، حداکثر دبی قابل تولید پمپ، حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی چاه و حداکثر دبی مجاز با در نظر گرفتن گرادیان شکست سازند محدود می‌شود که این محدودیت‌ها مانع از اعمال و انتخاب مقادیر دلخواه برای پارامترهای هیدرولیکی (دبی و اندازه نازل‌ها) می‌شوند [۶].

به‌طور کلی در بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری به دنبال دبی و اندازه نازل‌های بهینه‌ای هستیم که بتواند با کاهش افت فشار اتلافی در سیستم گردش گل، طبق معیارهای بهینه‌سازی نظیر حداکثر توان هیدرولیکی^۴ مته، حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته^۵ و حداکثر سرعت نازل‌ها افت فشار و قدرت سیال در مته را به حداکثر مقدار خود برساند [۷]. در این فرآیند تمام محدودیت‌های عملیاتی نیز در نظر گرفته می‌شود. با اعمال این دبی و اندازه نازل بهینه، تمیز سازی اطراف مته و فضای حلقوی^۶ چاه

¹ Rotary Drilling

² Hole Cleaning

³ Stand Pipe Pressure

⁴ Hydraulic Horse Power

⁵ Jet Impact Force

⁶ Annulus

به‌طور هم‌زمان انجام می‌شود و به‌علاوه وزن معادل گل در حال گردش نیز در پنجره ایمن گل حفاری قرار خواهد گرفت.

برای انجام فرآیند بهینه‌سازی، نیاز به محاسبه دقیق افت فشارها و محاسبات تمیز سازی چاه در همه زاویه‌های چاه است که برای این منظور انتخاب نوع مدل رئولوژی به‌کاررفته نیز نقش کلیدی در دقت این محاسبات ایفا می‌کند. بهترین مدل رئولوژی مدلی خواهد بود که علاوه بر توصیف دقیق خصوصیات رئولوژیکی سیال، افت فشارها را نیز با دقت بالایی پیش‌بینی نماید.

۲-۱ اهداف تحقیق

هدف اصلی این پایان‌نامه ارائه روش یا استراتژی جدید برای یافتن پارامترهای هیدرولیکی نظیر دبی گل حفاری و اندازه نازل‌های بهینه‌ای است که با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی، تمیز سازی کامل چاه و پایداری دیواره چاه (قرارگیری وزن معادل گل حفاری در پنجره ایمن گل حفاری) را تضمین می‌کنند.

برای افزایش دقت محاسبات بهینه‌سازی و محاسبات هیدرولیکی و افت فشار، بهترین مدل رئولوژی از میان هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری که عبارت‌اند از بینگهام پلاستیک، پاورلاو، API، هر شل بالکلی، کی سون، رابرتسون-استیف و سیسکو انتخاب می‌شود که علاوه بر دقت در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی سیال دقت مناسبی برای پیش‌بینی خصوصیات هیدرولیکی (افت فشار) دارد.

در این پایان‌نامه برای محاسبه دقیق حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی چاه و حصول اطمینان از تمیز سازی کامل چاه و رساندن کنده‌ها به سطح، روش جدیدی پیشنهاد می‌شود و درنهایت فرآیند بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری ارائه‌شده در این پایان‌نامه برای چند چاه دریایی در جنوب ایران به کار می‌رود.

۳-۱ ضرورت تحقیق

با توجه به پیشرفت تکنولوژی حفاری و توانایی دسترسی به مخازن و لایه‌های نفت و گاز در اعماق زیاد، امروزه صنعت حفاری برای رسیدن به اعماق بیشتر از فناوری حفر چاه‌های انحرافی، باریک^۱ و ERW^۲ استفاده می‌کند. همچنین با توجه به کاهش منابع نفت و گاز در خشکی، امروزه شرکت‌های بزرگ نفتی به دنبال دستیابی به منابع نفت و گاز در اعماق آب‌های عمیق و مخصوصاً اقیانوس‌ها هستند و برای رسیدن به این منابع بایستی از فناوری حفاری آب‌های عمیق استفاده شود. یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در حفاری چاه‌هایی که در بالا ذکر شد، مشکل تمیز سازی چاه و کوچک بودن پنجره ایمن گل حفاری است [۸]. تمیز سازی نامناسب چاه و عدم توجه به پنجره ایمن گل حفاری سبب بروز مشکلات عدیده‌ای می‌شود که اگر به‌درستی کنترل و مدیریت نشوند می‌توانند، موجب از دست رفتن کامل چاه شوند.

بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری شامل تغییر و انتخاب مقادیر بهینه پارامترهای هیدرولیکی قابل کنترل نظیر دبی جریان، اندازه نازل‌های مته و در بعضی مواقع خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری برای رسیدن به تمیز سازی کامل چاه، پایداری دیواره چاه و تعادل میان افت فشارهای کلی و خصوصیات هیدرولیکی مته است.

مطالعات اولیه راجع به بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری، اهمیت بسیار کمی برای آنالیز تمیز سازی چاه و پایداری دیواره چاه قائل می‌شدند و اغلب بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری را تنها برای هیدرولیک مته در نظر می‌گرفتند. درحالی‌که مطالعات اخیر نشان می‌دهد که بهینه‌سازی هیدرولیک مته تنها زمانی صادق است که محدودیت‌های دبی که توسط تمیز سازی چاه اعمال می‌شود و همچنین محدودیت‌های پایداری دیواره چاه یا وزن معادل گل در حال گردش در نظر گرفته شوند [۶]. بعلاوه مطالعات اخیر نشان می‌دهند که برای چاه‌های انحرافی، افقی، باریک، دریایی و ERW، تمیز سازی

¹ Slime Hole

² Extended Reach Well

فضای حلقوی چاه و رساندن کامل کنده‌ها به سطح و همچنین قرار گرفتن وزن معادل گل حفاری در پنجره ایمن گل حفاری بسیار مهم‌تر از تمیز سازی و بهینه‌سازی هیدرولیک مته حفاری است [۹].

با توجه به مطالب گفته‌شده، ارائه روش و استراتژی برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری با توجه ویژه به تمیز سازی کل چاه و وزن معادل گل در حال گردش و همچنین در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی امری ضروری است. در واقع در این فرآیند بهینه‌سازی می‌بایست علاوه بر تمیز سازی مته، اطراف مته و بخش^۱ در حال حفاری تمیز سازی کل چاه و حمل و رساندن کنده‌ها تا سطح دکل مورد توجه قرار گیرد.

برای افزایش دقت بهینه‌سازی، اولاً به دلیل وجود مدل‌های مختلف رئولوژی و اهمیت انتخاب نوع مدل رئولوژی در انجام محاسبات، بررسی دقت مدل‌های رایج در صنعت حفاری برای پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی سیال و مقدار افت فشار و همچنین ارائه روشی برای انتخاب بهترین مدل رئولوژی بحثی حساس و کلیدی می‌باشد. ثانیاً با توجه به کمبود مدل تجربی-تحلیلی دقیق و جامع برای محاسبه حداقل دبی موردنیاز تمیز سازی چاه در کل چاه، ضرورت ارائه مدلی یکپارچه که بتواند حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها و تمیز سازی چاه را با دقت بالایی برای زاویه ۰ تا ۹۰ درجه محاسبه کند بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

۴-۱ مطالعه کارهای قبلی

۱-۴-۱ هیدرولیک

سالم و همکاران (۱۳۸۴) خواص رئولوژیکی گل حفاری را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور از مدل‌های رئولوژی نظیر مدل بینگهام پلاستیک، کی سون و هرشل بالکلی استفاده شد. نتایج این

¹ Section

پژوهش نشان داد که مدل هرشل بالکلی بیشترین دقت و بینگهام پلاستیک کمترین دقت را در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی سیال دارند [۱۰].

پورشیرانی و همکاران (۱۳۸۷) مدل‌های مختلفی نظیر مدل بینگهام پلاستیک، پاورلاو، هرشل بالکلی و یونیفاید^۱ برای سیال حفاری گل سنگین مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه داده‌های تجربی و نتایج حاصل از مدل‌های ویسکوزیته نشان داد که مدل هرشل بالکلی و مدل یونیفاید داده‌های تجربی را به خوبی پیش‌بینی می‌نمایند و این نتیجه با یافته‌های سایر پژوهشگران همخوانی مناسبی دارد [۱۱].

او کافر و اورس^۲ (۱۹۹۲) مقایسه‌ای آزمایشگاهی میان سه مدل رئولوژی بینگهام پلاستیک، پاورلاو و رابرتسون-استیف انجام دادند. آن‌ها از دو نوع سیال حفاری پایه آبی استفاده کردند و دریافتند که مدل رابرتسون-استیف از میان این سه مدل رئولوژی، افت فشار اصطکاکی را با دقت بیشتری پیش‌بینی می‌کند [۱۲].

ماگلیونه و روتتی^۶ (۱۹۹۶) توسط داده‌های میدانی حاصل از سه تست چرخش سیال^۷ حفاری، روشی برای تعیین ثابت‌های مدل هرشل بالکلی ارائه کردند. آن‌ها مقدار فشار لوله ایستا^۹ را برای سه دبی جریان در چاهی واقع در ایتالیا اندازه‌گیری کردند و دریافتند که مقدار فشار لوله ایستا محاسبه‌شده توسط مدل بینگهام پلاستیک و پاورلاو به ترتیب بیشتر و کمتر از مقدار واقعی است و مقدار محاسبه‌شده مدل هرشل بالکلی بین دو مقدار مدل بینگهام پلاستیک و پاورلاو قرار دارد [۱۳].

سیمون^{۱۰} (۲۰۰۴) برای بررسی تأثیر انتخاب مدل رئولوژی بر دقت پیش‌بینی افت فشار و وزن معادل گل در حال گردش در چاه‌های باریک، از دو سیال کاملاً متفاوت استفاده نمود و نتایج تست‌های

¹ Unified

² Okafor and Evers

⁶ Maglione and Robotti

⁷ Circulaiton Test

⁹ Stand Pipe

¹⁰ Simon

انجام شده را با مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های بینگهام پلاستیک، پاورلاو و هر شل بالکلی مقایسه کرد. این نتایج نشان می‌دادند که اولاً مدل هر شل بالکلی دقیق‌ترین مدل در توصیف خصوصیات رئولوژیکی هر دو سیال است. دوماً مدل بینگهام پلاستیک و پاورلاو به ترتیب افت فشارها را بیشتر و کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهند. همچنین آن‌ها به اهمیت انتخاب نوع مدل رئولوژی در پیش‌بینی افت فشار و بررسی هیدرولیک چاه‌های باریک اشاره نمودند [۱۴].

اچوا^۱ (۲۰۰۶) به بررسی انتخاب بهترین مدل رئولوژی و تأثیر نوع مدل رئولوژی در تخمین افت فشارهای اصطکاکی برای یک سیال حفاری پایه روغنی^۲ پرداخت. به این منظور، وی مدل‌های رئولوژی شامل بینگهام پلاستیک، پاورلاو، API، هرشل بالکلی، یونیفاید، رابرتسون-استیف و کی سون را مورد بررسی قرارداد. نتایج بررسی دقت این هفت مدل رئولوژی بر روی سیال مورد آزمایش نشان می‌داد که ترتیب این مدل‌ها از دقیق‌ترین به کم‌دقت‌ترین به این صورت می‌باشد: مدل API، هر شل بالکلی، رابرتسون-استیف، یونیفاید، کی سون، پاورلاو و بینگهام پلاستیک. همچنین نتایج نشان می‌داد که مدل کی سون قابل‌اعتمادترین و مناسب‌ترین مدل رئولوژی برای پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی و انجام محاسبات هیدرولیکی برای سیالات پایه روغنی است [۱۵].

چادوهاری و همکاران^۳ (۲۰۰۹) با استفاده از داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده توسط ماگلیونه و روتی (۱۹۹۶) دقت مدل‌های رئولوژی بینگهام پلاستیک، پاورلاو و هرشل بالکلی در پیش‌بینی افت فشار (فشار لوله ایستا) را بررسی نمود. نتایج بررسی‌ها نشان می‌داد که مدل بینگهام پلاستیک علی‌رغم دقت پایین در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی سیال، افت فشار اصطکاکی یا فشار لوله ایستا را با دقت بیشتری نسبت به دو مدل دیگر پیش‌بینی می‌کند [۱۶].

¹ Ochoa

² Oil Based

⁶ Chowdhury

اکولی^۱ (۲۰۱۵) تأثیر انتخاب نوع مدل رئولوژی در پیش‌بینی مقدار فشار لوله ایستا و وزن معادل گل در حال گردش را در یکی از چاه‌های نیجریه بررسی نمود. در این مطالعات از چهار مدل بینگهام پلاستیک، پاورلاو، هرشل بالکلی و رابرتسون-استیف استفاده شده است. بعد از انجام بررسی‌ها، نتایج نشان می‌داد که مدل بینگهام پلاستیک مقدار فشار لوله ایستا را بیشتر از مقدار واقعی و وزن معادل گل در حال گردش را بسیار نزدیک به مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. مدل پاورلاو فشار لوله ایستا را با دقت پایین اما مقادیر وزن معادل گل در حال گردش را نزدیک به مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. مدل رابرتسون-استیف و هرشل بالکلی دقیق‌ترین مدل‌ها برای پیش‌بینی فشار لوله ایستا و مدل بینگهام پلاستیک دقیق‌ترین مدل در پیش‌بینی وزن معادل گل در حال گردش می‌باشد [۱۷].

سادیگو و بلاینه^۲ (۲۰۱۶) نیز با استفاده از داده‌های میدانی ماگلیونه و روتی (۱۹۹۶) دقت مدل‌های رئولوژی بینگهام پلاستیک، پاورلاو، هرشل بالکلی، یونیفاید و رابرتسون-استیف را در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی و مقدار افت فشار بررسی نمودند. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بهترین و دقیق‌ترین مدل‌ها برای توصیف خصوصیات رئولوژیکی به ترتیب شامل: رابرتسون-استیف، هرشل بالکلی، یونیفاید، پاورلاو و بینگهام پلاستیک می‌شود و همچنین بهترین و دقیق‌ترین مدل‌ها در پیش‌بینی افت فشار نیز به ترتیب شامل: رابرتسون-استیف، پاورلاو، یونیفاید، بینگهام پلاستیک و هرشل بالکلی می‌باشند [۱۸].

۱-۴-۲ تمیز سازی چاه

شروع مطالعات حمل‌کننده‌ها و تمیز سازی چاه به دهه ۱۹۴۰ میلادی برمی‌گردد. مشکلات حمل‌کننده‌ها ابتدا با محاسبه سرعت سقوط^۳ کنده‌های حفاری در سیال برای چاه‌های عمودی مورد بررسی قرار گرفت. اولین مطالعات راجع به حمل‌کننده‌ها و تمیز سازی چاه‌های مایل و افقی در دهه ۱۹۷۰ و

^۱ Okoli

^۲ Sadigov and Belayneh

^۳ Settling Velocity

اوایل ۱۹۸۰ آغاز شد. به دلیل فقدان علم کافی راجع به مکانیسم و الگوی انتقال کنده‌ها در چاه‌های افقی و مایل، بیشتر این مطالعات به صورت آزمایشگاهی بوده است. در اواخر دهه ۱۹۸۰، زمانی که الگوهای حمل کنده‌ها بیشتر شناخته شد و فاکتورهای مؤثر بر تمیز سازی چاه مشخص گردید؛ مدل‌های مکانیکی و سایر مدل‌ها برای بررسی و مدل‌سازی فرآیند تمیز سازی چاه توسعه یافتند [۱۹].

چین^۱ (۱۹۷۲) دو رابط تجربی برای محاسبه سرعت ته‌نشینی کنده‌ها در عملیات حفاری چرخشی چاه‌های عمودی ارائه کرد؛ یکی برای محاسبه سرعت ته‌نشینی کنده‌ها در هم‌همی رژیم‌ها و دیگری رابطه‌ای ساده‌شده برای رژیم آشفته. همچنین او برای ترکیبات بنتونیت^۲ و آب، از گرانروی پلاستیک به عنوان گرانروی ظاهری استفاده شده کرد و برای سیالات حفاری پلیمری، رابطه‌ای جدید برای گرانروی ظاهری ارائه نمود [۲۰].

مور^۳ (۱۹۷۴) برای محاسبه سرعت ته‌نشینی کنده‌ها در چاه‌های عمودی، گرانروی ظاهری سیال را توسط معادلات افت فشار سیال نیوتونی و پاورلاو در فضای حلقوی چاه به دست آورد. سپس از گرانروی ظاهری به دست آمده، برای محاسبه عدد رینولدز^۴ استفاده نمود و در نهایت با توجه به عدد رینولدز و نوع رژیم جریان، سه معادله برای محاسبه سرعت سقوط کنده‌ها در سه رژیم آرام^۵، گذرا^۶ و آشفته^۷ ارائه نمود [۲۱].

لارسن^۹ (۱۹۹۰) مدلی برای انتخاب هیدرولیک مناسب جهت تمیز سازی چاه‌های با شیب زیاد (۵۵ درجه تا ۹۰ درجه) ارائه کرد. بر اساس مطالعات آزمایشگاهی بسیار گسترده بر روی انتقال کنده‌ها در یک چرخه جریان ۵ فوتی، تمام متغیرهایی که تمیز سازی چاه را کنترل می‌کنند تعیین شد و سپس

¹ Chien

² Bentonite

³ Moor

⁵ Reynolds

⁶ Laminar

⁷ Transition

⁸ Turbulent

⁹ Larsen

بر اساس آن‌ها مدل‌های تجربی برای پیش‌بینی حداقل سرعت یا دبی موردنیاز، سرعت متوسط حمل کنده‌ها، ارتفاع بسترهای کنده^۱ و غلظت کنده‌ها^۲ ارائه شد [۲۲].

جالوکار^۳ (۱۹۹۳) مطالعه‌ای در مورد اثر اندازه چاه بر روی سرعت‌های بحرانی و زیربحرانی حمل کنده‌ها، آغاز نمود. او برای انجام مطالعات آزمایشگاهی خود از یک شبیه‌سازی بزرگ‌مقیاس چاه با قطر ۸ اینچ و طول ۱۰۰ فوت استفاده کرد. نتایج نشان داد که سرعت بحرانی حمل کنده‌ها با تغییر اندازه قطر چاه و لوله حفاری، تغییر می‌کند و این اثر برای زاویه‌های بین ۴۵ تا ۹۰ درجه بسیار قابل‌ملاحظه است؛ درحالی‌که برای زاویه‌های کمتر از ۴۵ درجه این اثر قابل‌چشم‌پوشی است. برای جریان‌های زیربحرانی^۴، اثر تغییر اندازه چاه بر روی ارتفاع بسترهای کنده ناچیز است. در نهایت ضرایب تصحیحی برای اثر قطر هیدرولیکی، زاویه شیب چاه و رئولوژی سیال ارائه شد [۲۳].

باسل^۵ (۱۹۹۵) با انجام مطالعات آزمایشگاهی، اثر چرخش رشته حفاری بر روی سرعت بحرانی حمل کنده‌ها و بهبود تمیز سازی چاه را بررسی نمود. در طی این آزمایش‌ها از یک شبیه‌ساز چاه با قطر ۸ اینچ و طول ۱۰۰ فوت و لوله حفاری با قطر ۱۴ اینچ استفاده نمود. به‌طورکلی حدود ۵۸۰ تست انجام شد که نتایج آن‌ها نشان می‌داد که چرخش رشته حفاری اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر بهبود تمیز سازی چاه در حفاری چاه‌های مایل دارد. میزان بهبود تمیز سازی چاه و حمل کنده‌ها (نتیجه چرخش رشته حفاری) تابعی از ترکیب و رئولوژی گل، اندازه کنده‌ها، دبی گل و رفتار دینامیکی رشته حفاری است. اثر چرخش رشته حفاری با انجام محاسبات درصد بهبود حمل کنده‌ها به خاطر چرخش رشته حفاری برای کنده‌های ۰/۲۵ اینچی و گراولهای رودخانه‌ای انجام شد. این محاسبات توسط تکنیک انطباق نمودار^۶ و برای به دست آوردن معادله اثر چرخش رشته حفاری صورت گرفت [۲۴].

¹ Cuttings Bed

² Cuttings Concentration

³ Jalukar

⁴ Sub Critical Flow Velocity(SCFV)

⁵ Bassal

⁶ Curve Fitting

روبیاندینی^۱ (۱۹۹۹) با اصلاح مدل سرعت سقوط ذرات در سیال غیر نیوتونی که توسط مور (۱۹۷۴) برای چاه عمودی توسعه یافته بود، توانست به رابطه‌ای برای محاسبه سرعت سقوط کنده‌ها برای سایر زوایای چاه و حالت‌های مایل و افقی چاه دست یابد. سپس با استفاده از روابط ارائه شده توسط لارسن (۱۹۹۰) و داده‌های آزمایشگاهی پدن (۱۹۹۰)^۲ توانست ضرایب تصحیح برای زاویه چاه، سرعت چرخش لوله حفاری و وزن گل به دست آورد. روابط حاصل از این تحقیقات، حداقل سرعت و دبی لازم جهت انتقال کنده‌ها را برای زاویه شیب چاه ۰ تا ۹۰ درجه محاسبه می‌کند [۴].

ازبایوگلو^۳ و همکاران (۲۰۱۰) آزمایش‌هایی را توسط یک چرخه جریان^۴ 2^*4 اینچی همراه با آب و در چندین زاویه بین ۵۰ تا ۹۰ درجه انجام دادند. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده، آن‌ها رابطه‌ای برای پیش‌بینی سرعت بحرانی ته‌نشینی کنده‌ها و نسبت سطح بستر کنده‌ها به سطح فضای حلقوی به دست آوردند [۲۵].

ملکزاده و محمدصالحی^۵ (۲۰۱۲) با ترکیب دو مدل مور و لارسن و انجام رگرسیون غیرخطی توانست به مدلی دست یابد که حداقل سرعت یا دبی موردنیاز برای حمل کنده‌ها و تمیز سازی چاه برای زاویه ۰ تا ۹۰ درجه را محاسبه نماید. آن‌ها همچنین برای بالا بردن دقت مدل، از داده‌های آزمایشگاهی لارسن در زاویه‌های ۳۰ و ۴۰ درجه نیز استفاده نمودند [۲۶].

ژانگ^۶ (۲۰۱۵) حمل کنده‌ها و تمیز سازی چاه در چاه‌های انحرافی و مایل با زاویه متوسط ۴۵ تا ۶۵ درجه را به صورت آزمایشگاهی و مدل سازی ریاضی بررسی نمود. او برای مطالعات آزمایشگاهی، از چرخه جریان بزرگ مقیاس به منظور بررسی اثرات پارامترهای حفاری بر تمیز سازی چاه مایل و انحرافی استفاده کرد. او در این آزمایش‌ها چهار الگوی جریانی برای کنده‌های در حال حرکت یافت که

¹ Rubiandini

² Peden

³ Ozbayoglu

⁴ Flow Loop

⁵ Malekzadeh

⁶ Zhang

عبارت‌اند از: جریان بستر ثابت^۱، جریان بستر موج‌دار^۲، جریان بسته‌های تپه مانند^۳ و جریان بخش شده کنده‌ها^۴ در سیال. همچنین اثرات نوع سیال، زاویه شیب چاه نرخ نفوذ دبی گل، چرخش لوله حفاری و دما بر روی غلظت کنده‌ها و گرادیان فشار در فضای حلقوی بررسی شد. در این پروژه، برای مدل‌سازی فرآیند تمیز سازی چاه به سه قسمت تقسیم شد و برای قسمت‌های عمودی و نزدیک به عمود (زاویه ۰ تا ۳۰ درجه) از مدل پراکندگی^۵، برای قسمت‌های میانی (زاویه ۳۵ تا ۶۰ درجه) از مدل مقطعی^۶ و برای قسمت‌های زاویه‌دار و افقی (زاویه ۶۰ تا ۹۰ درجه) از مدل سه لایه‌ای^۷ استفاده شد [۱۹].

پترسون^۸ (۲۰۱۵) برای تخمین سرعت بحرانی حمل کنده‌ها از یک تقریب ساده هندسی استفاده نمود. در واقع با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) و تغییر قطر داخلی فضای حلقوی چاه، یک مدل هندسی ارائه شد که می‌توان بجای روابط تجربی از آن استفاده نمود. تمام معادلات ارائه‌شده توسط پترسون (۲۰۱۵) توسط داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) اعتبارسنجی شده است [۲۷].

۳-۴-۱ بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری

کندال و گوینز^۹ (۱۹۶۰) روشی برای به دست آوردن حداکثر توان هیدرولیکی مته، نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای و سرعت جت مته در هر عمق حفاری ارائه کردند. در این روش محدودیت‌های دکل^{۱۰} و حداقل دبی گل حفاری برای رسیدن به تمیز سازی مناسب چاه در نظر گرفته شده است [۲۸].

¹ Constant Bed Flow

² Wavy Bed Flow

³ Packed Dunes Flow

⁴ Dispersed

⁵ Dispersed Model

⁶ Segment

⁷ Three Layer

⁸ Petersen

⁹ Kendall and Goins

¹⁰ Rig

رنдал^۱ (۱۹۷۵) روشی برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری ارائه کرد که در صورت نبود امکان محاسبات دقیق و پیشرفته، از راهبردها^۲ و فرآیندهایی خاص استفاده شود. این روش دارای فرضیات و مقایسه‌هایی است که همگی توسط آزمایش‌های میدانی به‌دست آمده‌اند. به‌عنوان مثال: استفاده از دبی ۳۰ تا ۵۰ گالن بر هر اینچ قطر مته، توان هیدرولیکی مته بین ۲/۵ تا ۵ اسب بخار در هر اینچ مربع^۳ و اعمال ۵۰ تا ۶۵ درصد از فشار پمپ به مته جهت حداکثر کردن تمیز سازی مته. بیشتر مهندسان در طی چندین سال از این راهبردها استفاده می‌کردند [۲۹].

میسکا و اسکاله^۴ (۱۹۸۱) بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری را به دو قسمت تقسیم کردند: روش‌هایی که بر اساس شرایط موردنیاز برای تمیز سازی ته چاه (توان هیدرولیکی مته) است و روش‌هایی که بر اساس حداکثر کردن یکی از معیارهای بهینه‌سازی (توان هیدرولیکی، نیروی ضربه‌ای، سرعت جت و عدد رینولدز) پایه‌گذاری شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که در بهینه‌سازی به روش دوم، دبی بهینه زمانی به دست می‌آید که حداکثر فشار یا توان هیدرولیکی پمپ به سیستم هیدرولیکی اعمال می‌شود. هرچند استفاده از حداکثر توان هیدرولیکی پمپ در حین عملیات، اغلب موجب بروز مشکلات و خرابی پمپ‌ها می‌شود. به همین دلیل پمپ‌های گل اغلب در مقداری پایین‌تر از حداکثر توان تولیدی بکار می‌روند [۳۰].

میدلا و همکاران^۵ (۱۹۹۶) یک الگوریتم بهینه‌سازی بر اساس عدد رینولدز جریان عبوری از نازل‌ها مته ارائه کردند و نتیجه گرفتند که با کاهش گرانش سیال و در نتیجه افزایش عدد رینولدز، نرخ نفوذ مته و سرعت حفاری افزایش می‌یابد [۳۱].

¹ Randal

² Guid lines

³ Horse power per Squire Inch(HSI)

⁴ Miska and Skalle

⁵ Maidla et.al.

زامورا و روی^۱ (۲۰۰۷) روشی برای بهینه‌سازی هیدرولیک مته با در نظر گرفتن تمام محدودیت‌های حفاری نظیر محدودیت‌های پمپ، تجهیزات سطحی و تمیز سازی چاه ارائه نمودند. در واقع آن‌ها با تغییر خواص رئولوژیکی سیال حفاری نظیر گرانیروی پلاستیک^۲ و نقطه تسلیم^۳، به دنبال دبی و اندازه نازل‌های بهینه‌ای بودند که ضمن در نظر گرفتن قدرت پمپ، حداقل و حداکثر دبی‌های مجاز؛ بتواند قدرت سیال را در مته برای معیارهای حداکثر توان هیدرولیکی مته، حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته و حداکثر سرعت جت نازل‌های مته به حداکثر برساند. آن‌ها در این پروژه اثر دما و فشار بر روی خصوصیات رئولوژیکی سیال را نیز در نظر گرفتند و به‌وسیله روش سعی و خطا توانستند خصوصیات رئولوژیکی بهینه را برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری به دست آورند. آن‌ها روش بهینه‌سازی خود را بر روی چهار چاه دریایی در خلیج مکزیک، دریای شمال و نیجریه آزمایش کردند [۳۲].

آدنوی^۴ (۲۰۱۰) روش‌های جدیدی برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری در چاه‌های انحرافی، افقی و به‌ویژه دریایی ارائه نمود. در چاه‌های دریایی و افقی و با زاویه انحراف بالا، حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی مهم‌ترین پارامتر حفاری است؛ چراکه بیشترین مشکلات حفاری در این چاه‌ها به دلیل نبود تمیز سازی مناسب چاه است؛ بنابراین تمیز سازی چاه نسبت به بهینه‌سازی هیدرولیک مته و تمیز سازی ته چاهی ارجح است. بر همین اساس با انجام محاسبات فیزیکی نه‌چندان پیچیده، سه معیار بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری جدید (با توجه ویژه به بحث تمیز سازی چاه) ارائه شد [۹].

محمدصالحی و ملک‌زاده^۵ (۲۰۱۲) بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری را برای کاهش مشکلات ناشی از تمیز سازی نامناسب چاه در تمام زاویه‌ها ۰ تا ۹۰ درجه انجام دادند. آن‌ها دریافتند که با انتخاب مناسب گرانیروی و دبی سیال حفاری می‌توان مشکلات حفاری ناشی از تمیز سازی نامناسب چاه نظیر

¹ Zamora and Roy

² Plastic Viscosity

³ Yield Point

⁴ Adnoy

⁵ MohammadSalehi and Malekzade

گشتاور اضافی، گیر لوله حفاری و کاهش نرخ نفوذ را تا حد زیادی کاهش داد که منجر به کاهش قابل توجه هزینه‌ها خواهد شد [۳۳].

چوان و همکاران^۱ (۲۰۱۵) توانستند با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی تجمع مورچگان^۲ بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری را به‌منظور بهبود تمیز سازی چاه و حداقل کردن ارتفاع بستر کنده‌های حفاری در یک چاه افقی انجام دهند که در این مطالعه تمام محدودیت‌های پمپ و دکل حفاری نیز در نظر گرفته شده است. نتایج این مطالعات نشان داد که برای بهبود وضعیت تمیز سازی چاه و کاهش ارتفاع بستر کنده‌های حفاری، افزایش دبی گل بهترین و مؤثرترین راه‌حل می‌باشد. همچنین کاهش ضریب استحکام^۳ سیال (K) و افزایش سطح مقطع جریان نازل‌های مته (TFA^۴) باعث کاهش افت فشار کلی و افزایش ظرفیت سیستم هیدرولیک حفاری برای اعمال دبی‌های بالاتر می‌شود [۳۴].

۵-۱ روش انجام تحقیق

برای افزایش دقت محاسبات هیدرولیکی، دقت هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری شامل مدل بینگهام پلاستیک، پاورلاو، API RP13D، هرشل بالکلی، کی سون، رابرتسون-استیف و سیسکو در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژی سیال حفاری از طریق انطباق نمودار مورد بررسی قرار می‌گیرد و درصد خطای هر یک از مدل‌ها مشخص می‌شود. سپس برای محاسبات افت فشار، از یک روش عددی استفاده می‌شود و برای یک تست میدانی انجام‌شده توسط ماگلیونه و روتی (۱۹۹۶)، دقت مدل‌های رئولوژی در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی و مقدار افت فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس مدلی که کمترین خطا را داشته باشد به‌عنوان مدل رئولوژی بهینه انتخاب می‌شود.

¹ Chuan et.al.

² Ant-Colony Algorithm

³ Consistency Index

⁴ Total Flow Area

برای بررسی وضعیت تمیز سازی چاه و محاسبه حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها برای زاویه‌های ۰ تا ۹۰ درجه چاه، ابتدا تمام مدل‌های موجود همراه با نقاط ضعف و قوت آن‌ها بررسی می‌شوند و درنهایت با توجه به مکانیسم‌های انتقال کنده‌ها در زاویه‌های مختلف چاه و نقاط ضعف و قوت هر یک از مدل‌ها با ترکیب سه مدل پراکندگی، اصلاح‌شده لارسن و روبیاندینی استراتژی یا روشی جدید برای محاسبه دقیق حداقل دبی موردنیاز حمل کنده و تمیز سازی چاه در همه زاویه‌های چاه (۰ تا ۹۰ درجه) ارائه می‌شود.

برای بهتر نشان دادن مکانیسم بهینه‌سازی از دو پنجره عملیاتی تحت عنوان پنجره هیدرولیک فضای حلقوی^۱ برای نشان دادن محدودیت‌های عملیاتی و وزن معادل گل در حال گردش، جهت بررسی پایداری دیواره چاه و پنجره بهینه‌سازی هیدرولیک مت^۲ برای نشان دادن محدودیت‌های عملیاتی و بهینه‌سازی هیدرولیک مت^۲ استفاده می‌شود. با ارتباط این دو پنجره عملیاتی و انجام بهینه‌سازی، می‌توان به دبی و اندازه نازل بهینه‌ای دست‌یافت که علاوه بر تمیز سازی کامل چاه (ته چاه و فضای حلقوی) پایداری دیواره چاه را نیز تضمین می‌کنند. در طی فرآیند بهینه‌سازی، برای مشخص کردن حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها و حصول اطمینان از انتقال کامل کنده‌ها به سطح می‌بایست حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها علاوه بر بخش در حال حفاری در همه بخش‌های بالاتر از این بخش نیز محاسبه و در نظر گرفته شود که این مهم توسط روش پیشنهادی محاسبه حداقل دبی موردنیاز انجام می‌شود.

درنهایت برای پیاده‌سازی روش بهینه‌سازی از داده‌ها حفاری یک جکت دریایی واقع در آب‌های جنوب ایران استفاده می‌شود.

¹ Annular Hydraulics Window

² Bit Hydraulics Optimization Window

۶-۱ ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر شامل پنج فصل است که در ذیل به اختصار توضیح داده می شود:

فصل اول شامل کلیات طرح اعم از مقدمه، اهداف تحقیق، ضرورت انجام تحقیق، روش انجام تحقیق و مروری بر مطالعات پیشین است.

فصل دوم شامل مباحث بهینه سازی هیدرولیک حفاری ارائه روش بهینه سازی بکار رفته در این پایان نامه است. ادامه این فصل، به مباحث رئولوژی سیال حفاری، هیدرولیک حفاری و محاسبات افت فشار اصطکاکی و وزن معادل گل در حال گردش (ECD) پرداخته می شود و در نهایت نیز مفاهیم و مکانیسم های حمل کننده ها و تمیز سازی چاه و مدل های محاسبه حداقل دبی مورد نیاز حمل کننده ها و تمیز سازی چاه ارائه می شوند.

فصل سوم شامل انتخاب بهترین مدل رئولوژی از میان هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری و نیز ارائه روش پیشنهادی برای محاسبه حداقل دبی مورد نیاز حمل کننده ها و تمیز سازی چاه است. فصل چهارم شامل مطالعه موردی یک جکت دریایی واقع در آب های جنوب ایران می باشد که عملیات آنالیز و بهینه سازی هیدرولیک حفاری برای چهار بخش چاهها انجام می شود.

فصل پنجم شامل نتیجه گیری و پیشنهادها خواهد بود.

۲ فصل دوم

روش های بهینه سازی هیدرولیک حفاری، محاسبات

افت فشار و تمیز سازی چاه

۱-۲ مقدمه

هیدرولیک مهم ترین فاکتور در عملیات حفاری می باشد. نرخ نفوذ مته و سرعت حفاری را می توان توسط روش های پیشرفته بهینه سازی هیدرولیک افزایش داد که در نهایت منجر به کاهش هزینه های حفاری می گردد. هدف بهینه سازی هیدرولیک حفاری، استفاده از حداکثر توان پمپ ها برای کمک کردن به مته است تا مته بتواند با حداکثر راندمان حفاری کند؛ این مهم با کاهش انرژی تلف شده در سیستم گردش سیال حفاری و استفاده از این انرژی ذخیره شده برای بهبود عملکرد هیدرولیکی مته انجام خواهد شد [۳۵].

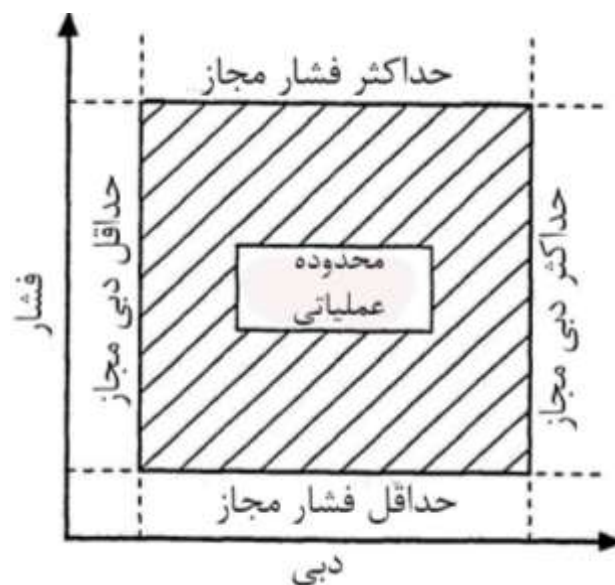
۲-۲ مفهوم بهینه سازی هیدرولیک حفاری

بهینه سازی هیدرولیک حفاری همانند بسیاری از مسائل بهینه سازی مهندسی، شامل پارامترهای مستقلی است که برای به دست آوردن حداقل یا حداکثر یک یا چند پارامتر وابسته استفاده می شوند. در این فرآیند فاکتورهای هزینه، ایمنی و ویژگی های فیزیکی سیستم تحت بررسی نیز در نظر گرفته می شود. در نهایت همانند اغلب فرآیندهای پیچیده بهینه سازی، بیش از یک متغیر وابسته برای بهینه سازی وجود خواهد داشت و راه حل آن نیز یک تصمیم گیری مهندسی بر اساس آنالیز سیستم و توزین^۱ اهمیت یک متغیر وابسته نسبت به اهمیت سایر متغیرهای وابسته برای رسیدن به مقدار حداکثر یا حداقل می باشد [۶].

در مورد بهینه سازی هیدرولیک حفاری، متغیرها و محدودیت های حفاری توسط چندین محقق معرفی شده است. متغیرها شامل ویژگی های گل (رئولوژی و وزن مخصوص)، هندسه رشته حفاری، نوع مته و ساختار نازل ها، دبی گل و نرخ نفوذ می شوند. محدودیت ها نیز، شامل محدودیت های مالی و محدودیت های فیزیکی نظیر هندسه چاه، خصوصیات عملیاتی تجهیزاتی دکل (پمپ های گل و

^۱ Weighting

پمپ‌های تقویتی^۱)، پایداری (وجود زون‌های ضعیف یا فشار بالا^۲) و تمیز سازی چاه می‌شوند [۶].
 متغیرها و محدودیت‌ها در طی محاسبه افت فشار، هیدرولیک مته و حداقل دبی مورد نیاز حمل
 کننده‌ها با یکدیگر در ارتباط هستند که منجر به محاسبه متغیرهای مستقلی نظیر افت فشار کلی
 سیستم، حداقل سرعت کننده‌ها، نیرو یا توان هیدرولیکی مته و وزن معادل گل در حال گردش می‌شود.
 محدودیت‌های حفاری یک پوش یا فضای عملیاتی^۳ را تشکیل می‌دهند که در شکل ۱-۲ نیز مشاهده
 می‌شود. همان‌طور که در نشان داده شده است، محدودیت‌های حفاری به‌طور کلی شامل حداقل و
 حداکثر دبی و حداقل و حداکثر فشار می‌باشند [۶].



شکل ۱-۲: محدوده عملیاتی هیدرولیک حفاری [۶].

هیدرولیک بهینه به‌طور معمول به‌صورت دبی گلی که محدودیت‌های عملیاتی را رعایت می‌کند و
 منجر به کمترین هزینه برای هر چاه می‌شود تعریف می‌شود. اغلب اوقات این موضوع به‌صورت دبی
 گلی که منجر به حداکثر شدن نرخ نفوذ می‌شود در نظر گرفته می‌شود. البته در این میان استثنائایی
 نیز وجود دارد. به‌طور مثال در چاه‌های انحرافی یا افقی، جلوگیری از اتلاف زمان که به دلیل مشکلات

¹ Booster Pumps

² Over Pressure Zone

³ Operational Envelop

ناشی از تمیز سازی نامناسب چاه به وجود می آید نسبت به بهینه سازی هیدرولیک مته ارجح است که در این موارد می بایست بر اساس تصمیم گیری های مهندسی سازش و مصالحه ای میان متغیرهایی که به طور هم زمان بهینه سازی می شوند صورت گیرد [۶] [۹].

مطالعات اولیه راجع به بهینه سازی هیدرولیک حفاری اغلب بر روی حداکثر کردن پارامترهای هیدرولیکی مته نظیر توان هیدرولیکی، نیروی ضربه ای هیدرولیکی و سرعت جت مته متمرکز بودند. بر اساس این مطالعات اولیه، از معادلات مربوط به هریک از این پارامترها مشتق گرفته می شود و روابط حاصل، به منظور یافتن حداکثر مقدار این پارامترها و نیز یافتن دبی بهینه حل می شوند [۲۸].

مطالعات اولیه اهمیت بسیار کمی برای آنالیز تمیز سازی چاه و پایداری دیواره چاه قائل می شدند و اغلب بهینه سازی هیدرولیک حفاری را تنها برای هیدرولیک مته در نظر می گرفتند. درحالی که مطالعات اخیر نشان می دهد که بهینه سازی هیدرولیک مته تنها زمانی صادق است که محدودیت های دبی که برای تمیز سازی چاه اعمال می شود و همچنین محدودیت های پایداری دیواره چاه یا وزن معادل گل در حال گردش در نظر گرفته شوند.

۳-۲ معیارهای بهینه سازی هیدرولیک حفاری

معیارهای متفاوتی برای بهینه سازی هیدرولیک حفاری به منظور حداکثر کردن تمیز سازی مته و در نتیجه نرخ نفوذ استفاده می شود. این معیارها شامل حداکثر قدرت هیدرولیکی مته، حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه ای مته و حداکثر سرعت جت نازل های مته می شوند. برای پاسخ گویی به این پرسش که کدام یک از معیارها برای بهینه سازی هیدرولیک مته مناسب تر است؛ باید عنوان کرد که اغلب اوقات از مدل حداکثر قدرت هیدرولیکی مته یا حداکثر نیروی ضربه ای مته برای اعماق کم تا متوسط و با افزایش عمق از معیار حداکثر سرعت جت سیال نازل های مته استفاده می شود [۳۶].

بین دو معیار حداکثر توان هیدرولیکی مته و حداکثر نیروی ضربه‌ای مته نمی‌توان برتری خاصی برای هریک از آن‌ها در نظر گرفت چراکه در عمل، این دو معیار شرایط نزدیک به همی را برقرار می‌کنند به طوری که در زمان استفاده از معیار حداکثر توان هیدرولیکی مته، معیار حداکثر نیروی ضربه‌ای هیدرولیکی نیز به اندازه ۹۰٪ اعمال می‌شود و بالعکس. استدلال دیگری که برای عدم برتری این دو معیار نسبت به هم می‌توان بیان کرد این است که در بیشتر موارد مته‌های حفاری هیدرولیک بیشتری نسبت به چیزی که مورد نیاز است اعمال می‌کنند به همین دلیل اثرات استفاده از معیارهای مختلف از بین می‌رود [۳۵] [۳۷].

۲-۳-۱- معیار حداکثر قدرت هیدرولیکی مته

مفهوم قدرت یا توان هیدرولیکی مته به‌عنوان یک معیار طراحی هیدرولیک حفاری در اوایل دهه ۱۹۵۰ ارائه شد. این معیار میزان کار مورد نیاز برای فشار آوردن و خارج کردن سیال از میان نازل‌های مته است که این کار، مربوط به خارج کردن کنده‌ها از زیر مته است. معیار قدرت یا توان هیدرولیکی مته رایج‌ترین فرآیند طراحی هیدرولیک حفاری می‌باشد؛ چراکه به‌عنوان اولین معیار و سریع‌تر از سایر معیارها معرفی شده است [۳۸].

معیار حداکثر قدرت هیدرولیکی مته به این صورت تعریف می‌شود که: در صورت در اختیار داشتن حداکثر فشار پمپ، دبی گل و اندازه نازل‌ها به‌گونه‌ای انتخاب گردد که حداکثر قدرت هیدرولیکی را برای تمیز سازی ته چاه بتوان به مته اعمال کرد.

اسپیر (۱۹۵۸) نشان داد که با افزایش قدرت و توان پمپ می‌توان تأثیر جت‌های مته را افزایش داد. وی نشان داد که با افزایش قدرت هیدرولیکی، نرخ نفوذ مته افزایش می‌یابد تا جایی که سرعت خارج کردن کنده‌ها از زیر مته با سرعت تولید آن‌ها برابر می‌شود. بعد از این نقطه تمیز سازی کامل^۱ رخ می‌دهد که دیگر با افزایش قدرت هیدرولیکی، نرخ نفوذ افزایش نمی‌یابد. اندکی بعد از انتشار این یافته‌ها،

¹ Perfect Cleaning

محققان دریافته اند که به دلیل وجود افت فشار اصطکاکی، قدرت هیدرولیکی پمپ با قدرت هیدرولیکی اعمال شده به ته چاه یکسان نیست. سپس آن ها پی بردند که قدرت هیدرولیکی مته نسبت به قدرت هیدرولیکی پمپ پارامتر مهم تری است و بعلاوه، یافته های محققان نشان می دهد که قدرت هیدرولیکی مته لزوماً با ماکزیمم بودن قدرت هیدرولیکی پمپ به مقدار حداکثر خود نخواهد رسید. شرایط حداکثر قدرت هیدرولیکی مته توسط کندان و گوینز (۱۹۶۰) به دست آمد [۲۸] [۳۶].

افت فشار اتلافی (Δp_d) برابر افت فشار کل سیستم گردش گل حفاری به جز افت فشار در مته می باشد که این افت فشار اتلافی طبق معادله (۱-۲) متناسب با q^m است. [۹]

$$\Delta P_d \approx q^m \quad (1-2)$$

$$\Delta P_d = Cq^m \quad (2-2)$$

C ضریب ثابت و m شاخص آسفتگی جریان و q دبی جریان است.

افت فشار در مته به صورت رابطه (۳-۲) مطرح می شود [۳۵]:

$$\Delta P_b = P_p - Cq^m \quad (3-2)$$

P_p فشار پمپ است.

قدرت هیدرولیکی سیال حفاری در مته، یکی از علائم میزان و ظرفیت تمیز سازی چاه توسط سیال می باشد که مطابق معادله (۴-۲) نشا داده می شود [۳۵].

$$P_{Hb} = \frac{\Delta p_b q}{1.714} \quad (4-2)$$

در معادله (۴-۲)، P_{Hb} قدرت هیدرولیکی مته برحسب^۱ hp است.

با جایگذاری معادله (۳-۲) در معادله (۴-۲) معادله (۵-۲) حاصل می شود [۳۵]:

^۱ Horse Power

$$p_{Hb} = \frac{q(p_p - cq^m)}{1.714} \quad (5-2)$$

برای به دست آوردن دبی که در آن نیروی هیدرولیکی مته حداکثر است، مطابق با معادله (5-2) از معادله (5-2) مشتق گرفته می شود [35]:

$$\frac{dp_{Hb}}{dq} = \frac{p_p - (m+1)cq^m}{1.714} = 0 \quad (6-2)$$

با حل معادله (6-2) و به دست آوردن ریشه های آن، معادله (8-2) حاصل می شود [35]:

$$p_p = (m+1)cq^m = (m+1)\Delta p_d \quad (7-2)$$

$$\Delta p_d = \frac{p_p}{m+1} \quad (8-2)$$

بنابراین زمانی که افت فشار اتلافی، $\frac{1}{m+1}$ برابر فشار پمپ است قدرت هیدرولیکی مته در مقدار حداکثر خود قرا دارد.

همچنین با توجه به رابطه (9-2)، زمانی که افت فشار مته، $\frac{m}{m+1}$ برابر فشار پمپ است قدرت هیدرولیکی مته در مقدار حداکثر خود قرا دارد [36].

$$\Delta p_b = p_p - \Delta p_d = p_p - \frac{p_p}{m+1} = \frac{m}{m+1} p_p \quad (9-2)$$

۲-۱-۳-۲ معیار حداکثر نیروی ضربه ای جت

مفهوم نیروی هیدرولیکی ضربه ای در اواسط دهه ۱۹۵۰ معرفی گردید. نیروی هیدرولیکی ضربه ای، مقدار نیروی اعمال شده توسط سیال در خروجی نازل های مته است. این نیرو، توسط سایش مستقیم و

جریان متقاطع^۱ زیر مته عمل تمیز سازی ته چاهی را انجام می دهد. معیار نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای نسبت به سایر معیارهای طراحی هیدرولیک حفاری به منظور تمیز سازی ته چاهی، معیار منطقی تری می باشد. مته‌های حفاری باجت نازل‌های توسعه یافته^۲ و نزدیک تر به ته چاه، (نازل‌های بلندتر و طولانی تر) استفاده گسترده تری در صنعت حفاری دارند. تست‌های آزمایشگاهی و میدانی تمیز سازی ته چاهی، مناسب تر بودن این نوع از مته‌ها را اثبات می کنند [۳۹]. دلیل بهبود وضعیت تمیز سازی ته چاهی توسط این نوع از نازل‌ها این است که نازل‌های توسعه یافته قدرت هیدرولیکی مته را تغییر نمی دهند اما باعث تغییر در نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته در ته چاه می شوند و این نیروی هیدرولیکی نسبت به قدرت هیدرولیکی مته ارتباط بیشتری به تمیز سازی چاه دارد [۳۵].

این معیار به این صورت تعریف می شود که: با در اختیار داشتن حداکثر فشار پمپ، دبی گل و اندازه نازل‌ها به گونه‌ای انتخاب گردد که حداکثر نیروی ضربه‌ای جت سیال برای تمیز سازی ته چاه به مته اعمال شود [۳۵] [۳۷].

نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته نیز نشان دهنده ظرفیت تمیز سازی چاه توسط سیال حفاری می باشد که از رابطه (۲-۱۰) به دست می آید [۳۵].

$$F_j = 0.01823 C_d q \sqrt{\rho \Delta p_b} \quad (2-10)$$

که در آن F_j نیروی ضربه‌ای هیدرولیکی مته بر حسب پوند (lbf)، C_d ثابت تخلیه نازل^۳ و پارامتری بی بعد و ρ نیز وزن مخصوص (چگالی^۴ سیال) بر حسب پوند بر گالن^۵ است [۳۵] [۳۷].

¹ Cross Flow

² Extended Jet Nozzle

³ Nozzle Discharge Coefficient

⁴ Density

⁵ Pound Per Gallon (ppg)

شرایط لازم برای رسیدن به حداکثر نیروی ضربه‌ای جت سیال نیز توسط کندال و گوینز (۱۹۶۰) به دست آمده است. با جایگذاری معادله (۲-۳) در معادله (۲-۱۰)، معادله (۲-۱۱) حاصل می‌گردد [۳۵]:

$$F_j = 0.01823c_d q \sqrt{\rho(p_p - cq^m)} \quad (۱۱-۲)$$

برای به دست آوردن دبی که در آن نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته حداکثر است، از محاسبات ریاضی مطابق با معادله (۲-۱۲) استفاده می‌شود [۳۵]:

$$\frac{dF_j}{dq} = \frac{0.009115C_d[2\rho\Delta p_p q - (m+2)\rho c q^{m+1}]}{\sqrt{\rho\Delta p_p q^2 - \rho c q^{m+2}}} = 0 \quad (۱۲-۲)$$

با حل معادله (۲-۱۲) و به دست آوردن ریشه‌های آن، رابطه (۲-۱۳) حاصل می‌گردد [۳۵]:

$$\Delta p_d = \frac{2p_p}{m+2} \quad (۱۳-۲)$$

بنابراین زمانی که افت فشار اتلافی، $\frac{2}{m+2}$ برابر فشار پمپ است نیروی ضربه‌ای جت مته در حداکثر مقدار خود قرار دارد.

همچنین با توجه به رابطه (۲-۱۴)، زمانی که افت فشار مته، $\frac{m}{m+2}$ برابر فشار پمپ است نیروی ضربه‌ای جت مته در مقدار حداکثر خود قرار دارد [۳۵].

$$\Delta P_b = p_p - \Delta p_d = p_p - \frac{2p_p}{m+2} = \frac{m}{m+2} p_p \quad (۱۴-۲)$$

۳-۱-۳-۲ معیار حداکثر سرعت جت سیال در نازل‌ها

این معیار می‌تواند این‌گونه تعریف شود که در صورت در اختیار داشتن حداکثر فشار پمپ، دبی گل و اندازه نازل‌ها به گونه‌ای انتخاب گردد که حداکثر سرعت جت سیال در نازل‌های مته برای تمیز سازی چاه حاصل گردد.

سرعت نازل ها به عنوان تابعی از افت فشار است که می توان آن را از معادله (۲-۱۵) به دست آورد [۳۵]:

$$v_n = C_d \sqrt{\frac{\Delta p_b}{8.074 \times 10^{-4} \rho}} \quad (۲-۱۵)$$

با جایگذاری معادله (۲-۳) در معادله (۲-۱۵)، رابطه (۲-۱۶) حاصل می شود [۳۵]:

$$v_n = C_d \sqrt{\frac{p_p - cq^m}{8.074 \times 10^{-4} \rho}} \quad (۲-۱۶)$$

این معادله نشان می دهد که سرعت نازل با کاهش دبی جریان و در نتیجه افت فشار اتلافی افزایش می یابد. در کاربردهای میدانی، دبی جریان از طریق محاسبه حداقل سرعت فضای حلقوی مورد نیاز برای بلند کردن کنده ها تعیین می گردد [۳۵].

۲-۴ محدودیت های بهینه سازی هیدرولیک حفاری

همان طور که پیش تر نیز بیان شد، منظور از بهینه سازی هیدرولیک حفاری بهینه کردن متغیرهای هیدرولیکی با در نظر گرفتن محدودیت های حفاری است. این محدودیت ها که به طور کلی شامل حداقل و حداکثر فشار و دبی می باشند، منجر به تشکیل یک پنجره یا پوش عملیاتی می شوند. این پنجره یا محدوده عملیاتی، محدوده دبی و فشارهایی را نشان می دهد که عملیات بهینه سازی و انتخاب دبی و اندازه نازل های بهینه باید در آن انجام شود [۳۲].

انتخاب یک محدوده عملیاتی برای دبی، اولین مسئله ای است که باید در محاسبه پارامترهای هیدرولیکی در نظر گرفته شود. معمولاً در عملیات میدانی برای جلوگیری از ته نشینی کنده ها و تمیز سازی چاه باید از دبی های بالا استفاده شود اما با در نظر گرفتن توانایی پمپ های گل و ایمنی فشارهای ته چاهی، دبی گل را نمی توان بدون محدودیت بالا برد؛ بنابراین محاسبه محدوده عملیاتی پمپ بسیار مهم و ضروری است [۴۰].

حداقل دبی مجاز^۱: حداقل دبی موردنیاز که باعث تمیز سازی مناسب کل چاه می شود به عنوان

حداقل دبی مجاز تعریف می شود.

در روش های بهینه سازی پیشین، حداقل دبی موردنیاز تنها برای بخش در حال حفاری محاسبه می شود و این دبی به عنوان حداقل دبی مجاز معرفی می گردد [۴۱]؛ این در حالی است که گاهی اوقات به دلیل پیچیده بودن هندسه چاه (مخصوصاً در چاه های دریایی) ممکن است این حداقل دبی برای بخش در حال حفاری مناسب باشد اما در بخش های بالاتر (عمق کمتر) به دلیل تغییر شیب چاه و یا بزرگ تر شدن فضای حلقوی، برای تمیز سازی چاه و حمل کننده به مقدار دبی بیشتری نسبت به بخش در حال حفاری نیاز باشد؛ بنابراین در این پایان نامه برای نظر گرفتن تمیز سازی کل چاه و اطمینان از حمل کننده ها تا سطح دکل، چاه به قسمت های عمودی، مایل و افقی تقسیم و حداقل دبی موردنیاز هر قسمت جداگانه محاسبه می شود، در نهایت بزرگ ترین مقدار به عنوان حداقل دبی مجاز معرفی می گردد.

برای محاسبه حداقل دبی مجاز در هر قسمت نیز، ابتدا چاه بر اساس پروفایل و هندسه آن به قسمت های کوچکی تقسیم بندی می شود و در هر قسمت حداقل سرعت موردنیاز برای تمیز سازی چاه و هندسه فضای حلقوی محاسبه می شود و بر اساس این دو پارامتر حداقل دبی برای هر قسمت از چاه به دست می آید. با وجود اینکه حداقل سرعت موردنیاز حمل کننده ها و تمیز سازی چاه برای قسمت های انحرافی و افقی بیشتر از قسمت های عمودی چاه است؛ اما به دلیل بزرگ بودن اندازه فضای حلقوی در قسمت های عمودی چاه ها، به طور معمول حداقل دبی برای قسمت های عمودی بیشتر از قسمت های مایل و افقی است و حداقل دبی مجاز نهایی بر اساس مقدار حداقل دبی در قسمت های عمودی چاه تعیین می شود.

¹ Minimum Allowable Flow Rate

حداکثر دبی مجاز^۱: حداکثر دبی که با در نظر گرفتن محدودیت های ظرفیت تجهیزات^۲ و

پایداری دیواره چاه یا همان پنجره ایمن وزن گل محاسبه می شود را حداکثر دبی مجاز عملیات حفاری می گویند.

با افزایش عمق، افت فشار سیستم افزایش می یابد و ظرفیت پمپ ها برای تولید دبی کافی به منظور حمل کنده ها و تمیز سازی چاه کاهش می یابد؛ بنابراین ظرفیت تولید دبی یک پارامتر محدود کننده برای عملیات حفاری می باشد. به عبارت دیگر، دبی را نمی توان بدون محدودیت افزایش داد و دبی پمپ همواره باید در یک محدوده استاندارد قرار گیرد [۴۰].

علاوه بر محدودیت ظرفیت پمپ ها، تجهیزات حفاری نظیر لوله ها و چند راهه ها^۳ نیز تا حد معینی از فشار را می تواند تحمل کنند که این دبی متناظر با حداکثر فشار قابل تحمل تجهیزات حفاری نیز یک محدودیت بزرگ برای دبی بکار رفته در حفاری می باشد؛ بنابراین محدودیت ظرفیت تجهیزات را می توان به ظرفیت تولید دبی پمپ و دبی متناظر با حداکثر فشار قابل تحمل تجهیزات مرتبط دانست [۴۱].

به خاطر طولانی بودن چاه ها و پیچیده بودن پروفایل آن ها (مخصوصاً در چاه های دریایی) افت فشار اصطکاکی در فضای حلقوی نسبت به دبی بسیار حساس است. از طرف دیگر، پنجره ایمن گل نیز در این چاه ها معمولاً بسیار کوچک است. بنابراین هنگام اعمال دبی در عملیات حفاری، توجه به مسئله پایداری دیواره چاه و پنجره ایمن گل امری ضروری است؛ زیرا با توجه به حساس بودن مقدار وزن معادل گل نسبت به دبی، افزایش ناگهانی دبی موجب افزایش ناگهانی فشار ته چاهی می شود که با توجه به باریک بودن پنجره ایمن وزن گل این افزایش دبی موجب شکست سازند، هرز روی سیال و در نهایت عدم پایداری دیواره چاه می شود. بنابراین پایداری دیواره چاه و پنجره ایمن گل، عامل

¹ Maximum Allowable Flow Rate

² Equipment Bearing

³ Manifolds

محدودکننده‌ای برای حداکثر دبی می‌باشد [۴۰].

درنهایت برای محاسبه حداکثر دبی مجاز، از بین مقادیر حداکثر دبی‌های محاسبه‌شده کمترین مقدار به‌عنوان حداکثر دبی مجاز سیستم هیدرولیک حفاری معرفی می‌شود.

حداکثر فشار مجاز^۱: حداکثر فشار مجاز در سیستم حفاری توسط دو عامل حداکثر فشار قابل تولید پمپ و حداکثر فشار قابل تحمل^۲ تجهیزات محدود می‌شود. حداکثر فشار قابل تولید پمپ یکی از ویژگی‌های پمپ است که برای هر لاینر^۳ پمپ مقداری مشخص و ثابت است. حداکثر فشار قابل تحمل تجهیزات دکل نیز یکی از ویژگی‌های دکل حفاری است و به‌طور معمول متناسب با نوع، کاربرد و عمر هر دکل این مقدار متغیر است. از میان این دو مقدار حداکثر فشار، کوچک‌ترین مقدار به‌عنوان حداکثر فشار مجاز سیستم حفاری شناخته می‌شود [۳۵].

حداقل فشار مجاز^۴: حداقل فشار مجاز در سیستم هیدرولیک حفاری، توسط فشار منفذی سازند که مربوط به پایداری دیواره چاه است محدود می‌شود. فشار گل در حالت ایستا و در حالت چرخشی در فضای حلقوی همواره باید از فشار منفذی سازند بیشتر باشد تا مانع از نفوذ سیال سازند به چاه، ریزش و ناپایداری دیواره چاه شود. از آنجایی که وزن معادل گل در حالت ایستا (ESD) همواره کمتر از وزن معادل گل در حالت چرخشی است؛ بنابراین معیار اصلی برای محاسبه حداقل فشار مجاز در سیستم هیدرولیک حفاری این است که وزن معادل گل در حالت ایستا همواره از فشار منفذی سازند بیشتر باشد [۴۰] [۴۱].

۵-۲ مکانیسم بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری

منظور از بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری، پیدا کردن بهترین ترکیب دبی و اندازه نازل‌هایی است که

¹ Maximum Allowable Pressure

² Pressure Bearing

³ Liner

⁴ Minimum Allowable Pressure

⁵ Equivalent Static Density

بتوانند با در نظر گرفتن محدودیت های پمپ، دکل، تمیز سازی چاه و پایداری دیواره چاه؛ قدرت سیال در مته را برای معیارهای حداکثر توان هیدرولیکی مته، حداکثر نیروی ضربه ای جت مته و حداکثر سرعت جت نازل ها به حداکثر برساند [۷].

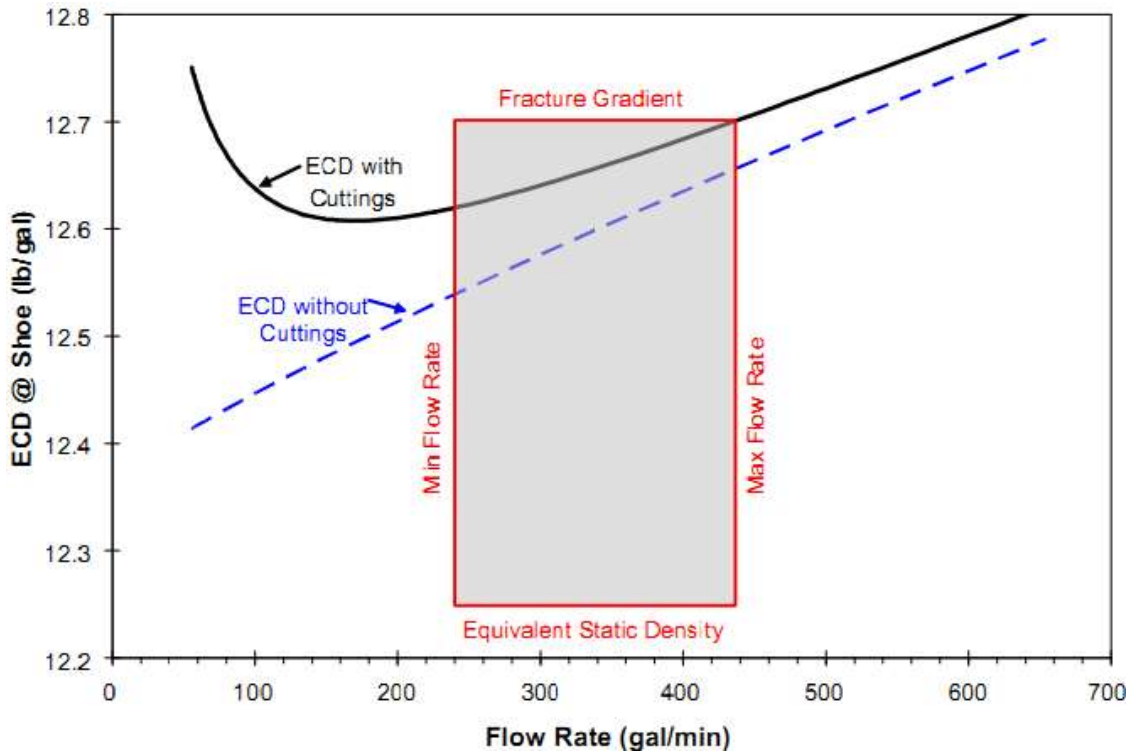
در این پروژه برای نشان دادن مکانیسم بهینه سازی هیدرولیک حفاری و فهم بهتر موضوع، از دو نمودار یا شکل استفاده می شود. این دو شکل در واقع دو پنجره هیدرولیکی برای به تصویر کشیدن ارتباط میان پارامترهای مختلف و شرایط مرزی (محدودیت ها) می باشند.

۲-۵-۱ پنجره هیدرولیک فضای حلقوی

پنجره هیدرولیک فضای حلقوی چاه در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. این پنجره که نموداری از وزن معادل گل در حال گردش در کفشک لوله جداری^۱ در مقابل دبی گل است، ابزاری مفید برای تعریف و نشان دادن شروط لازم جهت تمیز سازی و پایداری دیواره چاه می باشد.

در پنجره هیدرولیک فضای حلقوی، محدوده حفاری توسط گرادیان شکست سازند در کفشک لوله جداری (حد بالا) و وزن معادل گل در حال سکون (حد پایین) مشخص می شود. مرزهای چپ و راست نیز دامنه دبی های مجاز را تعیین می کنند. مرز سمت چپ (حداقل دبی) توسط محدودیت های پمپ و شروط مورد نیاز برای تمیز سازی چاه تعیین می شود. مرز سمت راست (حداکثر دبی) نیز، توسط حداکثر دبی قابل تولید پمپ، حداکثر دبی قابل تحمل تجهیزات و دبی حاصل از نقطه تلاقی نمودار وزن معادل گل در حال گردش همراه با کنده حفاری با مرز گرادیان شکست سازند تعیین می شود.

^۱ Casing Shoe



شکل ۲-۲: پنجره هیدرولیک فضای حلقوی چاه [۳۲].

۲-۵-۲ پنجره بهینه سازی هیدرولیک مته

پنجره بهینه سازی هیدرولیک مته که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است نیز توسط محدودیت های دبی و فشار به صورت یک پنجره مستطیلی تعریف می شود. در این مورد فشار سیستم، متغیر وابسته است و داده ها نیز بر روی یک نمودار لگاریتمی رسم می شوند. حداکثر فشار پمپ که مرز بالایی این پنجره و مقداری ثابت و مستقل از دبی است، یک پارامتر بحرانی در فرآیند بهینه سازی به شمار می رود. حداکثر و حداقل دبی که در پنجره هیدرولیک فضای حلقوی نیز بکار رفته اند، مرزهای سمت چپ و راست این پنجره هستند. به دلیل استفاده از مختصات لگاریتمی، دو نمودار توانی^۱ در این مختصات به صورت خطی رسم می شوند. اولین خط، توان هیدرولیکی قابل تولید پمپ (HHP_p)^۲ است که به صورت رابطه (۲-۱۷) تعریف می شود [۳۲]:

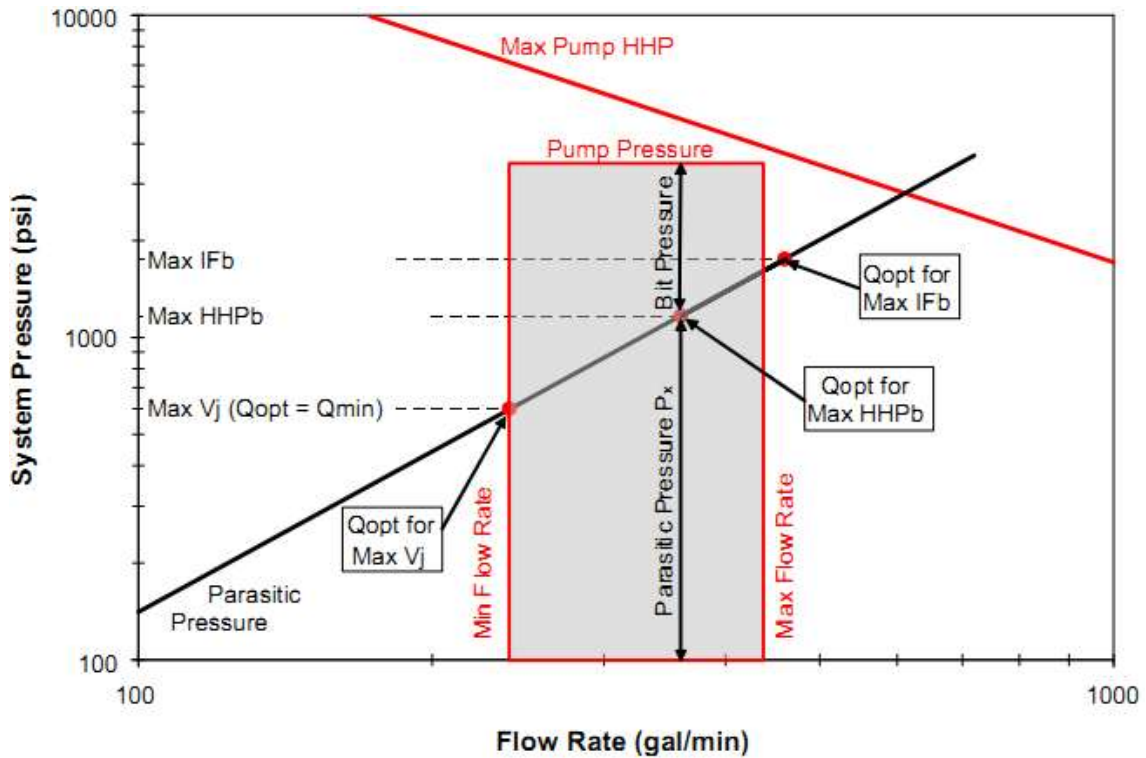
$$P_p = 1714(HHP_p)Q^{-1}$$

^۱ Power Curve

^۲ Hydraulic Horse Power

(۱۷-۲)

که حداکثر فشار پمپ، اگر خط توان هیدرولیکی قابل تولید پمپ (HHP_p) پنجره را قطع کند (معمولاً نزدیک به گوشه راست قطع می‌کند) معادله (۱۷-۲) باید بررسی شود تا ترکیب فشار پمپ (P_p) و دبی (Q) مورد استفاده در سیستم از حداکثر توان هیدرولیکی پمپ (HHP_p) تجاوز نکند.



شکل ۲-۳: پنجره بهینه‌سازی هیدرولیک مته [۳۲].

خط توانی دوم، افت فشارهای سیستم حفاری به جز مته را نشان می‌دهد که در واقع همان افت فشار اتلافی سیستم گردش گل می‌باشد. به‌طور معمول این اصل که افت فشار اتلافی متناسب با Q^m است، اصلی پذیرفته‌شده است. توان m شاخص آشفته‌گی جریان است که از مقدار $1/3$ تا $1/9$ تغییر می‌کند و به خصوصیات جریان آشفته سیال و هندسه رشته حفاری بستگی دارد. توان m می‌تواند از طریق داده‌های میدانی، مدل‌سازی و یا مقداری از پیش تعیین‌شده مشخص گردد [۳۲].

مقادیر رایج برای شاخص آشفته‌گی جریان (m)، $1/86$ و $1/75$ می‌باشد که از طریق دو رابطه

متفاوت ضریب اصطکاک بلازیوس استایل^۱ به دست آمده است. کندال و گویینز (۱۹۶۰) با در نظر گرفتن مقدار ۱/۹ برای پارامتر شاخص آشفتگی جریان، شرایط خاصی را برای حداکثر کردن هیدرولیک در مته حفاری تحت معیارهای بهینه سازی متفاوت به دست آوردند که به صورت روابط (۱۸-۲)، (۱۹-۲)، (۲۰-۲)، (۲۱-۲) و (۲۲-۲) مطرح کردند [۳۲]:

- حداکثر توان هیدرولیکی مته (HHP_p):

$$\Delta p_b = \left(\frac{m}{m+1} \right) p_p = 0.655 p_p \approx \frac{2}{3} p_p \quad (18-2)$$

$$\Delta p_d = \left(\frac{1}{m+1} \right) p_p = 0.345 p_p \approx \frac{1}{3} p_p \quad (19-2)$$

- حداکثر نیروی ضربه ای در مته:

$$\Delta p_b = \left(\frac{m}{m+1} \right) p_p = 0.487 p_p \approx \frac{1}{2} p_p \quad (20-2)$$

$$\Delta p_d = \left(\frac{2}{m+2} \right) p_p = 0.513 p_p \approx \frac{1}{2} p_p \quad (21-2)$$

- حداکثر سرعت جت مته:

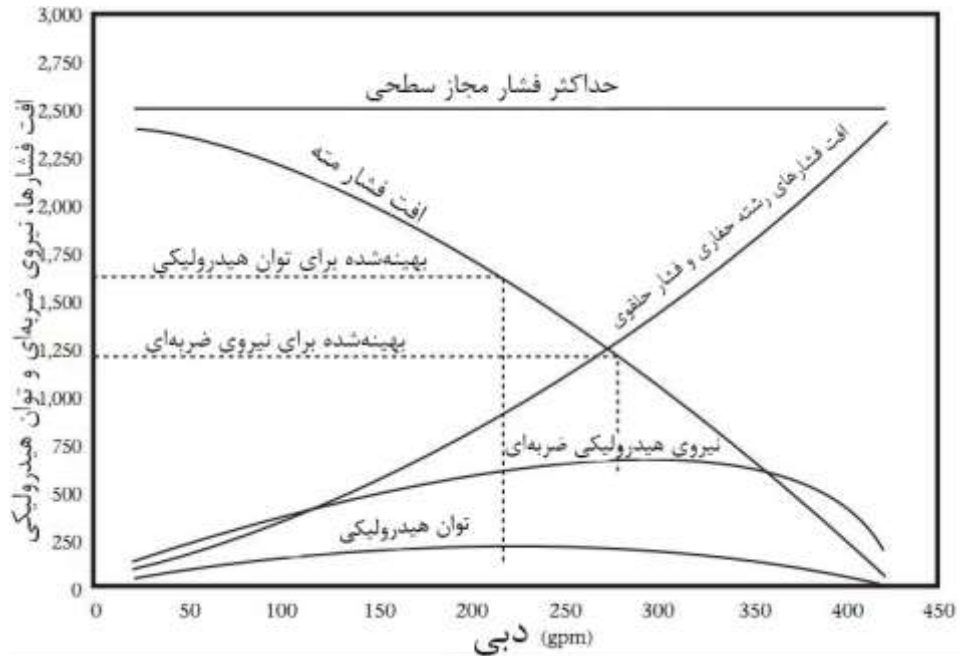
$$\Delta p_b = p_p - \Delta p_d @ Q_{\min} \quad (22-2)$$

طبق معادلات (۱۸-۲)، (۱۹-۲)، (۲۰-۲)، (۲۱-۲) و (۲۲-۲)، هیدرولیک مته می تواند بر اساس توان هیدرولیکی در هر اینچ مربع زیر دندانهای مته (HSI^2)، نیروی هیدرولیک ضربه ای مته و سرعت نازل های مته بهینه سازی شود. معمولاً هدف از بهینه سازی مته اعمال حدود ۱/۲ تا ۲/۳ یا به عبارت دیگر ۵۰٪ تا ۶۵٪ از حداکثر فشار قابل تولید پمپ به مته است [۳۲]. سیستم هیدرولیکی زمانی برای نیروی هیدرولیک ضربه ای بهینه می شود که افت فشار در مته برابر ۵۰٪ فشار گل در حال گردش باشد. زمانی که افت فشار در مته ۶۵٪ فشار در حال گردش سیستم هیدرولیکی باشد، سیستم

¹ Blasius-style

² Horse Power per Square Inch

هیدرولیکی برای توان هیدرولیکی مته بهینه خواهد شد. شکل ۲-۴ مقایسه میان بهینه سازی با توان هیدرولیکی و نیروی هیدرولیکی ضربه ای را نشان می دهد [۴۲].



شکل ۲-۴: اثر دبی بر روی افت فشار و هیدرولیک مته [۴۲].

جدول ۱-۲ نشان می دهد که تغییر و کاهش شاخص آشفتگی جریان (m) می تواند افت فشار مورد نیاز در مته برای بهینه سازی هیدرولیک مته را تا ۱۰٪ کاهش دهد. متأسفانه به دلیل تأثیر پارامترهای مختلفی همچون ترکیب گل بر روی شاخص آشفتگی جریان، مشخص کردن مقدار دقیق و ثابت برای این پارامتر غیرممکن است و معمولاً عدد $1/75$ یا $1/86$ به عنوان مقدار این پارامتر بکار می رود [۳۲] [۳۷].

جدول ۲-۱: اثر شاخص آشفستگی جریان روی درصد افت فشار اعمال شده به مته، به منظور بهینه‌سازی هیدرولیک مته.
[۳۲]

توان m	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
توان هیدرولیکی بهینه	56.5	58.3	60	61.5	63	64.3	65.5
نیروی هیدرولیکی ضربه ای بهینه	39.4	41.2	42.9	44.4	45.9	47.4	48.7

بنابراین با توجه به مطالب گفته شده، مکانیسم و روند بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری این گونه است که برای بهینه‌سازی بر اساس حداکثر توان هیدرولیکی مته، نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای جت و حداکثر سرعت نازل‌ها؛ ابتدا دبی بهینه برای افت فشار اتلافی (Δp_d) که در معادلات (۲-۱۹) یا (۲-۲۱) صدق می‌کند محاسبه می‌شود. این فرآیند یا به صورت تحلیلی و یا به صورت گرافیکی انجام می‌شد که روش گرافیکی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

بر طبق این روش گرافیکی، بعد از محاسبه دبی بهینه‌ای که (Q_{opt}) در معادلات (۲-۱۹) یا (۲-۲۱) صدق می‌کند، باید در محدوده مجاز بودن این دبی بهینه بررسی گردد و در صورت قرار گرفتن این دبی بهینه در محدوده مجاز، این دبی به عنوان دبی بهینه نهایی یا دبی پیشنهادی ($Q_{rec} = Q_{opt}$) معرفی می‌شود.

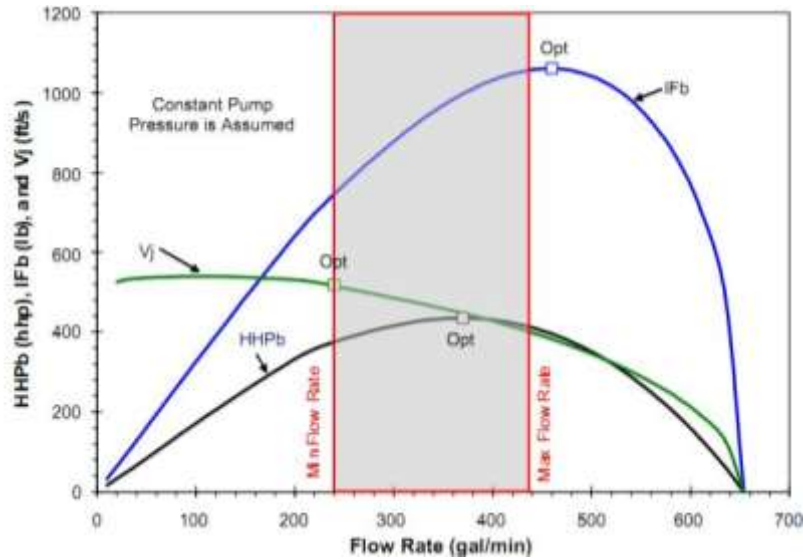
اگر دبی بهینه محاسبه شده بر اساس معیارهای بهینه‌سازی هیدرولیک مته کمتر از حداقل دبی مجاز باشد ($Q_{rec} \leq Q_{min}$)، دبی بهینه پیشنهادی (دبی بهینه نهایی) حداقل دبی مجاز است ($Q_{rec} = Q_{min}$) و معیار حداکثر سرعت جت سیال برقرار خواهد بود.

اگر دبی بهینه محاسبه شده بیشتر از حداکثر دبی مجاز باشد ($Q_{rec} \geq Q_{max}$)، دبی پیشنهادی حداکثر دبی مجاز است ($Q_{rec} = Q_{max}$) و در این صورت توان هیدرولیکی مته و نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته حداکثر می‌شوند ولی به صورت تئوری بهینه نخواهند شد. منظور از بهینه نبودن تئوری

هیدرولیک مته این است که زمانی که مقدار افت فشار بیشتر از مقدار بهینه (۵۰٪ تا ۶۵٪) به مته اعمال می شود در واقع نیروی هیدرولیکی ضربه ای و توان هیدرولیکی بیشتری نسبت به نیروی مورد نیاز تمیز سازی مته به مته اعمال خواهد شد و این مقدار اضافی تلف می شود؛ چراکه برای تمیز سازی مته و قرار گرفتن در شرایط بهینه هیدرولیک مته به مقداری افت فشار و توان هیدرولیکی در مته نیاز است که نیروی سیال بتواند کنده های تولید شده را با همان سرعتی که تولید می شوند از زیر دنده های مته و اطراف آن خارج کند. اعمال نیروی هیدرولیکی بیشتر از این مقدار موجب اتلاف انرژی و افزایش افت فشار اتلافی می شود.

همان طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، دبی بهینه (Q_{opt}) برای معیار حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه ای (IF_b) از مقدار حداکثر فشار تجاوز می کند و دبی پیشنهادی مقدار دبی حداکثر خواهد بود ($Q_{rec} = Q_{max}$). شکل ۲-۵ نیز به شکلی دیگر این فرآیند را نشان می دهد. همان طور که در این شکل نیز مشاهده می شود، کاهش توان هیدرولیکی و نیروی هیدرولیکی ضربه ای بعد از نقطه حداکثر یا ماکزیمم آن ها موجب افزایش سریع افت فشار اتلافی در دبی های بالا می شود.

¹ Hydraulic Impact Force



شکل ۲-۵: مقادیر توان هیدرولیکی مته، نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته و سرعت نازل‌های مته به‌عنوان تابعی از دبی؛ در یک فشار ثابت پمپ [۳۲].

گام بعدی در بهینه‌سازی هیدرولیک مته بعد از مشخص کردن دبی بهینه، محاسبه افت فشار مته در دبی تعیین‌شده (دبی پیشنهادی) است که با کم کردن افت فشار اتلافی در آن دبی بهینه $(\Delta p_d @ Q_{rec})$ از فشار پمپ (P_p) به دست می‌آید. سپس نازل‌ها یا سطح مقطع کلی جریان مته (TFA) به‌طور مستقیم از طریق دبی بهینه پیشنهادی (Q_{rec}) و افت فشار مته متناظر با آن دبی $(\Delta p_b @ Q_{rec})$ به دست می‌آیند. این فرآیند در ذیل به تفصیل آورده شده است:

زمانی که دبی بهینه بیشتر از حداکثر دبی است $(Q_{opt} \geq Q_{max})$ که اغلب در عمق‌های پایین رخ می‌دهد، افت فشار اتلافی به‌صورت رابطه (۲۳-۳) مطرح می‌شود [۳۵]:

$$\Delta p_d = c q_{max}^m \quad (23-2)$$

افت فشار در مته نیز به‌صورت رابطه (۲۴-۲) مطرح می‌گردد [۳۵]:

$$\Delta p_b = p_{max} - c q_{max}^m \quad (24-2)$$

در نهایت سطح مقطع کلی جریان مته (TFA)، مطابق معادله (۲۵-۲) نشان داده می‌شود [۳۵]:

$$TFA = \frac{0.00912 q_{max}}{c_d} \sqrt{\frac{p}{\Delta p_b}} \quad (25-2)$$

زمانی که دبی بهینه محاسبه شده توسط معیارهای بهینه سازی در پنجره عملیاتی یا پنجره بهینه سازی هیدرولیک متعادل قرار می گیرند ($Q_{min} \leq Q_{opt} \leq Q_{max}$)، محاسبات به صورت زیر خواهد بود:

دبی بهینه در یک عمق بخصوص برابر است با [۳۵]:

$$q = m \sqrt{\frac{\Delta p_d}{c}} \quad (26-2)$$

جایی که افت فشار اتلافی برای معیار حداکثر توان هیدرولیکی متعادل برابر [۳۵]:

$$\Delta p_d = \frac{p_p}{m+1} \quad (27-2)$$

و برای حداکثر نیروی هیدرولیک ضربه ای برابر [۳۵]:

$$\Delta p_d = \frac{2p_p}{m+2} \quad (28-2)$$

در نهایت، سطح مقطع کلی جریان متعادل در این حالت، مطابق رابطه (۲۹-۲) است [۳۵]:

$$TFA = \frac{0.00912q}{c_d} \sqrt{\frac{p}{\Delta p_b}} \quad (29-2)$$

که برای معیار حداکثر توان هیدرولیکی متعادل افت فشار متعادل عبارت (۳۰-۲) است [۳۵]:

$$\Delta p_b = \frac{m}{m+1} p_p \quad (30-2)$$

همچنین برای معیار حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه ای، این مقدار برابر معادله (۳۱-۲) است [۳۵]:

$$\Delta p_b = \frac{m}{m+2} p_p \quad (31-2)$$

زمانی که دبی بهینه محاسبه شده توسط معیارهای بهینه سازی کمتر از حداقل دبی است (اغلب در اعماق زیاد اتفاق می افتد)، دبی بهینه پیشنهادی برابر حداقل دبی در نظر گرفته می شود و در این حالت باید از نازل های بزرگتری استفاده شود تا فشار پمپ از حد بالای پنجره عملیاتی (P_{max}) بیشتر نشود. در این حالت از معیار حداکثر سرعت جت سیال استفاده می شود و محاسبات به صورت زیر است:

ابتدا افت فشار اتلافی محاسبه می شود [۳۵]:

$$\Delta p_d = cq_{\min}^m \quad (32-2)$$

سپس افت فشار مجاز در مته توسط معادله (33-2) محاسبه می شود [35]:

$$\Delta p_b = p_{\max} - \Delta p_d \quad (33-2)$$

و در نهایت سطح مقطع کلی جریان مته مطابق معادله (34-2) محاسبه می گردد [35]:

$$TFA = \frac{0.00912q_{\min}}{c_d} \sqrt{\frac{p}{\Delta p_b}} \quad (34-2)$$

گام نهایی پس از مشخص کردن دبی و نازل های بهینه، مقایسه نتایج حاصل با سایر شرایط مرزی نظیر پنجره هیدرولیک فضای حلقوی و همچنین رهنمودهای عملیاتی زیر می باشد.

- مقدار مناسب پارامتر توان هیدرولیکی در هر اینچ مربع (HSI)، در صورت استفاده از گل های پایه آبی برابر ۳ تا ۸ و در صورت استفاده از گل های پایه روغنی ۳ تا ۶ است [32].

- مقدار مناسب پارامتر سرعت جت سیال در نازل ها برای گل پایه آبی و پایه روغنی به ترتیب برابر ۳۰۰ تا ۴۵۰ و ۲۰۰ تا ۳۵۰ فوت بر ثانیه است [32].

البته در برخی از موارد عملیات بهینه سازی هیدرولیک حفاری به همین سادگی نخواهد بود زیرا بعضی مواقع شرایطی رخ می دهد که حداقل دبی مورد نیاز بیشتر از حداکثر دبی قابل تولید پمپ خواهد بود ($Q_{\max} \leq Q_{\min}$) که این حالت اغلب در چاه های دریایی و ERW رخ می دهد. در این حالت به دلیل طراحی نامناسب و ظرفیت پایین سیال حفاری پمپ توانایی تولید دبی بالا برای حمل کننده ها را نخواهد داشت. بنابراین راه حل های جایگزینی برای بهبود وضعیت و برقراری شرایط عادی در نظر گرفته می شود. از جمله این راه حل ها و اقدامات عبارت اند از: کاهش نرخ نفوذ، افزایش سرعت چرخش رشته حفاری، توقف و بالا پایین کردن و شست و شوی چاه؛ اما در صورتی که هیچ کدام از روش های بالا کارساز نباشند راهی جز تغییر خصوصیات رئولوژی گل حفاری جهت افزایش قدرت

¹ Wash and Reaming

حمل کننده‌ها توسط سیال نخواهد بود. در واقع با تغییر خصوصیات رئولوژیکی، شرایط مرزی و مرزهای پنجره‌های عملیاتی نیز تغییر می‌کند و شرایط حفاری به حالت عادی که دبی حداکثر بیشتر از دبی حداقل است ($Q_{max} \geq Q_{min}$) خواهد رسید [۴۰].

بنابراین به‌طور خلاصه با در نظر گرفتن محدودیت‌های حفاری و عملیاتی و با توجه به پنجره هیدرولیک فضای حلقوی و پنجره بهینه‌سازی هیدرولیک مته به دنبال یافتن دبی و نازل‌های بهینه‌ای هستیم که علاوه بر افزایش سرعت حفاری، حفاری ایمن و کم‌هزینه‌ای را منجر شود.

برای افزایش دقت محاسبات بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری و توجه ویژه به تمیز سازی کل چاه و وزن معادل گل در حال گردش (ECD) نیاز است که محاسبات افت فشار در سیستم گردش گل حفاری با دقت بیشتری انجام شود تا علاوه بر بالا رفتن دقت محاسبات دبی بهینه، مقدار (ECD) یکی از محدودیت‌های فرآیند حفاری نیز هست با دقت بالاتری محاسبه گردد. همچنین همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی چاه نیز یکی از محدودیت‌های فرآیند حفاری است که در صورت محاسبه دقیق آن برای همه زوایای چاه، می‌توان علاوه بر افزایش دقت محاسبات بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری از تمیز سازی چاه در همه زاویه‌ها اطمینان حاصل کرد.

به همین منظور در ادامه این فصل ابتدا به مطالعه بررسی رئولوژی سیال حفاری و هیدرولیک حفاری و محاسبات افت فشار پرداخته می‌شود. سپس مفاهیم تمیز سازی چاه در همه زاویه‌های چاه ارائه می‌گردد.

۶-۲ رئولوژی

ویژگی‌های فیزیکی سیال حفاری نظیر وزن گل و خصوصیات رئولوژیکی آن به‌منظور بهینه‌سازی فرآیند حفاری بایستی همواره مورد ارزیابی و پایش قرار گیرند. این ویژگی‌های فیزیکی از دیدگاه‌های مختلفی به انجام یک عملیات حفاری موفقیت‌آمیز کمک می‌کنند که عبارت‌اند از:

- کنترل فشار چاه برای جلوگیری از ورود سیال سازند به چاه در حال حفاری.
- اعمال انرژی در مته برای افزایش نرخ نفوذ.
- ایجاد پایداری دیواره چاه در زون های تحت فشار^۱ و تنش.
- معلق نگه داشتن کنده های حفاری و مواد وزن افزا در زمان توقف حفاری.
- کمک به جداسازی راحت تر جامدات حفاری شده و گازهای همراه با سیال حفاری.
- خارج کردن کنده های تولید شده و تمیز سازی چاه.

هر چاه خصوصیات و شرایط خاص خود را دارد و ویژگی های فیزیکی سیال و خصوصیات رئولوژی آن باید متناسب با نیازهای چاه در حال حفاری و سیال مورد استفاده در آن چاه کنترل شود. ویژگی های رئولوژیکی سیال حفاری می تواند اثرات مثبت و منفی قابل ملاحظه ای بر عملیات حفاری داشته باشد؛ بنابراین برای حداکثر کردن تمیز سازی چاه، حداقل کردن فشار پمپ ها، جلوگیری از ورود سیال سازند به چاه و هرز روی سیال به سازند در حال حفاری بایستی تعادلی مناسب میان ویژگی های فیزیکی سیال حفاری برقرار باشد [۴۲].

رئولوژی و هیدرولیک موضوعات مرتبطی از مطالعات رفتار سیال هستند. رئولوژی مطالعه چگونگی تغییر شکل و جریان سیال است که در واقع به مطالعه ارتباط تنش برشی^۳ - نرخ برش^۴ و اثری که آن ها بر خصوصیات جریان درون لوله های حفاری و فضای حلقوی دارند، می پردازد [۴۲].

هیدرولیک، چگونگی تولید فشار ناشی از حرکت جریان سیال را بررسی می نماید. معمولاً رفتار جریان سیال قبل از استفاده از مدل ها و معادلات هیدرولیکی توسط مدل ها و معادلات رئولوژی بررسی می شود. به این صورت که ابتدا با استفاده از مدل های رئولوژی نوع و خصوصیات سیال تعیین می شود و سپس معادلات هیدرولیکی متناسب با آن استفاده می گردد [۴۲].

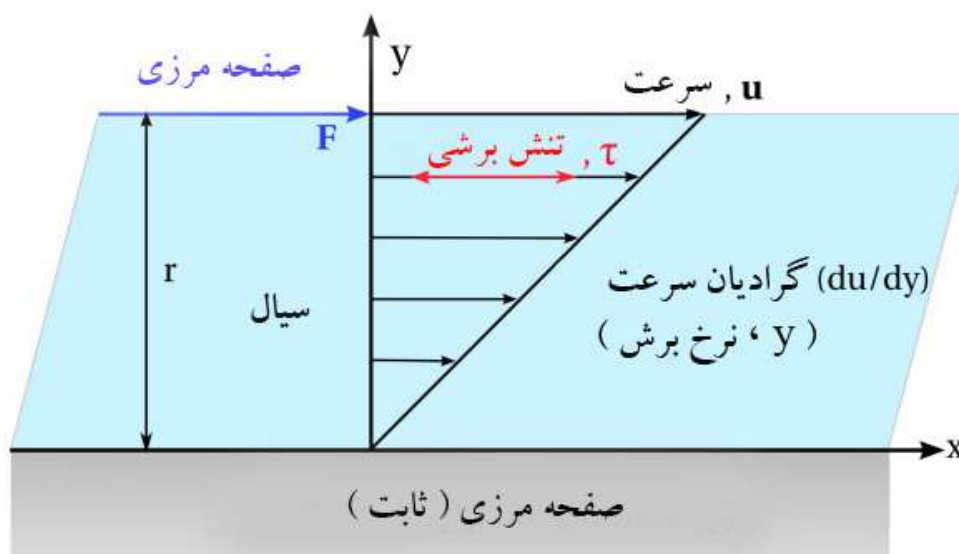
¹ Over pressured Zones

³ Shear Stress

⁴ Shear Rate

انواع مختلفی از گل ها در صنعت حفاری مورد استفاده قرار می گیرند که رفتار آن ها در سیستم گردش گل بسیار متفاوت است. افت فشارهای به وجود آمده در کانال ها و مجراها (رشته حفاری و فضای حلقوی چاه) به دلیل مقاومت سیال در برابر جریان است. برای ذرات در حال حرکت در طول دیواره مجرا یا کانال، نیروی اصطکاک ناشی از دیواره ها باعث مقاومت جریان می شود. نیروی اصطکاک در جهت مخالف جریان به ذرات در حال حرکت نیرو وارد می کند و سعی در کاهش سرعت جریانی ذرات دارد. ذرات سیالی که در طول دیواره قرار دارند نیروی اصطکاک به ذرات مجاور خود نیز وارد می کنند. نیروهای اصطکاک بین ذرات سیال-دیواره لوله و بین خود ذرات سیال، به خصوصیات سیال و تفاوت میان سرعت های جریانی ذرات سیال بستگی دارد. به علم بررسی این پدیده از مقاومت جریان، رئولوژی می گویند [۳۵].

رئولوژی علم مطالعه جریان یا تغییر شکل مواد است که در آن معمولاً جریان یا تغییر شکل، تحت عنوان نرخ برش و تنش برشی شرح داده می شود. نرخ برش به صورت گرادیان سرعت جریان در جهت عمود بر جهت جریان تعریف می شود. نرخ برش بیشتر موجب افزایش اصطکاک ذرات در حال حرکت می شود. اصطکاک میان ذرات توسط نیروی برشی بر واحد سطح لایه تحت برش (تنش برشی) اندازه گیری می شود [۴۳].



شکل ۲-۶: تنش برشی در رژیم جریان آرام، برای یک سیال نیوتونی [۱۰].

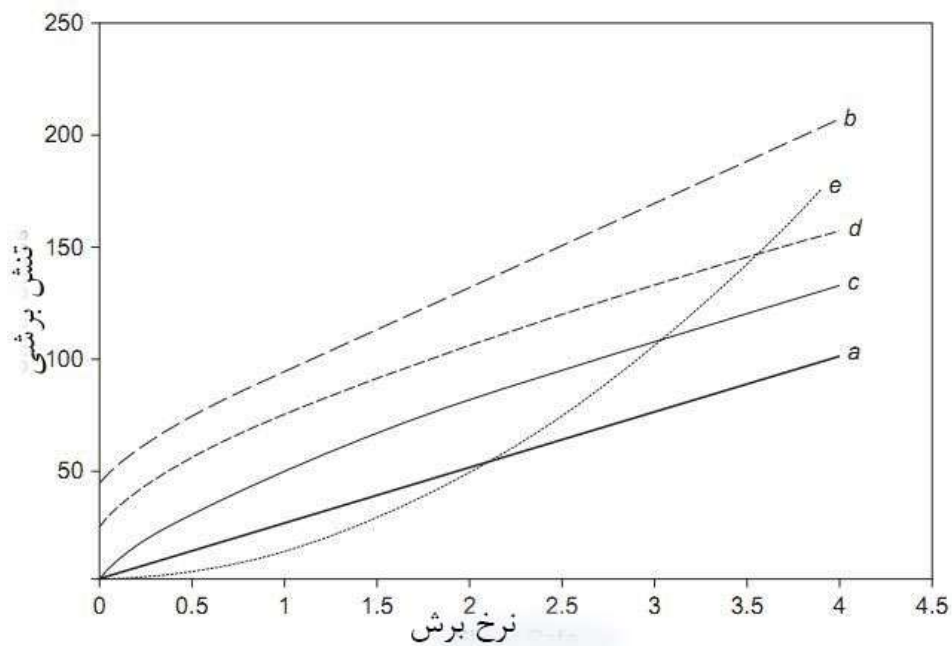
۲-۶-۱ دسته‌بندی گل‌های حفاری

در مطالعات رئولوژی، سیالات معمولاً بر اساس رفتارهای جریانی آنها به دسته‌های متفاوتی تقسیم‌بندی می‌شوند. شکل ۲-۷ پنج نوع مختلف از سیالاتی که اغلب در صنعت با آنها روبرو هستیم را نشان می‌دهد.

منحنی a سیالاتی را نشان می‌دهد که طبیعی‌ترین رفتار را دارند. تنش برشی متناسب با نرخ برش است. به این معنا که مقاومت جریان به صورت خطی با تغییر شکل جریان تغییر می‌کند. آب و نفت نمونه‌هایی از این دسته‌بندی هستند. این سیالات را سیالات نیوتونی می‌نامند [۳۵].

منحنی b به استثنا نواحی با نرخ برش پایین، رابطه‌ای خطی میان نرخ برش و تنش برشی را نشان می‌دهد. مقدار تنش برشی در نرخ برش صفر، مقداری غیر صفر است که این مقدار نقطه تسلیم^۱ نامیده می‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که برای به حرکت درآوردن سیال نیاز به نیروی اولیه می‌باشد. به دلیل رفتار پلاستیک این نوع از سیالات آنها را سیالات پلاستیک یا بینگهام پلاستیک می‌نامند. سیالات پلاستیک با افزودن جامداتی همچون رس و ذرات شبیه به رس به سیالات نیوتونی به دست می‌آیند [۳۵].

¹ Yield point



شکل ۲-۷: انواع مختلف سیالات پر کاربرد در صنعت حفاری [۳۵].

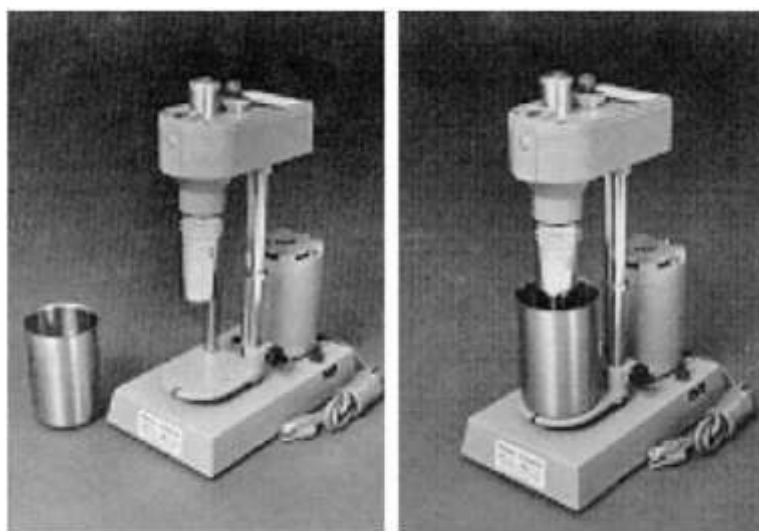
منحنی c رابطه‌ای غیرخطی میان نرخ برش و تنش برشی را نشان می‌دهد. در این سیالات هنگام تغییر شکل مقاومت جریان با سرعت کمتری نسبت به حالت خطی افزایش می‌یابد. این نوع از سیالات را سیال شبه پلاستیک یا پاورلاو می‌نامند. محلول‌های پلیمری معمولاً از این دست از سیالات هستند [۳۵].

منحنی d یک رابطه غیرخطی میان نرخ برش و تنش برشی همراه با یک تنش برشی غیر صفر در نرخ برش صفر را نشان می‌دهد. در این نوع از سیالات نیز یک نیروی اولیه برای تغییر شکل و حرکت سیال مورد نیاز است. همچنین مقاومت جریان با مقداری کمتر از حالت خطی، همراه با تغییر شکل افزایش می‌یابد. رفتار این سیال اولین بار توسط هرشل بالکلی (۱۹۲۶) مدل‌سازی و بررسی شد، بنابراین به این دسته از سیالات، سیال هرشل بالکلی می‌گویند [۳۵].

منحنی e رابطه غیرخطی میان نرخ برش و تنش برشی را نشان می دهد. مقاومت جریان با مقداری بیشتر از حالت خطی همراه با تغییر شکل افزایش می یابد. این دسته از سیالات را سیال دایالتنت^۱ می نامند که با افزودن مواد شبیه به نشاسته در سیالات نیوتونی به دست می آیند [۳۵].

۲-۶-۲ اندازه گیری خصوصیات رئولوژیکی گل حفاری

تجهیزات مختلفی برای اندازه گیری خصوصیات رئولوژیکی گل حفاری استفاده می شود. دستگاه ویسکومتر دوار FANN35 که در شکل ۲-۸ نمونه ای از آن نشان داده شده است بیشترین استفاده را در صنعت حفاری دارد. این دستگاه می تواند خصوصیات رئولوژیکی انواع سیالات را در شش سرعت ۳، ۶، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ دور بر دقیقه (rpm)^۲ محاسبه کند. البته بهتر است که این تست ها در چندین سرعت انجام شود تا مجموعه ای کامل از نرخ برش-تنش برشی حاصل گردد. رسم کردن داده ها در شناخت و تشخیص نوع سیال کمک خواهد کرد. بعد از تشخیص نوع سیال، خصوصیات رئولوژیکی آن سیال محاسبه می گردد [۳۵].



شکل ۲-۸: دستگاه ویسکومتر Faan 35A که برای اندازه گیری خصوصیت های رئولوژی استفاده می شود [۳۵].

¹ Dialtant

² Round Per Minute

۲-۶-۳ مدل سازی رئولوژیکی

هدف مدل سازی رئولوژیکی، منطبق کردن داده‌های آزمایشگاهی با مدل‌های ریاضی می‌باشد تا بتوان توصیف درستی از ارتباط تنش برشی-نرخ برش برای یک سیال ارائه کرد. داده‌های آزمایشگاهی توسط ویسکومتر اندازه‌گیری و جمع‌آوری می‌شود که تنش برشی را برای یک نرخ برشی اندازه‌گیری می‌کند. بعد از جمع‌آوری داده‌ها توسط ویسکومتر، این داده‌ها بر روی یک رئوگرام^۱ (نمودار نرخ برش-تنش برشی) رسم می‌شوند تا بهترین مدل‌های رئولوژی از نظر انطباق با این داده‌ها مشخص گردد.

تاکنون چندین مدل رئولوژی برای توصیف خصوصیات رئولوژیکی سیالات ارائه شده است. در تمام مدل‌ها، برای پیش‌بینی و محاسبه تنش برشی در هر نرخ برش به حداقل دو مقدار اندازه‌گیری شده تنش برشی در نرخ برش‌های متفاوت نیاز است. البته ذکر این نکته ضروری است که هیچ‌یک از مدل‌های رئولوژیکی نمی‌توانند توصیف کاملاً دقیقی از خصوصیات جریان سیالات حفاری در همه نرخ‌های برشی بدهند، هرچند بعضی از این مدل‌ها می‌توانند خصوصیات و رفتار جریان را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند. زمانی که مدل رئولوژی تعریف می‌شود ممکن است از داده‌های رئولوژی سیال برای مدل‌سازی رفتار سیال در سایر محیط‌های هندسی مانند جریان در لوله و یا فضا‌های حلقوی استفاده شود. مدل‌های رئولوژی به‌خودی‌خود عباراتی پیچیده به نظر نمی‌رسند اما برای استفاده از این مدل‌ها به‌منظور محاسبه افت فشارها باید بر اساس نرخ برش در دیواره‌ها به معادلات جریان تبدیل شوند که برای این کار از تصحیحات و ساده‌سازی‌های پیشرفته ریاضی استفاده می‌شود تا بتوان مدل‌های رئولوژی را به مدل‌ها و روابطی مناسب جهت بررسی رفتار جریان در درون لوله‌ها و فضای حلقوی چاه تبدیل نمود [۴۳].

^۱ Rheogram

از میان چندین مدل رئولوژی ارائه شده، مدل های بینگهام پلاستیک، پاورلاو، API RP13D، هرشل بالکلی، کی سون، رابرتسون استیف و سیسکو بهترین و رایج ترین مدل ها در صنعت نفت (حفاری) هستند.

۷-۲ هیدرولیک حفاری

زمانی که خصوصیات رئولوژیکی برای پیش بینی رفتار سیال اندازه گیری و مدل سازی شد سپس محاسبات هیدرولیکی به منظور در نظر گرفتن اثر سیال مورد نظر بر سیستم های فشاری انجام خواهد گرفت. مهم ترین فشارها در سیستم گردش گل حفاری شامل: فشار کلی سیستم (فشار پمپ)، افت فشار در مته و افت فشار در فضای حلقوی (که به وزن معادل در حال گردش گل حفاری تبدیل می شود) می شود [۳۵].

۱-۷-۲ رژیم های جریان

رژیم های جریانی رایج در عملیات حفاری شامل رژیم آرام، مغشوش (آشفته) و گذرا است. در جریان آرام، سیال همانند یک سری از لایه های موازی که با سرعت های یکنواخت و یا نزدیک به یکنواخت در حال حرکت هستند رفتار می کند. هیچ گونه حرکت بزرگ مقیاسی توسط ذرات سیال بین لایه ها رخ نمی دهد. لایه های سیال نزدیک به دیواره لوله یا چاه حرکت می کنند. جریان مغشوش توسط تغییرات سرعت بین ذرات جریان سیال مشخص می شوند که این تغییرات می توانند به صورت موازی یا عمود بر مسیر اصلی جریان باشند. این تغییرات سرعت موجب شکسته شدن و بر هم خوردن مرزهای میان لایه های سیال می گردد که این خود باعث ایجاد یک الگوی جریانی بی نظم می شود [۳۵].

جریان گذرا، رفتار و خصوصیات هر دو رژیم جریانی آرام و مغشوش را نشان می دهد. این رژیم جریانی اغلب ناحیه ای را توصیف می کند که جریان نه کاملاً آرام و نه کاملاً مغشوش است. رژیم

جریانی دیگری تحت عنوان جریان پلاگ^۱ نیز در تحقیقات گزارش شده است. این جریان، شرایط جریان با سرعت پایین و قبل از شروع جریان آرام را توصیف می کند که سیال همانند یک جسم همگن حرکت می کند. البته این نوع جریان در شرایط حفاری نرمال و معمولی رخ نمی دهد. معمولاً ترجیح داده می شود که به منظور حمل مناسب کنده ها و جلوگیری از فرسایش، جریان داخل فضای حلقوی آرام باشد. از طرف دیگر برای بهبود تمیز سازی و خروج کنده ها از ته چاه، جریان مغشوش برای ته چاه رژیم جریانی مناسب تری است [۴۲].

۲-۷-۲ سیستم هیدرولیکی گردش گل

شکل ۲-۹ یک سیستم رایج گردش گل حفاری را نشان می دهد. گل حفاری از تانک های فولادی به سمت پمپ گل حرکت می کند و از پمپ گل توسط لوله ایستا و کلی^۲ به طرف رشته حفاری که از دو بخش لوله های حفاری و تجهیزات ته چاهی^۳ تشکیل شده است (بیش تر طول تجهیزات ته چاهی از Drill collar است) حرکت می کند و پس از رشته حفاری به مته می رسد و از میان نازل های مته به سمت بالا حرکت می کند و از طریق فضای حلقوی میان رشته حفاری و دیواره چاه به سطح دکل می رسد و در نهایت از طریق تجهیزات حذف آلودگی به سمت تانک مکش حرکت می کند. تجهیزات دفع و حذف آلودگی می تواند شامل الک لرزان^۴، دفع کننده گاز^۵، هیدروسیکل ها^۶ (دفع کننده ماسه^۷ و دفع کننده های لجن ها^۸) و دستگاه های گریز از مرکز شود. به یک سیستم یکپارچه دفع کننده گاز و لجن، تمیز کننده گل می گویند [۳۷].

¹ Plug Flow

² Kelly

³ Bottom Hole Assembly (BHA)

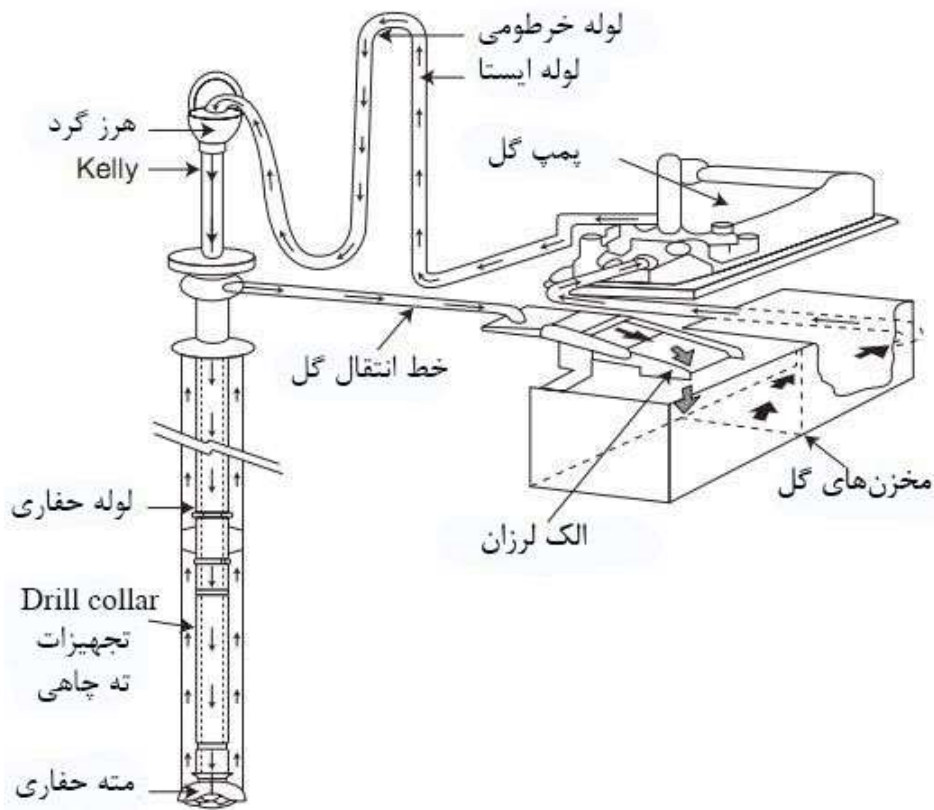
⁴ Shale Shaker

⁵ Degasser

⁶ Hydrocyclones

⁷ desanders

⁸ desilters



شکل ۲-۹: سیستم گردش گل حفاری [۳۵].

۳-۷-۲ افت فشارهای اصطکاکی

برای به جریان درآمدن سیال در سیستم در حال گردش، سیال حفاری باید بر نیروهای اصطکاکی میان لایه های سیال و ذرات جامد، دیواره لوله و دیواره چاه غلبه کند؛ بنابراین فشار پمپ متناظر با مجموع نیروها است [۳۵]:

$$P_p = \Delta P_s + \Delta P_{dp} + \Delta P_{dc} + \Delta P_{mt} + \Delta P_b + \Delta P_{dca} + \Delta P_{dpa} \quad (35-2)$$

که در رابطه فوق، ΔP_s افت فشار در تجهیزات سطحی، ΔP_{dp} افت فشار در لوله حفاری، ΔP_{dc} افت فشار در لوله کولار^۱، ΔP_{mt} افت فشار در موتور گل^۲، ΔP_b افت فشار در مته، ΔP_{dca} افت فشار در فضای حلقوی اطراف Drill Collar و ΔP_{dpa} افت فشار فضای حلقوی اطراف لوله حفاری می باشد.

¹ Drill Collar

² Mud Motor

افت فشار اتلافی به افت فشار کلی سیستم گردش گل، منهای افت فشار مته می گویند که به صورت رابطه (۳۶-۲) مطرح می شود [۳۵]:

$$\Delta p_d = \Delta p_s + \Delta P_{dp} + \Delta p_{dc} + \Delta p_{dca} + \Delta p_{dpa} \quad (36-2)$$

و اگر موتور گل نیز استفاده شود فشار پمپ به صورت رابطه (۳۷-۲) نشان داده می شود [۳۵].

$$p_p = \Delta p_b + \Delta p_d \quad (37-2)$$

افت فشار اصطکاکی، تابعی از فاکتورهای مختلفی همچون رفتار رئولوژیکی سیال (نیوتونی یا غیر نیوتونی)، رژیم جریان (آرام، آشفته یا گذرا)، خصوصیات سیال حفاری (وزن مخصوص و گرانیوی)، دبی سیال، هندسه چاه و ترکیب رشته حفاری است [۱۵].

زمانی که بهترین مدل رئولوژی از لحاظ انطباق با داده های آزمایشگاهی انتخاب شد و خصوصیات رئولوژیکی سیال نیز محاسبه گردید، با محاسبه عدد رینولدز و با استفاده از معادلات مناسب می توان رژیم جریانی را مشخص کرد. مقدار محاسبه شده عدد رینولدز (N_{Re}) با مقدار بحرانی عدد رینولدز (N_{Rec}) جهت تعیین آرام یا آشفته بودن جریان مقایسه می شود. مرحله بعد محاسبه ضریب اصطکاکی^۱ (f) می باشد. این ضریب تابعی از خصوصیات رئولوژیکی، زبری^۲ لوله و عدد رینولدز است [۱۵].

زمانی که ضریب اصطکاک محاسبه شد، توسط معادلات مناسب هر مدل رئولوژی، می توان افت فشار اصطکاکی را محاسبه نمود [۱۵].

¹ Friction Factor

² Roughness

۱-۳-۷-۲ افت فشار تجهیزات سطحی

افت فشار سطحی شامل افت فشارهای بین گیج فشاری لوله ایستا و لوله حفاری می شود [۴۲]. در واقع تجهیزات سطحی شامل لوله ایستا، لوله منعطف^۱، هرز گرد^۲ و کلی می باشد. جدول ۲-۲ قطر داخلی و طول هر یک از این اجزا را نشان می دهد. برای کاربردهای میدانی، افت فشار کلی در تجهیزات سطحی بر اساس هندسه هریک از اجزای این تجهیزات محاسبه نمی شود. در عوض، افت فشار سطحی بر اساس طول معادل لوله حفاری محاسبه می شود. جدول ۳-۲ طول معادل لوله حفاری برای ترکیب های معمول تجهیزات سطحی را نشان می دهد [۳۵].

جدول ۲-۲: قطر داخلی و طول تجهیزات سطحی [۳۵].

Component	Combination1		Combination2		Combination3		Combination4	
	ID (in)	Length (ft)	ID (in)	Length (ft)	ID (in)	Length (ft)	ID (in)	Length (ft)
Stand Pipe	3	40	3.5	40	4	45	4	13.7
Rotary hose	2	45	2.5	55	3	55	3	16.8
Swivel	2.5	4	2.5	5	2.5	5	3	1.8
Kelly pipe	2.2	40	3.3	40	3.3	40	4	12.2

جدول ۳-۲: طول معادل لوله حفاری برای ترکیب های معمول تجهیزات سطحی [۳۵].

Equivalent Drill Pipe	Combination 1 (ft)	Combination 2 (ft)	Combination 3 (ft)	Combination 4 (ft)
3.5", 13.3 lb/ft	437	161		
4.5", 16.6 lb/ft		761	479	340
1465", 19.5 lb/ft			816	576

¹ Rotary Hose

² Swivel

بعد از مشخص نمودن نوع اجزای سطحی و تعیین طول و قطر معادل لوله حفاری برای آن ترکیب انتخاب شده، می توان از روش معمول محاسبه افت فشار در لوله ها، افت فشار اصطکاکی در تجهیزات سطحی را محاسبه نمود.

۲-۷-۳-۲ افت فشار در رشته حفاری و فضای حلقوی (جریان در لوله و فضای حلقوی)

برای محاسبه افت فشار اصطکاکی در لوله ها و فضای حلقوی، از روش های تحلیلی یا عددی استفاده می شود. در روش های تحلیلی، توسط معادلات ساده می توان در مدت زمان کوتاه تری مقدار افت فشار را محاسبه نمود؛ اما به دلیل فرضیات ساده سازی که در این نوع راه حل ها ارائه می گردد دقت این روش ها آن چنان مناسب نخواهد بود. از طرف دیگر روش های حل عددی، روش های زمان بر اما با دقت مناسب می باشند.

در این پایان نامه برای انجام محاسبات افت فشار از یک روش حل عددی استفاده می شود که علاوه بر دقت بالا روش زمان بری نیز نیست؛ اما این روش حل عددی تنها برای شش مدل رئولوژی رایج بینگهام پلاستیک، پاورلاو، هر شل بالکلی، کی سون، رابرتسون - استیف و کاربرد دارد و برای محاسبه افت فشار توسط مدل رئولوژی API بایستی از روش حل تحلیلی مخصوص به همین مدل رئولوژی استفاده شود. دلیل این موضوع نیز این می تواند باشد که مدل رئولوژی API مدلی بسیار رایج و میدانی برای محاسبه افت فشار در صنعت حفاری است و این مدل در واقع اصلاح شده مدل پاورلاو می باشد و به دلیل اعمال تغییراتی که در مدل پاورلاو داده شده است استفاده از این مدل در روش های عددی را غیرممکن می کند.

جریان در لوله ها:

برای محاسبه افت فشار سیالات غیر نیوتونی در لوله‌ها توسط روش‌های عددی، از یک مدل هیدرولیکی کلی و تعمیم‌یافته^۱ که مستقل از مدل‌های رئولوژی است استفاده می‌شود. این مدل تعمیم‌یافته شاخص عمومی جریان^۲ (n) در نرخ برش‌های مختلف را ثابت در نظر نمی‌گیرد. بر اساس معادلات جریان در لوله‌ها، معادلات صریحی برای ارتباط بین تنش برشی دیواره^۳ و جریان حجمی برای شش مدل رئولوژی رایج بینگهام پلاستیک، پاورلاو، هر شل بالکلی، کی سون، رابرتسون - استیف و سیسکو به دست می‌آید و این معادلات به منظور محاسبه دقیق نرخ برش دیواره^۴ و تنش برشی دیواره به صورت عددی حل می‌شوند. همچنین روش تئوری محاسبه شاخص عمومی جریان (n') برای تمام سیالات غیر نیوتونی مستقل از زمان ارائه می‌شود که این روش با فرض ثابت نبودن شاخص عمومی جریان برای تمام مدل‌های رئولوژی رایج کاربرد دارد. بعلاوه، رابطه‌ای جامع نیز برای محاسبه عدد رینولدز تعمیم‌یافته^۵ ارائه می‌شود که برای محاسبه افت فشار مستقل از نوع مدل رئولوژی استفاده می‌شود.

[۴۰]

جریان در فضای حلقوی:

برای محاسبه افت فشار اصطکاکی در فضای حلقوی چاه همانند جریان در لوله از یک مدل کلی و تعمیم‌یافته مستقل از مدل رئولوژی استفاده می‌شود. این مدل نیز با فرض عدم ثبات شاخص عمومی جریان در نرخ برش‌های متفاوت توسعه‌یافته است. بر اساس مدل فضای حلقوی، عبارات و معادلات جریان در فضای حلقوی برای همه مدل‌های رئولوژی رایج به دست می‌آید و این عبارات و معادلات جریانی، به منظور محاسبه نرخ برش و تنش برشی در دیواره‌ها با روش‌های عددی به دست می‌آیند

[۴۱].

¹ Generalized Hydraulic Model

² Generalized Flow Index

³ Wall Shear Stress

⁴ Wall Shear Rate

⁵ Generalized Reynolds Number

۳-۳-۷-۲ افت فشار در مته

هدف از نصب نازل های جت سیال در مته، بهبود عملیات تمیز سازی ته چاه توسط سیال حفاری است؛ زیرا به دلیل کوچک بودن قطر نازل های مته، سیال حفاری درون نازل ها به سرعت بالایی می رسد که به این سرعت، سرعت نازل می گویند و توسط معادله (۳۸-۲) محاسبه می شود [۳۵].

$$v_n = 0.32086 \frac{q}{A_T} \quad (38-2)$$

v_n سرعت نازل و فوت بر ثانیه، q دبی جریان گل گالن بر دقیقه و A_T مساحت کل نازل ها بر حسب اینچ مربع می باشد.

افت فشار های مته حفاری به خاطر نیروی اصطکاک وارده از طرف سیال نمی باشد بلکه شتاب سیال حفاری در نازل های مته مهم ترین دلیل این افت فشار است. این افت فشار به صورت رابطه (۳۹-۲) بیان می شود [۳۵].

$$\Delta P_b = \frac{\rho q^2}{12.031 C_d^2 A_T^2} \quad (39-2)$$

C_d ثابت تخلیه نازل می باشد و پارامتری بی بعد است و پارامتر ρ نیز وزن مخصوص (چگالی سیال) بر حسب پوند بر گالن است.

ثابت تخلیه شرایط غیر ایده آل نظیر اثرات اصطکاک ویسکوز را در نظر می گیرد. مقدار این پارامتر توسط چندین محقق و به صورت آزمایشگاهی برای نازل های مختلف مته حفاری به دست آمده است. این محققان نشان داده اند که ضریب تخلیه نازل های مته متناسب با نوع نازل ها و اندازه آن ها تا مقدار ۰/۹۸ می رسد، اما آن ها مقدار ۰/۹۵ را به عنوان مقدار معقول این پارامتر پیشنهاد کرده اند. [۷] [۳۵]

[۳۷]

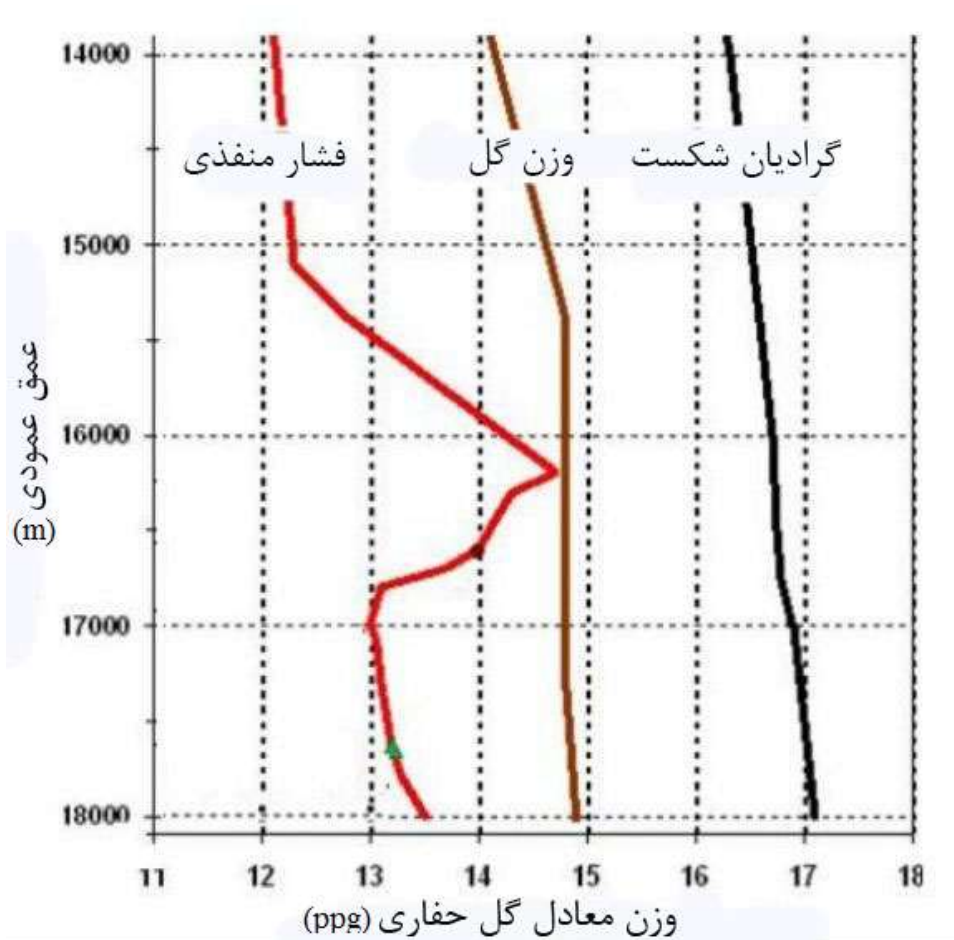
۴-۷-۲ وزن معادل گل در حال گردش (ECD):

فشار وارد بر سازندهای زیرین و در حال حفاری برابر با افت فشار اصطکاکی در فضای حلقوی از عمق موردنظر تا خروجی فضای حلقوی به علاوه فشار هیدرواستاتیک وارده از طرف وزن مؤثر گل حفاری می باشد. این وزن معادل به عنوان وزن معادل گل در حال گردش نامیده می شود و مطابق معادله (۴۰-۲) محاسبه می گردد [۴۶].

$$ECD = \rho_e + \frac{P_{AF}}{0.052TVD} \quad (40-2)$$

P_{AF} افت فشار اصطکاکی در فضای حلقوی، ρ_e وزن مؤثر گل حفاری و TVD^1 عمق عمودی چاه می باشد. به منظور محاسبه مقدار دقیق فشار ته چاهی و جلوگیری از مشکلات ناشی از فشارهای اضافی ته چاهی، محاسبه دقیق مقدار ECD، امری حیاتی و ضروری است و در واقع محاسبه ECD برای حصول اطمینان از قرارگیری فشار در حال گردش سیستم گل حفاری بین دو مقدار فشار منفذی و فشار شکست سازند (پنجره گل عملیاتی) است. نگه داشتن این مقدار در این پنجره گل برای جلوگیری از هرز روی سیال یا شکست سازند و در نهایت پایداری دیواره چاه امری ضروری است. شکل ۱۰-۲ مثالی از پنجره گل را نشان می دهد [۴۷].

¹ True Vertical Depth



شکل ۲-۱۰: پنجره ایمن گل حفاری [۴۷].

۸-۲ تمیز سازی چاه

یکی از اولین کاربردهای سیال در حال گردش در حفاری چرخشی، تمیز سازی مناسب چاه می باشد. این موضوع هم شامل تمیز سازی و خارج کردن کنده های حفاری از ته چاه و زیر دندانه های مته و هم شامل انتقال مؤثر و کارآمد کنده به سطح می شود. به توانایی انتقال کنده های حفاری ظرفیت حمل سیال حفاری می گویند [۳۸].

تمیز سازی نامناسب چاه باعث بروز مشکلات هزینه بری نظیر گیر لوله حفاری، سایش زودهنگام مته، کاهش نرخ حفاری، شکست سازند، گشتاور و کشش بسیار بالا و هرز روی سیال می شود [۱۹].

به طور مثال در صورتی که خرده های سنگ (کننده های حفاری) به سرعت از زیر دندان های مته خارج نشوند موجب سایش بیش از حد مته حفاری و کند شدن روند حفاری می گردد. افزایش بیش از حد غلظت کنده های حفاری در فضای حلقوی چاه وزن مؤثر گل را نیز افزایش می دهد که باعث اعمال فشارهای نامتعارف و بیش از حد به دیواره چاه می شود که سرانجام باعث شکست سازند و کاهش نرخ نفوذ می گردد. ته نشینی کنده ها در اطراف تجهیزات ته چاهی، هنگام بالا و پایین کردن و اتصال لوله ها می تواند باعث گیر لوله حفاری شود. به منظور شناخت این ویژگی ها و تأثیر آن ها بر هزینه های کلی، عملیات شناخت کافی از پدیده انتقال کنده های حفاری توسط سیال حفاری امری ضروری است [۳۸].

۹-۲ تمیز سازی ته چاه

اولین نگرانی در خصوص تمیز سازی چاه، تمیز سازی مناسب ته چاه (زیر و اطراف مته) می باشد. این موضوع به دلایل زیر اهمیت ویژه ای دارد:

- نرخ نفوذ مته به تمیز سازی زیر و اطراف مته بستگی دارد.
- در صورتی که کنده های تولید شده در زیر و اطراف مته تجمع یابند، در اثر گرم شدن بیش از حد مته به بعضی از مته ها آسیب جدی وارد می شود.
- تمیز سازی نامناسب اطراف مته از تشخیص تغییر خصوصیات سازند که از طریق نرخ نفوذ تعیین می گردد جلوگیری می کند.

برای رسیدن به سطح مناسبی از تمیز سازی چاه، نیاز است که از حداکثر قدرت پمپ ها برای اعمال بیشترین نیروی هیدرولیکی به مته استفاده شود و این موضوع با اعمال حداکثر فشار و دبی پمپ انجام می شود [۳۵].

معیارهای متفاوتی برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری به منظور حداکثر کردن تمیز سازی چاه و در نتیجه نرخ نفوذ وجود دارد. این معیارها شامل حداکثر نیروی هیدرولیکی مته، حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته و حداکثر سرعت جت نازل‌های مته می‌باشند [۳۶] [۳۸].

درواقع تمیز سازی ته چاه (مته و اطراف مته) زمانی در وضعیت مطلوب قرار دارد که تمام کنده‌های تولیدشده با همان سرعتی که تولید می‌شوند از زیر و اطراف مته خارج شوند و این وضعیت زمانی حاکم می‌شود که هر یک از سه معیار بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری یا تمیز سازی ته چاهی رعایت شوند. به عبارت دیگر، زمانی که قدرت هیدرولیکی مته یا نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته یا سرعت جت سیال نازل‌های مته در حداکثر مقدار خود قرار بگیرند کنده‌های تولیدشده با همان سرعت تولیدی از زیر مته خارج می‌شوند و در این حالت است که می‌توان از تمیز سازی ته چاه اطمینان حاصل نمود.

بنابراین برای تمیز سازی ته چاه، باید با استفاده از حداکثر توان پمپ‌ها، دبی گلی اعمال شود که موجب حداکثر شدن قدرت هیدرولیکی مته یا نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای مته و یا سرعت جت سیال نازل‌های مته بشود که در این شرایط می‌توان از تمیز سازی ته چاه اطمینان حاصل نمود.

۱۰-۲ انتقال کنده‌ها به سطح

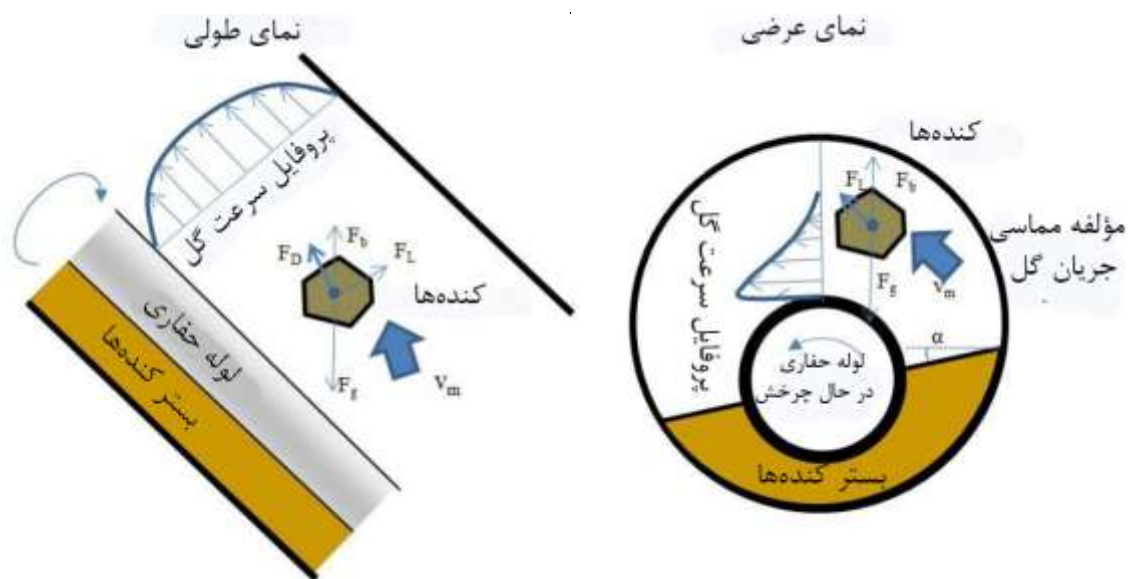
۱-۱۰-۲ مکانیسم انتقال کنده‌ها

کنده‌های معلق در سیال در حال حرکت، تحت تأثیر چندین نیرو قرار می‌گیرند که اولین دسته از نیروها، نیروهای استاتیک می‌باشند که شامل نیروی گرانش F_g و نیروی شناوری F_b می‌شوند. علاوه بر این، یک نیروی دینامیکی نیز وجود دارد که همان نیروی اصطکاکی است که این نیروی اصطکاکی نیز به نیروی کششی^۱ در (جهت جریان) و نیروی بالابرنده^۲ (عمود بر جهت جریان) تجزیه می‌شود [۴۸].

^۱ Drag

^۲ Lift

سرعت سیال، نیروهای کششی و بالابرنده را کنترل می کند. با در نظر گرفتن تنها یک سرعت کل^۱ بر برییل (متوسط سطح مقطع)، محاسبه سرعت نهایی سقوط کنده ها نسبت به سیال ممکن خواهد بود که اگر مؤلفه سرعت نهایی سقوط^۲ کنده ها در جهت محور چاه مثبت باشد کنده ها منتقل خواهند شد [۴۹].



شکل ۲-۱۱: نیروهای وارد بر کنده های معلق در گل حفاری [۴۹].

انتقال کنده ها به سطح، برای چاه های افقی و انحرافی یا مایل بسیار پیچیده تر و سخت تر از چاه های عمودی و نزدیک به عمود است.

در چاه های عمودی و نزدیک به عمود (۰ تا ۳۰ درجه)، کنده های حفاری در صورتی به سطح انتقال می یابند که مؤلفه محوری^۳ سرعت سیال از سرعت ته نشینی کنده ها در سیال حفاری بیشتر باشد. تفاوت میان سرعت متوسط ذرات (کنده ها) و سرعت متوسط سیال را سرعت حمل یا انتقال^۴ و نسبت میان این دو سرعت را نسبت انتقال^۵ می نامند. این دو پارامتر معمولاً برای تعریف راندمان و کارایی حمل کنده ها در چاه های عمود و نزدیک به عمود استفاده می شوند [۵۰].

¹ Bulk Velocity
² Terminal Velocity
³ Axial Component
⁴ Transport Velocity
⁵ Transport Ratio

برای چاه‌های با زوایای بالا (مایل و افقی)، نیروی کشش سیال و نیروی گرانشی اعمال شده به کنده‌ها تقریباً عمود بر هم هستند. به عبارت دیگر، کشش سیال اثر جبرانی و خنثی‌کنندگی بسیار کمی بر روی ته‌نشینی ناشی از گرانش دارد؛ بنابراین کنده‌ها تمایل دارند بر روی قسمت‌های زیرین چاه تجمع یابند و یک بستر ثابت^۱ را تشکیل دهند [۴۹]. بعلاوه، این کنده‌ها به صورت الگوهای جریانی مختلفی همچون محلول معلق (همگن و غیر همگن)^۲، بسته‌های در حال حرکت^۳، بستر در حال حرکت^۴ و به صورت غلتان و لغزشی^۵ بر روی بستر تشکیل شده توسط ذرات تجمع یافته حمل می‌شوند [۵۱]. با در نظر گرفتن فیزیک جریان‌ها، پیش‌بینی ارتفاع بسترها و سرعت آن‌ها تنها بر اساس سرعت ته‌نشینی کنده‌ها امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین، برای بررسی فرآیند انتقال کنده‌ها به مدل‌های فیزیکی نیز نیاز خواهد بود. به همین دلیل است که پارامترهای متفاوتی همچون: حداقل سرعت سیال برای به حرکت درآوردن همه‌ی کنده‌ها (حداقل سرعت حمل کنده‌ها)، ارتفاع بسترهای ثابت کنده‌های حفاری^۶، نرخ تجمع و فرسایش و غلظت حجمی کنده‌ها برای ارزیابی راندمان و کارایی حمل کنده‌ها در چاه‌های مایل و افقی استفاده می‌شوند [۵۲].

¹ Constant Cuttings Bed

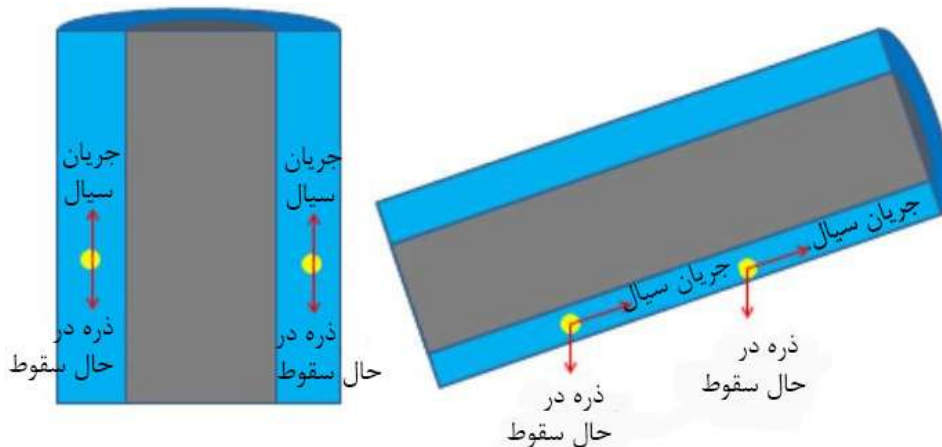
² Homogenous/Heterogeneous Suspension

³ Moving Clusters

⁴ Moving Bed

⁵ Rolling/Sliding

⁶ Cuttings Bed Height



شکل ۲-۱۲: شماتیکی از فرآیند انتقال کنده‌ها به سطح، در چاه‌های عمودی و مایل یا افقی [۵۲].

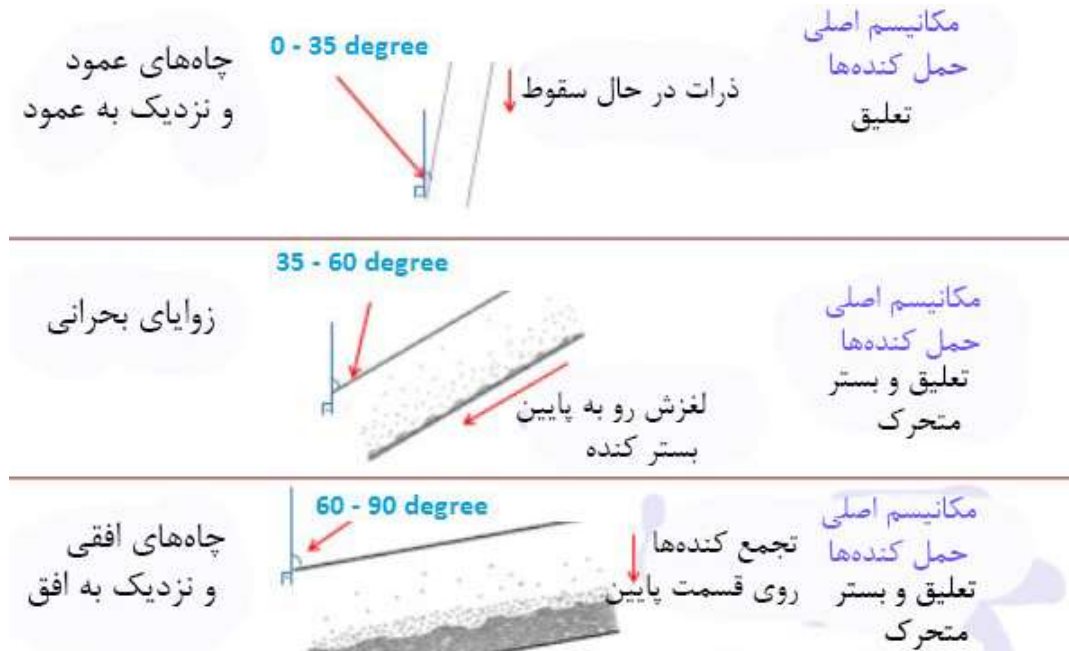
بر اساس مکانیسم‌های حمل کنده‌ها و مشکلات پیش رو، زوایای چاه به سه دسته تقسیم می‌شود، اولین دسته زوایای نزدیک به عمود است که معمولاً زاویه ۰ تا ۳۰ یا ۰ تا ۳۵ درجه دارند. تنها الگوی حمل کنده‌ها در این دسته، الگوی ذرات معلق در سیال است و تجمع کنده‌ها به صورت تشکیل بستر در این دسته وجود نخواهد داشت. اصلی‌ترین مشکل در این دسته، ته‌نشینی ذرات به دلیل نبود سرعت کافی سیال برای بلند کردن و معلق نگاه‌داشتن کنده‌ها است. دومین دسته که زوایای بحرانی نیز می‌باشند معمولاً در زاویه ۳۵ تا ۶۰ درجه قرار می‌گیرند. ذرات به صورت معلق و نیز غلتان و لغزشی بر روی قسمت پایینی فضای حلقوی، به سطح منتقل می‌شوند. این ذرات تمایل دارند به سمت پایین ته‌نشین شوند و یک بستر ناپایدار و نازک را بر روی قسمت پایینی فضای حلقوی تشکیل دهند. مشکل اصلی در این دسته، تشکیل آنی و سریع غلظت بالای کنده‌ها در نتیجه لغزش^۱ بسترهای ناپایدار^۲ است. دسته سوم، زوایای نزدیک به افق را که معمولاً در زاویه ۶۵ تا ۹۰ درجه قرار می‌گیرند در برمی‌گیرد. بیشتر این ذرات به صورت بسترهای در حال حرکت و سهم کمی از آن‌ها به صورت ذرات معلق در سیال منتقل می‌شوند. مشکل اصلی در این دسته، تشکیل بسترهای ضخیم و ثابت که به سختی از بین می‌روند، می‌باشد [۵۳].

^۱ Back Sliding

^۲ Unstable Beds

مکانیسم‌های انتقال کنده‌ها و مشکلات پیش رو در زوایای مختلف در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده

است.



شکل ۲-۱۳: مکانیسم‌های مختلف حمل کنده‌ها [۵۲].

زمانی که لوله‌های حفاری در مرکز فضای حلقوی قرار ندارند، سرعت سیال نزدیک دیواره‌ها و یا قسمت پایین فضای حلقوی (برای یک قسمت زاویه‌دار) یکنواخت نیست؛ بنابراین ممکن است سرعت محلی^۱ باوجود مناسب بودن در قسمت‌های بالایی فضای حلقوی نتواند کنده‌ها را حمل کند. در نتیجه ذراتی که نتوانند وارد جریان اصلی سیال شوند منتقل نخواهند شد و به طرف بستر کنده‌ها ته‌نشین می‌شوند؛ اما اگر جریان سیال حفاری در حالت آشفته باشد، پتانسیلی برای بلند کردن این کنده‌های ته‌نشینی شده بر روی بسترهای کنده به طرف جریان اصلی سیال وجود خواهد داشت که در این صورت کنده‌ها می‌توانند به سطح حمل شوند. چرخش لوله حفاری، همراه باهم زدن سیال نیز می‌تواند اثری مشابه ایجاد کند. چرخش لوله حفاری باعث ایجاد میدان جریان ثانویه^۲ در سیال حفاری می‌شود که

¹ Local Velocity

² Secondary Flow

این میدان ثانویه عمود بر محور فضای حلقوی چاه است که بایستی با میدان سرعت محوری جریان ترکیب شود. ترکیب این دو میدان سرعت و ایجاد جریان های ثانویه، باعث بلند کردن کنده های حفاری از قسمت پایین فضای حلقوی به طرف جریان اصلی می شود. چرخش لوله حفاری باعث ایجاد آشفتگی های محلی می شود که لزوماً در جریان اصلی وجود ندارد. همچنین این اثر آشفتگی می تواند به انتقال و حمل ذرات به طرف مسیر اصلی حرکت سیال کمک کند، جایی که این ذرات می توانند دوباره به سمت پایین جریان فرستاده شوند [۴۹].

بنابراین مدل هایی که بر اساس سرعت سقوط ذرات هستند تنها زمانی کاربرد دارند که سرعت سیال در عرض سطح مقطع جریان و در اطراف محور چاه به صورت تقریباً متقارن باشد (به طور مثال، جایی که اثر چرخش لوله حفاری و هم مرکز نبودن لوله و چاه^۱ بسیار اندک است) [۴۹] که این شرایط متناظر با قسمت های عمودی و نزدیک به عمود چاه است. مطالعات آزمایشگاهی این محدوده را زوایای حدود ۰ تا ۳۵ درجه نشان می دهند [۵۳].

بر اساس مکانیسم های حمل کنده ها، الگوهای جریانی در زوایای مختلف و میزان تأثیر پارامترهایی نظیر چرخش لوله حفاری و خروج از مرکز لوله در زوایای مختلف، چاه را می توان به دو قسمت عمود و نزدیک به عمود (زاویه کمتر از ۳۵ درجه)، مایل و افقی (زاویه ۳۵ تا ۹۰ درجه) تقسیم کرد.

۲-۱۰-۲ تمیز سازی چاه در بخش های عمود و نزدیک به عمود

قابلیت حمل کنده ها در چاه های عمودی معمولاً با محاسبه سرعت سقوط ارزیابی می شود. سرعت سقوط نیز به اندازه، وزن مخصوص و شکل ذرات، رئولوژی و سرعت سیال و هندسه لوله و چاه بستگی دارد. برای چاه های عمودی، عبارات سرعت حمل کنده ها و نسبت حمل، اغلب به عنوان توانایی حمل کنده ها در نظر گرفته می شود [۶].

سرعت حمل کنده ها طبق معادله (۲-۴۱) محاسبه می شود [۶]:

¹ Eccentricity

$$V_T = V_a - V_{Slip} \quad (۴۱-۲)$$

که V_T سرعت حمل کنده‌ها، V_a سرعت سیال در فضای حلقوی چاه و V_{Slip} سرعت سقوط کنده‌ها در سیال می‌باشد.

نسبت حمل نیز به صورت سرعت حمل تقسیم بر سرعت سیال در فضای حلقوی تعریف می‌شود [۶].

$$F_T = \frac{V_T}{V_a} = 1 - \frac{V_{Slip}}{V_a} \quad (۴۲-۲)$$

در صورتی که نسبت حمل مثبت باشد، کنده‌ها سرعت رو به بالا خواهند داشت و به سطح منتقل می‌شوند؛ بنابراین نسبت حمل کنده‌ها می‌تواند معیار بسیار خوبی از ظرفیت حمل یک سیال حفاری بخصوص باشد [۶].

غلظت کنده‌های حفاری در فضای حلقوی چاه با فاکتورهایی نظیر نسبت حمل کنده‌ها، اندازه چاه، نرخ نفوذ و دبی گل حفاری در ارتباط می‌باشد. غلظت حجمی کنده‌ها در فضای حلقوی چاه، با در نظر گرفتن نرخ تولید کنده‌ها در مته و نسبت حمل کنده‌ها به دست می‌آید [۶].

۱-۲-۱۰-۲ مدل پراکندگی

در شرایط چاه با زاویه کم و دبی جریانی بالا، کنده‌های حفاری در فضای حلقوی پخش می‌شوند؛ بنابراین برای محاسبه غلظت کنده‌ها در فضای حلقوی از مدل پراکندگی استفاده می‌شود. بر طبق این مدل، غلظت ناحیه‌ای کنده‌ها در فضای حلقوی چاه ارتباط مستقیمی با سرعت سقوط کنده‌ها دارد.

سرعت ظاهری کنده‌ها برابر است با [۱۹]:

$$v_{SC} = \frac{ROP \cdot A_w}{A_{annulus}} \quad (۴۳-۲)$$

که ROP سرعت نفوذ مته در سازند (سرعت تولید کنده‌ها)، A_w مساحت کل سطح مقطع چاه و

$A_{annulus}$ مساحت سطح مقطع فضای حلقوی چاه هست.

سرعت ظاهری سیال نیز برابر است با [۱۹]:

$$v_{SL} = \frac{Q_L}{A_{annulus}} \quad (۴۴-۲)$$

Q_L دبی سیال می باشد.

غلظت ورودی کنده ها برابر است با [۱۹]:

$$C_F = \frac{ROP.A_w}{ROP.A_w + Q_L} = \frac{v_{SC}}{v_{SL} + v_{SC}} \quad (۴۵-۲)$$

میانگین غلظت در جای کنده ها در سطح مقطع جریان برابر است با [۱۹]:

$$C_C = \frac{1}{A} \int_0^A \varepsilon_C dA \quad (۴۶-۲)$$

که $A = A_{annulus}$ و ε_C نسبت حجمی و در جای کنده های حفاری در یک نقطه خاص می باشد.

متوسط سرعت سقوط یا سرخوردگی بین سیال حفاری و کنده ها برابر است با [۱۹]:

$$V_{Slip} = v_L - v_C = \frac{v_{SL}}{1 - C_C} - \frac{v_{SC}}{C_C} \quad (۴۷-۲)$$

معادله ترکیبی برابر است با [۱۹]:

$$v_M = v_{SL} + v_{SC} = \frac{ROP.A_{bit} + Q_L}{A_{annulus}} \quad (۴۸-۲)$$

می توان غلظت حجمی کنده ها C_C را با استفاده از عبارات v_m و v_{slip} ، مطابق با معادله (۴۷-۲) به

دست آورد [۱۹]:

$$C_C = -\left(\frac{v_m - v_{Slip}}{2v_{Slip}}\right) + \left[\left(\frac{v_m - v_{Slip}}{2v_{Slip}}\right)^2 + \frac{v_m C_F}{v_{Slip}}\right]^{0.5} \quad (۴۹-۲)$$

$$V_{Slip} = V_{Slip}^* / \cos \theta \quad (۵۰-۲)$$

v_{Slip}^* سرعت سقوط یا سرخوردگی کنده ها در چاه عمودی و θ زاویه شیب چاه است.

بنابراین برای به دست آوردن نسبت حمل کنده‌ها و غلظت کنده‌ها که ظرفیت حمل سیال حفاری را مشخص می‌کنند، سرعت سقوط یا سرخوردگی کنده‌ها در سیال حفاری می‌بایست محاسبه گردد. روابط بسیار مختلفی برای تخمین سرعت سقوط کنده‌ها در حین حفاری ارائه شده است که از جمله این روابط می‌توان به مدل چین، مور، زیلدرا^۱ و همچنین والکر و می^۲ اشاره کرد. سمپل و بورگین^۳ (۱۹۷۸) این مدل‌ها و روابط را با استفاده از آزمایشگاه و تحت شرایط استاتیک و جریانی یا دینامیک در سیال نیوتونی و غیر نیوتونی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو مدل مور و چین مدل‌های دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری هستند [۵۰].

با در اختیار داشتن سرعت سقوط کنده‌ها و در نتیجه مقدار غلظت کنده‌ها در فضای حلقوی چاه، حداقل سرعت و دبی مور نیاز برای حمل کنده‌ها به سطح و تمیز سازی چاه‌های عمود و نزدیک به عمود قابل محاسبه خواهد بود. حداقل دبی مورد نیاز برای حمل کنده‌ها، معیار کمی مناسبی برای ارزیابی تمیز سازی چاه و اطمینان از حمل کنده‌های تولید شده در حین حفاری به سطح برای زاویه‌های کمتر از ۳۰ یا ۳۵ درجه می‌باشد.

مطالعات میدانی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند، هنگامی که غلظت حجمی کنده‌ها در سیال حفاری کمتر از مقدار ۵٪ در فضای حلقوی چاه باشد، مشکل خاصی برای حمل کنده‌ها به سطح و تمیز سازی چاه رخ نخواهد داد؛ بنابراین در این زوایای چاه، حداقل دبی مورد نیاز گل برای نگه داشتن غلظت کنده‌های حفاری پایین‌تر از مقدار ۵٪ حجمی در فضای حلقوی چاه به عنوان حداقل دبی (دبی بحرانی^۴) معرفی می‌شود. در واقع اگر دبی گل حفاری در فضای حلقوی از این مقدار بحرانی کمتر باشد کنده‌های حفاری شروع به سقوط در گل و ته‌نشینی در کف چاه می‌کنند که این باعث تجمع بیش از حد کنده‌ها

¹ Zielder

² Walker and Mey

³ Sample and Bourgoyne

⁴ Critical Flow Rate

در چاه و اطراف مته و بروز مشکلات فراوانی مانند دوباره خورد شدن کنده‌های تولیدشده^۱، کاهش سرعت حفاری، افزایش سایش مته، کاهش عمر مته، گیر لوله و بسته شدن چاه شود [۲۷].

روابط (۵۱-۲)، (۵۲-۲) و (۵۳-۲) چگونگی محاسبه حداقل سرعت و دبی موردنیاز برای حمل کنده‌ها را نشان می‌دهند [۵۴].

$$V_{crit} = V_{min} = V_{cut} + V_{slip} \quad (۵۱-۲)$$

$$V_{cut} = \frac{ROP}{36 \left(1 - \frac{A_{pipe}}{A_w} \right) C_{conc\%}} \quad (۵۲-۲)$$

$$Q_{crit} = Q_{min} = V_{min} \times A_{annulus} \quad (۵۳-۲)$$

V_{cut} سرعت تولید کنده‌ها، V_{crit} سرعت بحرانی حمل کنده‌ها، V_{min} حداقل سرعت لازم برای حمل کنده‌ها، A_{pipe} سطح مقطع لوله حفاری، $C_{conc\%}$ غلظت حجمی کنده‌ها در فضای حلقوی چاه، Q_{crit} دبی بحرانی حمل کنده‌ها و Q_{min} حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها است.

۳-۱۰-۲ تمیز سازی چاه در بخش‌های مایل و افقی چاه

برای زاویه‌های بیشتر از ۳۰ درجه (حفاری در قسمت‌های انحرافی و افقی)، مکانیسم انتقال کنده‌ها متفاوت است؛ زیرا در این زوایا به دلیل میل شدید کنده‌های حفاری به ته‌نشینی در سیال، اغلب با ته‌نشست کنده‌ها بر روی کف فضای حلقوی چاه و تشکیل لایه‌های (بسترهای) کنده حفاری روبرو هستیم [۵۵].

برای بلند کردن و انتقال کنده‌ها سیال حفاری، سرعت متوسط سیال در فضای حلقوی باید از سرعت متوسط سقوط یا ته‌نشینی کنده‌ها (V_s) بیشتر باشد. در چاه‌ها و قسمت‌های عمودی، تنها یک مؤلفه محوری از سرعت سقوط وجود دارد [۳۸].

$$V_s = V_{sa} \quad (۵۴-۲)$$

^۱ Regrinding

اما زمانی که چاه یا فضای حلقوی به صورت مایل و یا زاویه دار باشد، دو مؤلفه از سرعت سقوط وجود

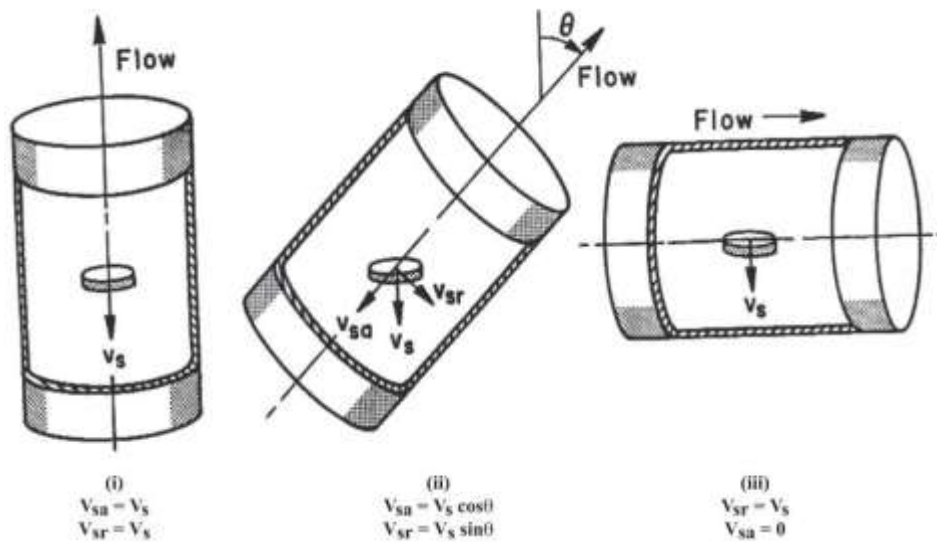
خواهد داشت [۳۸]:

$$V_{sa} = V_s \cos\theta \quad (۵۵-۲)$$

$$V_{sr} = V_s \sin\theta \quad (۵۶-۲)$$

که V_{sa} و V_{sr} به ترتیب، مؤلفه محوری و شعاعی^۱ سرعت سقوط می باشند که در شکل ۱۴-۲ نیز

نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۲: سرعت ته نشینی یا سرخوردگی کنده ها در چاه های عمودی و زاویه دار [۳۸].

درواقع با افزایش زاویه چاه، مؤلفه محوری سقوط کاهش می یابد تا جایی که در قسمت های افقی

چاه این مؤلفه به مقدار صفر خواهد رسید. به طور همزمان، مؤلفه شعاعی سرعت سقوط نیز افزایش

می یابد و در قسمت های افقی به حداکثر مقدار خود می رسد؛ بنابراین سرعت سیال در فضای حلقوی

چاه های عمودی برای انتقال کنده ها به سطح باید آن قدر باشد که از سقوط و ته نشینی کنده ها جلوگیری

کند و در این صورت است که کنده ها در زمان مناسب به سطح منتقل خواهند شد [۳۸].

¹ Radial Component

همان طور که پیش تر نیز ذکر شد در چاه های مایل و افقی، مؤلفه محوری سرعت سقوط که در جهت جریان سیال در فضای حلقوی نیز هست نقش کمتری در حمل کنده ها به سطح دارد؛ بنابراین این طور به نظر می رسد که سرعت مورد نیاز گل در فضای حلقوی برای حمل کنده ها در چاه های افقی و مایل، کمتر از چاه های عمودی باشد که البته این نتیجه گیری کاملاً اشتباه است. در واقع با افزایش زاویه چاه و افزایش مؤلفه شعاعی سرعت سقوط، کنده ها به سمت دیواره پایینی فضای حلقوی چاه هل داده می شوند و این خود باعث تشکیل بستر کنده های حفاری می شود. در نتیجه در چاه های افقی و مایل سرعت گل در فضای حلقوی باید آن قدر بالا باشد تا بتواند اثر مؤلفه شعاعی و نیرویی که به کنده ها وارد می شود را خنثی کند و از تشکیل بسترهای کنده حفاری جلوگیری کند. مطالعات گذشته نیز نشان می دهند که در چاه های افقی و مایل برای جلوگیری از ایجاد بسترهای کنده حفاری و حمل پیوسته کنده ها به سطح، سرعت سیال بسیار بیشتر از سرعت سیال برای چاه های عمودی و نزدیک به عمود است؛ بنابراین با افزایش زاویه شیب چاه از مقدار ۳۵ درجه (چاه های مایل و افقی) اثر مؤلفه محوری سرعت سقوط کاهش و اثر مؤلفه شعاعی سرعت سقوط افزایش می یابد که این باعث کاهش اثر جریان محوری سیال در فضای حلقوی بر روی حمل کنده ها می شود که در نهایت موجب تمایل بیشتر کنده ها به ته نشینی بر روی دیواره پایینی فضای حلقوی و تولید بسترهای کنده حفاری می شود [۳۸].

با افزایش زاویه شیب چاه فاصله کنده های حفاری تا کف فضای حلقوی نیز کم می شود که این پدیده باعث تشدید تمایل ته نشینی و تشکیل لایه های ثابت از کنده های حفاری در زاویه های ۳۵ تا ۹۰ درجه چاه می شود؛ بنابراین معیار تمیز سازی در این زوایای چاه (چاه های مایل و افقی)، جلوگیری از ته نشینی کنده ها و تشکیل لایه های ثابت از کنده های حفاری در کف چاه هست. به همین منظور حداقل دبی جریان لازم جهت جلوگیری از ته نشینی کنده ها به عنوان دبی بحرانی یا حداقل دبی مورد نیاز محاسبه می گردد که سرعت و دبی در حین حفاری در این زوایا بایستی از این مقدار حداقل بیشتر باشد [۴۹].

۲-۱۰-۳-۱ مدل‌ها و روابط محاسبه حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها در چاه‌های مایل و

افقی

اوایل دهه ۱۹۸۰ میلادی، آزمایش‌هایی جهت بررسی تمیز سازی و انتقال‌کننده‌های حفاری در زاویه‌های بیشتر از ۳۰ درجه در دانشگاه هرپوت وات^۱ انجام شد که منجر به توسعه روابطی برای به دست آوردن حداقل دبی موردنیاز برای حمل‌کننده‌های حفاری گردید. نتایج این آزمایش‌ها برای اولین بار توسط پدن و همکاران^۲ (۱۹۹۰) و فورد و همکاران^۳ (۱۹۹۰) منتشر شد [۵۶] [۵۷]. سپس گروه تحقیقاتی دیگری در دانشگاه تالسا^۴ با انجام آزمایش‌های متعدد در آزمایشگاه‌های شبیه‌ساز حفاری، توانستند روابط تجربی^۵ - تحلیلی^۶ جدیدی را برای محاسبه حداقل دبی موردنیاز جهت حمل‌کننده‌ها به دست آورند که نتایج این آزمایش‌ها و روابط حاصله برای اولین بار توسط لارسن و همکاران (۱۹۹۷) منتشر گردید. این مدل توانایی محاسبه حداقل دبی موردنیاز برای حمل‌کننده‌ها و تمیز سازی چاه را برای زوایای ۵۵ تا ۹۰ درجه چاه را دارد [۵۴]. این مدل اولیه برای اولین بار توسط جالوکار (۱۹۹۳) برای در نظر گرفتن اثرات تغییر اندازه چاه در مدل لارسن تصحیح گردید [۲۳] و برای دومین بار نیز باسل (۱۹۹۵) با انجام آزمایش‌های جدید توانست مدل لارسن را برای در نظر گرفتن اثر چرخش لوله حفاری اصلاح نماید [۲۴].

لو و همکاران (۱۹۹۴) توانستند با آنالیز و بررسی داده‌های آزمایش‌های پیشین، مدل‌هایی برای محاسبه حداقل دبی موردنیاز برای حمل‌کننده‌ها به دست آورند و در نهایت بر اساس این مدل‌ها و داده‌های آزمایشگاهی، نمودارهایی را برای محاسبه حداقل دبی جهت استفاده‌های میدانی ارائه کردند [۵۸].

¹ Herriot-Watt

² Peden et.al.

³ Ford et.al.

⁴ Tulsa

⁵ Empirical

⁶ Analytical

روبیان‌دینی (۱۹۹۹) توانست با استفاده از مدل لارسن و داده‌های آزمایشگاهی پدن (۱۹۹۰)، مدل جدیدی برای محاسبه حداقل دبی موردنیاز حمل کندها برای زاویه‌های ۰ تا ۹۰ درجه توسعه دهد که این مدل می‌تواند اثر چرخش رشته حفاری بر حداقل دبی را نیز در نظر بگیرد [۴].

ملک‌زاده و محمدصالحی (۲۰۱۲) با ترکیب مدل لارسن (۱۹۹۷) و مور (۱۹۷۴) و همچنین استفاده از داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) به مدلی یکپارچه برای محاسبه حداقل سرعت یا دبی موردنیاز جهت انتقال کندهای حفاری و تمیز سازی چاه از زاویه ۰ تا ۹۰ درجه دست‌یافت‌اند [۲۶].

۳ فصل سوم

بررسی مدل‌های رئولوژیکی و ارائه روش

پیشنهادی برای تمیز سازی چاه

۱-۳ مقدمه

همان‌طور که در فصل قبل گفته شد، برای افزایش دقت محاسبات بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری (یافتن دبی و اندازه نازل‌های بهینه مته) نیاز به محاسبه دقیق افت فشار سیستم گردش سیال حفاری و حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها در همه زاویه‌های چاه است.

برای افزایش دقت محاسبات هیدرولیکی و محاسبه دقیق مقدار افت فشار اصطکاکی در سیستم گردش گل حفاری، می‌بایست از بین مدل‌های رئولوژی سیالات غیر نیوتنی بهترین مدلی که علاوه بر دقت بالا در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی سیال، دقت بالایی در تخمین مقدار افت فشار اصطکاکی نیز داشته باشد انتخاب شود.

همچنین برای تخمین بهتر و دقیق‌تر حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها و حصول اطمینان از تمیز سازی مناسب کل چاه و انتقال‌کننده‌های تولیدشده به سطح دکل، روش‌ها و مدل‌های متفاوتی تاکنون ارائه شده است که هر یک از این مدل‌ها دارای نقاط ضعف و قوتی هستند که با بررسی دقیق این مدل‌ها و با توجه به مکانیسم‌های حمل‌کننده‌ها در زاویه‌های مختلف چاه می‌توان به استراتژی مناسبی برای محاسبه دقیق‌تر حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها و تمیز سازی چاه رسید.

۲-۳ انتخاب بهترین مدل رئولوژی

مدل‌های رئولوژی رایج در صنعت نفت در نیم‌قرن اخیر شامل مدل‌های نیوتونی، بینگهام پلاستیک و پاورلاو می‌باشند. البته از بین این مدل‌ها مدل بینگهام پلاستیک به دلیل در نظر گرفتن نقطه تسلیم (تنش برشی مثبت در نرخ برشی صفر) برای سیالات، کاربرد بیشتری دارد چراکه بیش‌تر سیالات حفاری و دوغاب‌های سیمان^۱ این رفتار را از خود نشان می‌دهند [۱۵].

^۱ Cement Slurry

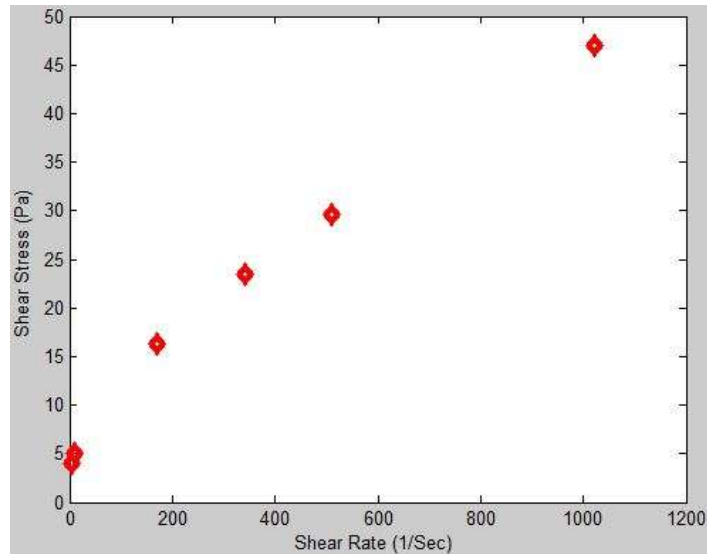
اخیراً مدل هر شل بالکلی به خاطر در نظر گرفتن نقطه تسلیم (بینگهام پلاستیک) و رابطه غیرخطی نرخ برش - تنش برشی (پاورلاو) بیش تر مورد استفاده قرار می گیرد [۳۵]

در این پایان نامه، هفت مدل مهم رئولوژی سیالات غیر نیوتونی مورد بررسی قرار می گیرد تا مدلی که رابطه نرخ برش - تنش برشی برای سیال غیر نیوتونی مورد نظر را با دقت بالایی توصیف می کند انتخاب شود. این مدل ها عبارتند از: بینگهام پلاستیک، پاورلاو، API RP13D هر شل بالکلی، رابرتسون-استیف، کی سون و سیسکو.

برای رسیدن به مدل رئولوژی که بیش ترین تطابق با خصوصیات رئولوژیکی سیال غیر نیوتونی مورد نظر را داشته باشد، در این پایان نامه از داده های آزمایشگاهی یک سیال حفاری پایه آبی که توسط بویه و تاتونکو (۲۰۱۶) به وسیله ویسکومتر دوار اندازه گیری شده است استفاده می شود. داده های نرخ برش - تنش برشی اندازه گیری شده توسط ویسکومتر برای سیال غیر نیوتونی در یک نمودار رسم می گردد. جدول ۱-۳ داده های اندازه گیری شده سیال غیر نیوتونی مورد آزمایش را نشان می دهد و شکل ۱-۳ نیز نمودار تنش برشی - نرخ برش داده های اندازه گیری شده این سیال را نشان می دهد:

جدول ۱-۳: رئولوژی اندازه گیری شده یک نمونه گل توسط ویسکومتر در شرایط استاندارد [۵۹].

سرعت چرخشی (rpm)	مقدار خوانده شده از Fann35 (degree)
600	92
300	58
200	46
100	34
6	10
3	8

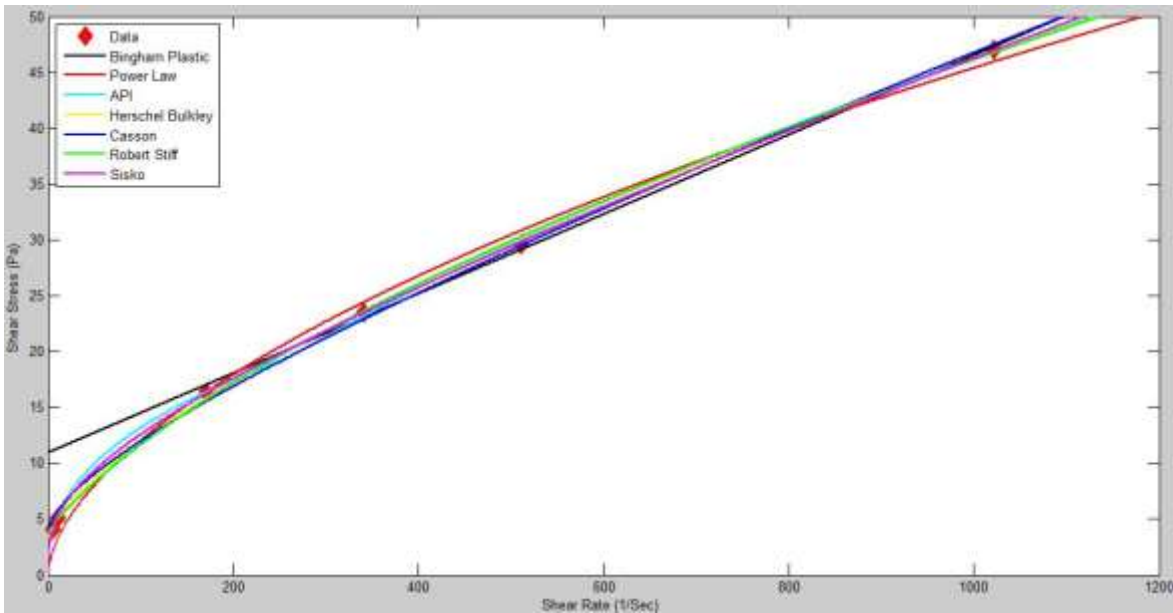


شکل ۳-۱: نمودار نرخ برش - تنش برشی برای یک سیال غیر نیوتنی.

با در اختیار داشتن داده‌های نرخ برش - تنش برشی سیال که توسط ویسکومتر اندازه‌گیری شده است و با استفاده از روش‌های خطی و غیرخطی تطابق منحنی و رگرسیون، می‌توان پارامترهای موجود در معادلات مدل‌های رئولوژی را با دقت خوبی تخمین زد. بعد از به دست آوردن این پارامترها، مدل‌های رئولوژی متناظر با خصوصیات سیال موردنظر که رفتار سیال را مدل‌سازی می‌کنند به دست می‌آیند. توسط این معادلات می‌توان رفتار رئولوژیکی سیال غیر نیوتنی (رابطه نرخ برش - تنش برشی) را به خوبی مدل‌سازی کرد. معادلات رئولوژیکی و پارامترهای محاسبه‌شده آن‌ها در جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

شکل ۳-۲ تطابق هفت مدل رئولوژی و داده‌های اندازه‌گیری شده بویه و تاتونکو (۲۰۱۶) یا

چگونگی پیش‌بینی رفتار رئولوژی سیال توسط مدل‌های رئولوژی را نشان می‌دهد:



شکل ۲-۳: پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی یک سیال غیر نیوتونی توسط هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری. برای انتخاب بهترین مدل از میان این هفت مدل رئولوژی، دو پارامتر میانگین درصد خطا (E_{AAP})^۱ و ریشه (جذر) مربعات خطا (R^2)^۲ به‌عنوان معیار در نظر گرفته می‌شود. به این صورت که هر مدلی که کم‌ترین مقدار میانگین درصد خطای مطلق و یا بیش‌ترین مقدار ریشه متوسط مربعات خطا را داشته باشد به‌عنوان بهترین مدل در نظر گرفته می‌شود. این دو پارامتر میزان دقت مدل‌های رئولوژی در تخمین مقدار تنش برشی در شش نرخ برشی مشخص را نشان می‌دهند [۱۵] [۵۹].

فرمول‌های مربوط به محاسبه میانگین درصد خطای مطلق و ریشه متوسط مربعات خطا، به ترتیب از رابطه (۱-۳) [۱۵] و (۲-۳) [۵۹] به دست می‌آیند:

$$E_{AAP} = \left[\left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N \left| \frac{\tau_i - \tau_i^c}{\tau_i} \right| \right] \times 100 \quad (1-3)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i^c - \bar{\tau}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\tau_i^c - \bar{\tau}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \bar{\tau}_i)^2}} \right]^2 \quad (2-3)$$

¹ Absolute Average Percent Error

² Root Mean-Square Error

τ_i و τ_i^c به ترتیب مقادیر واقعی و محاسبه‌شده تنش برشی و همچنین $\bar{\tau}_i$ و $\bar{\tau}_i^c$ به ترتیب مقادیر متوسط و محاسبه‌شده تنش برشی می‌باشند. پارامتر N نیز در معادلات (۳-۱) و (۳-۲) تعداد داده‌ها می‌باشد.

مقادیر این دو پارامتر برای هفت مدل رئولوژی مورد بررسی، در جدول ۳-۲ نشان داده شده است. جدول ۳-۲: مقادیر پیش‌بینی شده پارامترهای هفت مدل رئولوژی رایج در صنعت حفاری به همراه درصد خطای آن‌ها.

مدل	پارامترهای مدل	E _{AAP}	R ²
بینگهام پلاستیک	$\mu_p = 0.356 ; \tau_y = 10.949$	50.3	0.9748
پاورلاو	$k = 0.8435 ; n = 0.5761$	15.6	0.9947
API	$k_p = 0.5473 ; n_p = 0.6424$ $k_a = 2.044 ; n_a = 0.4046$	1.4	0.9997
هرشل بالکلی	$\tau_y = 3.22 ; k = 0.3577 ; n = 0.69$	2.2	0.9995
کی سون	$\mu_c = 0.0244 ; \tau_y = 3.613$	7.7	0.9980
رابرتسون استیف	$A = 0.5268 ; B = 0.6454 ; C = 21.69$	3.1	0.9992
سیسکو	$a = 0.0256 ; b = 2.371 ; c = 0.3134$	0.5	1

همان‌طور که در نیز مشاهده می‌شود؛ مدل سیسکو، API، هرشل بالکلی، رابرتسون-استیف، کی سون، پاورلاو و بینگهام پلاستیک به ترتیب بهترین مدل‌ها برای توصیف خصوصیات رئولوژیکی سیال مورد نظر می‌باشند. بهترین مدل رئولوژی برای این سیال مدل سیسکو است که با دقت بالایی رابطه نرخ برشی - تنش برشی یا رفتار رئولوژیکی سیال را پیش‌بینی می‌کند.

۳-۲-۱ آنالیز داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی با مدل‌های رئولوژیکی و هیدرولیکی

برای محاسبه تئوریک افت فشارهای اصطکاکی در یک چاه، نیاز به داشتن علم کافی در مورد خصوصیات سیالی که در هر بازه از چاه در حال جریان است، می‌باشد. تاکنون چندین مدل رئولوژی و

هیدرولیکی برای محاسبه افت فشار اصطکاکی در چاه ارائه شده است که برای تعیین میزان قدرت و کارایی هریک از این مدل‌ها نیاز به بررسی‌های دقیق‌تری می‌باشد. هدف اصلی این بخش، بررسی و تحلیل قدرت پیش‌بینی مدل‌های هیدرولیکی مختلف می‌باشد. برای انجام این بررسی‌ها از داده‌های میدانی ماگلیونه و روتی (۱۹۹۴) استفاده می‌شود و برای محاسبه افت فشار نیز از روش‌های حل عددی استفاده می‌شود.

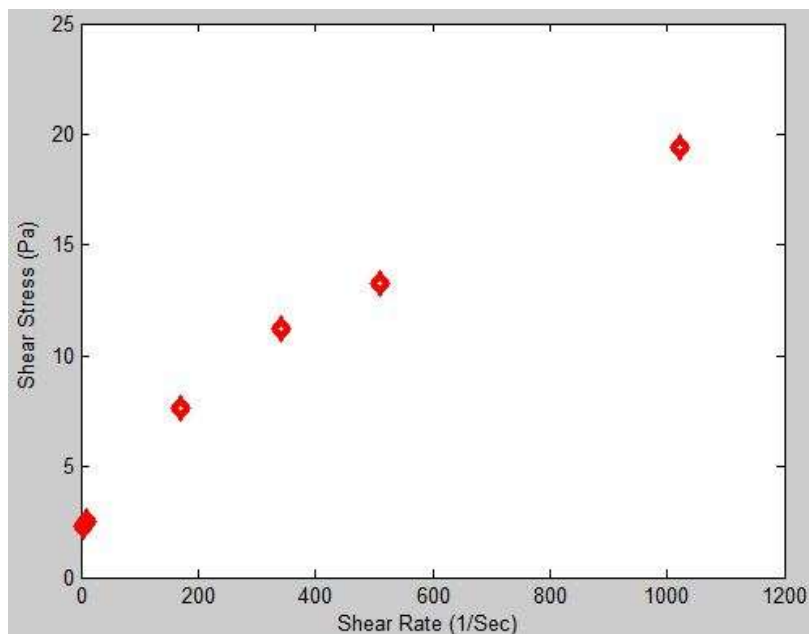
۲-۱-۲-۳ داده‌های میدانی اندازه‌گیری شده

تست گردش سیال حفاری در بخش $17\frac{1}{2}$ اینچ و در عمق ۷۹۸ متری چاه انجام و فشار لوله ایستا (SPP) در سه دبی جریان‌ی متفاوت اندازه‌گیری شده است. ابعاد هندسی بخش‌های جداره گذاری شده و جداره گذاری نشده در شکل الف-۱ نشان داده شده است. ابعاد لوله جداری و چاه، خصوصیات رئولوژیکی گل، ابعاد رشته حفاری و فشار لوله ایستا متناظر با هر دبی به ترتیب در جداول الف-۱، الف-۲، الف-۳ و الف-۴ آمده است [۱۶].

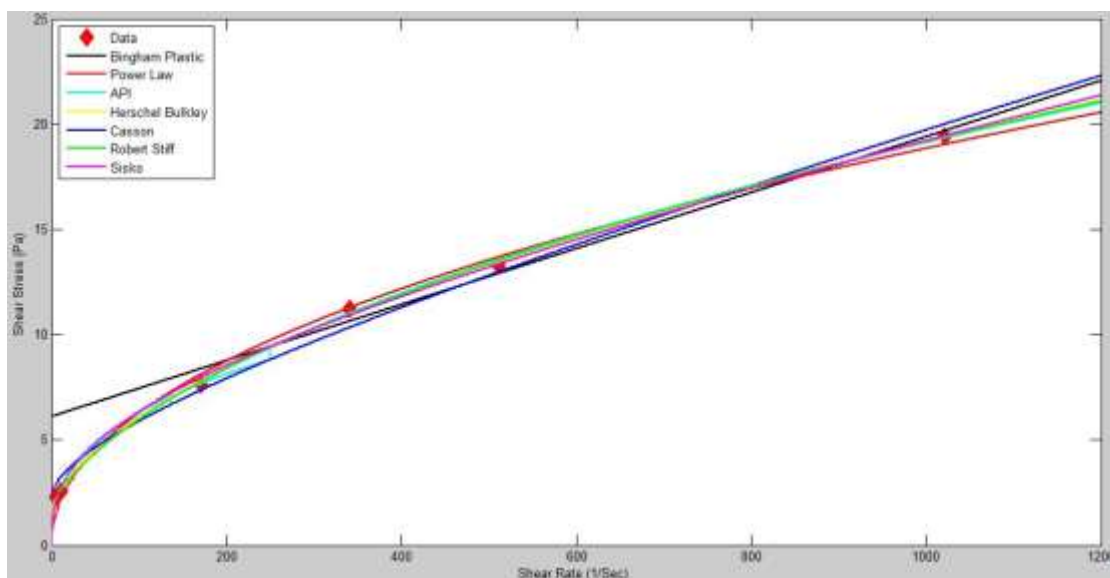
۲-۱-۲-۳ بررسی و تحلیل داده‌های میدانی و مدل‌های رئولوژی

خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری پایه آبی اندازه‌گیری شده توسط ماگلیونه و روتی (۱۹۹۴) که در جدول الف-۲ آمده است به صورت نمودار تنش برشی- نرخ برش در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. این خصوصیات رئولوژیکی اندازه‌گیری شده با مقادیر پیش‌بینی شده توسط هفت مدل رئولوژی بینگهام پلاستیک، پاورلاو، API RP13D، هر شل بالکلی، کی سون، رابرتسون-استیف و سیسکو مورد بررسی قرار می‌گیرد. درصد خطای متوسط محاسبه شده بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط مدل‌ها در جدول ۳-۳ آمده است. شکل ۳-۴ نیز مقایسه‌ای بین مقادیر رئولوژی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. بر اساس درصد خطای اندازه‌گیری شده مدل رابرتسون-استیف

دارای کمترین خطا و در نتیجه بهترین انطباق با داده‌های اندازه‌گیری شده را دارد. مدل بینگهام پلاستیک نیز دارای بیشترین خطا در پیش‌بینی خواص رئولوژی سیال است.



شکل ۳-۳: داده‌های رئولوژی اندازه‌گیری شده بر روی نمودار نرخ برش- تنش برشی برای سیال حفاری.



شکل ۳-۴: پیش‌بینی رفتار رئولوژیکی سیال حفاری توسط هفت مدل‌های رئولوژی رایج.

جدول ۳-۳: دقت مدل های رئولوژی در پیش بینی خواص رئولوژیکی سیال حفاری.

مدل	پارامترهای مدل	E_{AAP}	R^2
بینگهام پلاستیک	$\mu_p = 0.0133; \tau_y = 6.1135$	55.39	0.9473
پاورلاو	$k = 0.6996; n = 0.4768$	10.29	0.9954
API	$k_p = 0.5573; n_p = 0.5119$ $k_a = 1.165; n_a = 0.366$	3.22	0.9991
هرشل بالکلی	$\tau_y = 1.36; k = 0.33; n = 0.577$	2.08	0.9993
کی سون	$\mu_c = 0.0087; \tau_y = 2.2424$	11.74	0.9904
رابرتسون استیف	$A = 0.4895; B = 0.5299; C = 12.96$	1.33	0.9994
سیسکو	$a = 0.0068; b = 1.1819; c = 0.3403$	3.48	0.9989

۳-۲-۱-۳ بررسی و تحلیل داده های میدانی و مدل های هیدرولیکی

برای بررسی دقت هر یک از مدل های هیدرولیکی در پیش بینی مقدار افت فشار اصطکاکی، مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده فشار لوله ایستا (توسط ماگلیونه و روتی (۱۹۹۴)) با یکدیگر مقایسه می شوند. برای هر دبی جریان مقدار افت فشار اندازه گیری شده و مقدار محاسبه شده توسط مدل های هیدرولیکی در جدول ۳-۴ آمده است.

جدول ۳-۴: مقادیر فشار لوله ایستا اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده.

		دبی گل حفاری (GPM)		
		433.2	649.8	863.8
فشار لوله ایستا (psi)	مقدار اندازه‌گیری شده	675.8	1498	2557
	بینگهام پلاستیک	696.3	1523.7	246.7
	پاورلاو	650.3	136.3	230.9
	API	664.9	1363	2347
	هرشل بالکلی	663.2	139.9	237.4
	کی سون	677.4	1454	2501
	رابرتسون استیف	670	1402	2368
	سیسکو	657.4	1402.6	2406

دقت مقادیر فشار لوله ایستا محاسبه‌شده توسط مدل‌های هیدرولیکی در جدول ۳-۵ آمده است:

جدول ۳-۵: درصد خطای مدل‌های هیدرولیکی در پیش‌بینی فشار لوله ایستا (افت فشار اصطکاکی).

		دبی گل حفاری (GPM)		
		433.2	649.8	863.8
درصد خطا (%)	بینگهام پلاستیک	3.23	1.7	3.52
	پاورلاو	3.68	8.96	9.67
	API	1.62	7.16	8.19
	هرشل بالکلی	1.87	6.62	7.12
	کی سون	0.228	2.95	2.15
	رابرتسون استیف	0.8	6.3	7.3
	سیسکو	2.72	6.37	5.89

همان طور که در جدول ۳-۵ نیز مشاهده می شود، مدل هیدرولیکی کی سون کمترین درصد خطا را در پیش بینی فشار لوله ایستا دارد، بنابراین بهترین مدل برای انجام محاسبات افت فشار مدل هیدرولیکی کی سون می باشد.

از بررسی مدل های رئولوژی و هیدرولیکی و داده های میدانی می توان به نتایج زیر اشاره نمود:

- از میان سه مدل رئولوژی بسیار رایج و کاربردی در صنعت نفت که شامل مدل های بینگهام پلاستیک، پاورلاو و هرشل بالکلی می شوند، مدل هرشل بالکلی بیشترین دقت را در پیش بینی خصوصیات رئولوژی سیال حفاری دارد؛ اما دقت مدل بینگهام پلاستیک برای پیش بینی رفتار و خصوصیات هیدرولیکی (افت فشار) از دو مدل دیگر بیش تر است. نکته دیگر اینکه مدل بینگهام پلاستیک به طور معمول افت فشارها را بیش تر از مقدار واقعی نشان می دهد و مدل پاورلاو و افت فشار بسیار پایین تر از مقدار واقعی و نیز مدل هرشل بالکلی افت فشار را مقداری مابین مقدار پیش بینی شده توسط مدل پاورلاو و بینگهام پلاستیک نشان می دهد. این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات چادوهاری و همکاران (۲۰۰۹) و سیمون (۲۰۰۴) نیز مطابقت دارد؛ بنابراین از میان این سه مدل، مدل هرشل بالکلی بهترین مدل برای پیش بینی خواص رئولوژی سیال و مدل بینگهام پلاستیک برای محاسبه و پیش بینی افت فشارها می باشد.

- زمانی که یک مدل رئولوژی خصوصیات رئولوژیکی سیال را با دقت خوبی پیش بینی می کند الزاماً این مدل نمی تواند خصوصیات هیدرولیکی جریان مثل افت فشار را نیز به خوبی پیش بینی نماید. به طور مثال از میان سه مدل بسیار کاربردی بینگهام پلاستیک، پاورلاو و هرشل بالکلی مدل هرشل بالکلی با وجود دقت مناسب در پیش بینی خصوصیات رئولوژیکی، دقت کافی در پیش بینی افت فشار را ندارد. همچنین برای داده های میدانی مورد بررسی، مدل رابرتسون استیف بهترین مدل پیش بینی خصوصیات رئولوژی سیال است؛ در صورتی که این مدل دقت مناسبی در پیش بینی خصوصیات هیدرولیکی مانند افت فشار را ندارد. از طرفی مدل کی سون با وجود دقت پایین در پیش بینی

خصوصیات رئولوژیکی (دقت ۱۱٪) بهترین مدل برای پیش‌بینی افت فشارها در این مثال می‌باشد. این نتایج با نتایج حاصل از تحقیقات انجام‌شده توسط سیمون (۲۰۰۴)، اوچوا (۲۰۰۶) و چادوهاری و همکاران (۲۰۰۹) نیز مطابقت دارند.

۳-۳ محاسبه حداقل دبی موردنیاز برای حمل‌کننده‌ها و تمیز سازی چاه به

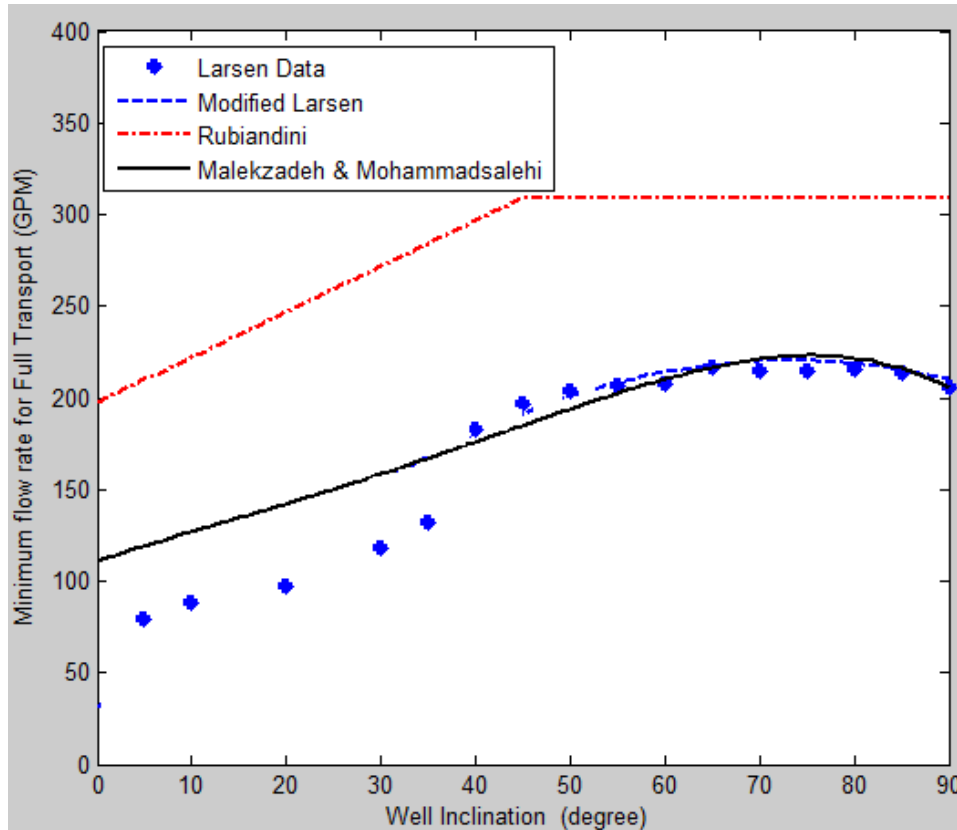
روش پیشنهادی

در این قسمت ابتدا مدل‌های اصلاح‌شده لارسن (توسط جالوکار (۱۹۹۳) و باسل (۱۹۹۷))، روبیاندینی و مدل ملک‌زاده و محمدصالحی برای محاسبه حداقل دبی موردنیاز حمل‌کننده‌ها و تمیز سازی چاه با یکدیگر مقایسه می‌شوند و نقاط ضعف و قوت هر یک مورد تحلیل و بررسی قرار خواهد گرفت.

شکل ۳-۵ نمودار حداقل دبی موردنیاز برای حمل‌کننده‌های حفاری و تمیز سازی چاه برای مدل اصلاح‌شده لارسن، روبیاندینی و مدل ملک‌زاده و محمدصالحی به همراه داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۳-۵ نیز پیداست، مدل اصلاح‌شده لارسن با دقت مناسبی حداقل دبی را محاسبه می‌کند؛ به‌طوری‌که افزایش حداقل دبی در زاویه‌های ۵۵ تا ۶۵ درجه که در مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نیز به اثبات رسیده است را به‌درستی محاسبه و پیش‌بینی می‌کند؛ هرچند این مدل برای بعضی از زوایای چاه به مقدار بسیار اندکی حداقل دبی را بیشتر از واقعیت محاسبه می‌کند که این مشاهدات با بررسی‌های رنجبر^۱ (۲۰۱۰) [۶۰] بر روی داده‌های میدانی نیز مطابقت دارد. علاوه بر این، مدل اصلاح‌شده لارسن به دلیل وجود ضریب اصلاحی اثر چرخش رشته حفاری که توسط باسل (۱۹۹۷) ارائه شد، تأثیر چرخش رشته حفاری بر روی حداقل دبی موردنیاز را در نظر می‌گیرد. باوجود دقت نسبتاً قابل‌قبول مدل اصلاح‌شده لارسن، بزرگ‌ترین ضعف این مدل، محدود بودن محاسبات

^۱ Ranjbar

برای زوایای ۵۵ تا ۹۰ درجه و عدم ارائه روشی برای محاسبه حداقل دبی در زوایای ۰ تا ۵۵ درجه است.



شکل ۳-۵: مقایسه حداقل دبی مورد نیاز محاسبه شده توسط روش‌های اصلاح شده لارسن، روبیاندینی و مدل ملکزاده و محمدصالحی در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰).

همان‌طور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، مدل روبیاندینی همواره مقدار حداقل دبی مورد نیاز برای حمل‌کننده‌ها را بیشتر از مقدار واقعی محاسبه می‌کند و همچنین در این مدل مقدار حداقل دبی برای زوایای بیشتر از ۴۵ درجه یکسان و برابر است؛ در صورتی که مطالعات و بررسی‌های آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهند که بدترین حالت برای تمیز سازی چاه زاویه ۵۵ تا ۶۵ درجه می‌باشد و به همین دلیل در این زوایا مقدار حداقل دبی نیز افزایش می‌یابد. یکی دیگر از مشکلات و نقاط ضعف این مدل روند خطی افزایش حداقل دبی در زاویه‌های ۰ تا ۴۵ درجه است. در زاویه‌های ۰ تا ۴۵ درجه، دو مکانیسم کلی بر روند حمل‌کننده‌ها غالب است؛ به این صورت که اولاً در زاویه‌های عمود و نزدیک به عمود (زاویه بین ۰ تا ۳۰ درجه) مکانیسم انتقال‌کننده‌ها به صورت حمل‌کننده‌های معلق در سیال است

که از مدل‌های سرعت سقوط ذره در سیال استفاده می‌شود و دوما در زاویه‌های ۳۰ تا ۴۵ درجه به دلیل شرایط مناسب ته‌نشینی، کنده‌ها شروع به سقوط و ته‌نشینی در نزدیکی دیواره پایینی فضای حلقوی می‌کنند که باعث شروع تدریجی جریان‌های ناپایدار در این زاویه‌ها می‌شوند؛ بنابراین به دلیل متفاوت بودن مکانیسم حمل کنده‌ها در این دو قسمت (۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۴۵ درجه) روند افزایش حداقل دبی موردنیاز برای زاویه‌های ۰ تا ۴۵ درجه به صورت خطی و یکسان نخواهد بود بلکه افزایش حداقل دبی برای زاویه‌های ۰ تا ۳۰ درجه بسیار تدریجی (به دلیل یکسان بودن مکانیسم حمل کنده‌ها) و برای زاویه‌های ۳۰ تا ۴۵ درجه این روند افزایش حداقل دبی بسیار بیشتر و شدیدتر خواهد بود. با این حال از مزایای این مدل می‌توان به محاسبه حداقل دبی برای همه زوایای چاه و همچنین در نظر گرفتن تأثیر چرخش رشته حفاری بر مقدار حداقل دبی موردنیاز برای حمل کنده‌ها و تمیز سازی چاه اشاره نمود.

برای مدل ملک‌زاده و محمدصالحی، حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها و تمیز سازی چاه در سه زاویه‌های ۰ تا ۴۰ و ۴۰ تا ۵۵ و ۵۵ تا ۹۰ درجه مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای زاویه‌های ۰ تا ۴۰ درجه، این مدل حداقل دبی را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد و همچنین همانند روش روباندینی روند خطی افزایش حداقل دبی برای زاویه ۰ تا ۴۰ درجه دیده می‌شود. برای زاویه‌های ۴۰ تا ۵۵، این مدل حداقل دبی را کمتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد ولی تخمین حداقل دبی نسبت به زاویه‌های ۰ تا ۴۰ درجه بهتر است. برای زاویه‌های ۵۵ تا ۹۰ درجه به حداقل دبی دقت مناسب و قابل قبولی دارد و روند افزایشی در زاویه‌های ۶۰ تا ۷۵ را نشان می‌دهد. یکی از بزرگ‌ترین معایب این روش، در نظر نگرفتن تأثیر چرخش رشته حفاری بر روی حداقل دبی موردنیاز است.

با بررسی نقاط ضعف و قوت این سه مدل، می‌توان با استفاده از استراتژی مناسب در ترکیب مدل‌های ارائه‌شده به روشی برای تخمین حداقل دبی رسید که علاوه بر محاسبه دقیق حداقل دبی در همه زاویه‌های ۰ تا ۹۰ درجه، بتواند اثر چرخش رشته حفاری و سایر پارامترها بر روی مقدار حداقل دبی را نیز به خوبی در نظر بگیرد. به همین منظور، ابتدا بر اساس مکانیسم‌های غالب بر حمل کنده‌ها،

چاه به دو قسمت ۰ تا ۳۰ درجه و زاویه ۴۰ تا ۹۰ درجه تقسیم‌بندی و ناحیه بین این دو قسمت (زاویه‌های ۳۰ تا ۴۰ درجه) به‌عنوان ناحیه گذار در نظر گرفته می‌شود.

در روش پیشنهادی برای محاسبه حداقل سرعت یا دبی در زاویه‌های ۰ تا ۳۰ درجه از مدل پراکندگی (در فصل دوم به‌تفصیل توضیح داده شده است) استفاده می‌شود که مقدار حداقل سرعت یا دبی موردنیاز برای حمل‌کننده‌ها و تمیز سازی چاه با در نظر گرفتن غلظت حجمی ۵٪ به‌عنوان حداکثر مقدار مجاز غلظت‌کننده‌ها در فضای حلقوی، به دست می‌آید.

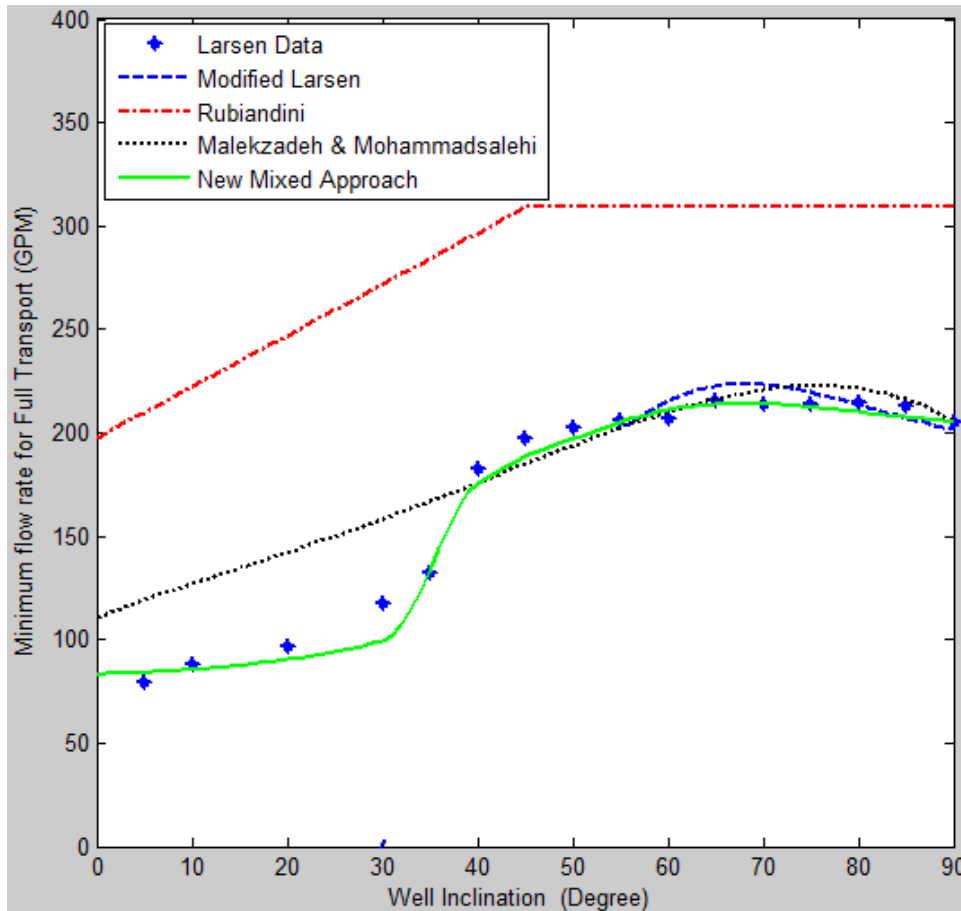
همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، مکانیسم انتقال‌کننده‌ها برای زاویه‌های ۴۰ تا ۹۰ درجه متفاوت است و مطالعات آزمایشگاهی نیز یک پرش یا افزایش حداقل سرعت و دبی را در این زوایا نشان می‌دهند. برای زاویه‌های بیشتر از ۴۰ درجه، دو مدل اصلاح‌شده لارسن و روبیندینی وجود دارد که البته مدل اصلاح‌شده لارسن تنها برای زاویه‌های بیشتر از ۵۵ درجه کاربرد دارد. برای رسیدن به روشی که بتواند علاوه بر تخمین دقیق حداقل سرعت دبی برای زاویه‌های بیشتر از ۴۰ درجه، اثر چرخش لوله حفاری را نیز در نظر بگیرد ابتدا مقادیر حداقل دبی برای زاویه‌های ۰ تا ۳۰ درجه توسط مدل پراکندگی و برای زاویه‌های ۵۵ تا ۹۰ درجه توسط مدل اصلاح‌شده لارسن به دست می‌آید و سپس با درونیابی بین این دو بخش، می‌توان به مقادیر حداقل دبی برای زاویه‌های ۳۰ تا ۵۵ درجه نیز دست‌یافت؛ اما برای افزایش دقت مقادیر پیش‌بینی‌شده در زاویه‌های ۳۰ تا ۵۵ درجه و همچنین نزدیک شدن رفتار نمودار حاصل به نمودارهای تجربی به‌دست‌آمده در آزمایشگاه، مدل درونیابی شده نهایی (بین مدل اصلاح‌شده لارسن و مدل پراکندگی) را با مدل روبیندینی برای زاویه‌های ۴۰ تا ۹۰ درجه ترکیب می‌کنیم. به این صورت که با جمع مقادیر حداقل دبی پیش‌بینی‌شده توسط مدل روبیندینی و مدل درونیابی شده و ضرب مقدار حاصل در یک ضریب ثابت می‌توان به مقدار نهایی رسید. مقدار این ضریب ثابت نیز از طریق رگرسیون داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) به دست

می‌آید و مقدار تقریبی آن برای حالت بدون چرخش رشته حفاری عدد ۲/۵ و برای حالت با چرخش رشته حفاری ۲/۱ می‌باشد.

$$Q_{Min} = \{[Q_{min}]_{Rub} + [Q_{min}]_{int}\} \div C; \theta \geq 40 \quad (3-3)$$

$[Q_{min}]_{Rub}$ حداقل دبی مورد نیاز به دست‌آمده توسط مدل روباندینی. $[Q_{min}]_{int}$ حداقل دبی مورد نیاز به دست‌آمده توسط درون‌یابی مدل‌های اصلاح‌شده لارسن و پراکندگی. C ضریب ثابت به دست‌آمده از رگرسیون است.

در شکل‌های ۳-۶ و ۳-۷ مقایسه میان مدل‌های اصلاح‌شده لارسن، روباندینی، ملک‌زاده، و محمدصالحی و روش پیشنهادی و همچنین داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) برای دو حالت رشته حفاری ثابت و در حال چرخش نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود، در حالت رشته حفاری بدون چرخش ($RPM=0$) مدل اصلاح‌شده لارسن حداقل دبی را برای زاویه‌های بالاتر از ۵۵ درجه با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند. مدل روباندینی با وجود پیش‌بینی مقدار حداقل دبی برای همه‌ی زاویه‌های ۰ تا ۹۰ درجه این مقادیر را همواره بسیار بیشتر از مقدار معمول پیش‌بینی می‌کند. مدل ملک‌زاده مقدار حداقل دبی را برای زاویه‌های بیشتر از ۴۰ درجه با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند و برای زاویه‌های کمتر از ۴۰ درجه از دقت مناسبی برخوردار نیست؛ اما روش پیشنهادی که ترکیبی از سه مدل اصلاح‌شده لارسن، روباندینی و مدل پراکندگی است، حداقل دبی را برای همه‌ی زاویه‌ها با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند. در واقع این روش علاوه بر تخمین دقیق حداقل دبی برای زاویه‌های ۰ تا ۳۰ درجه و ۴۰ تا ۹۰ درجه، رفتار ناحیه گذار را نیز به خوبی نشان می‌دهد. میزان دقت مدل‌های اصلاح‌شده لارسن، روباندینی، ملک‌زاده و محمدصالحی و روش پیشنهادی در محاسبه حداقل دبی یا دبی بحرانی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) در جدول ۳-۶ نشان داده شده است.

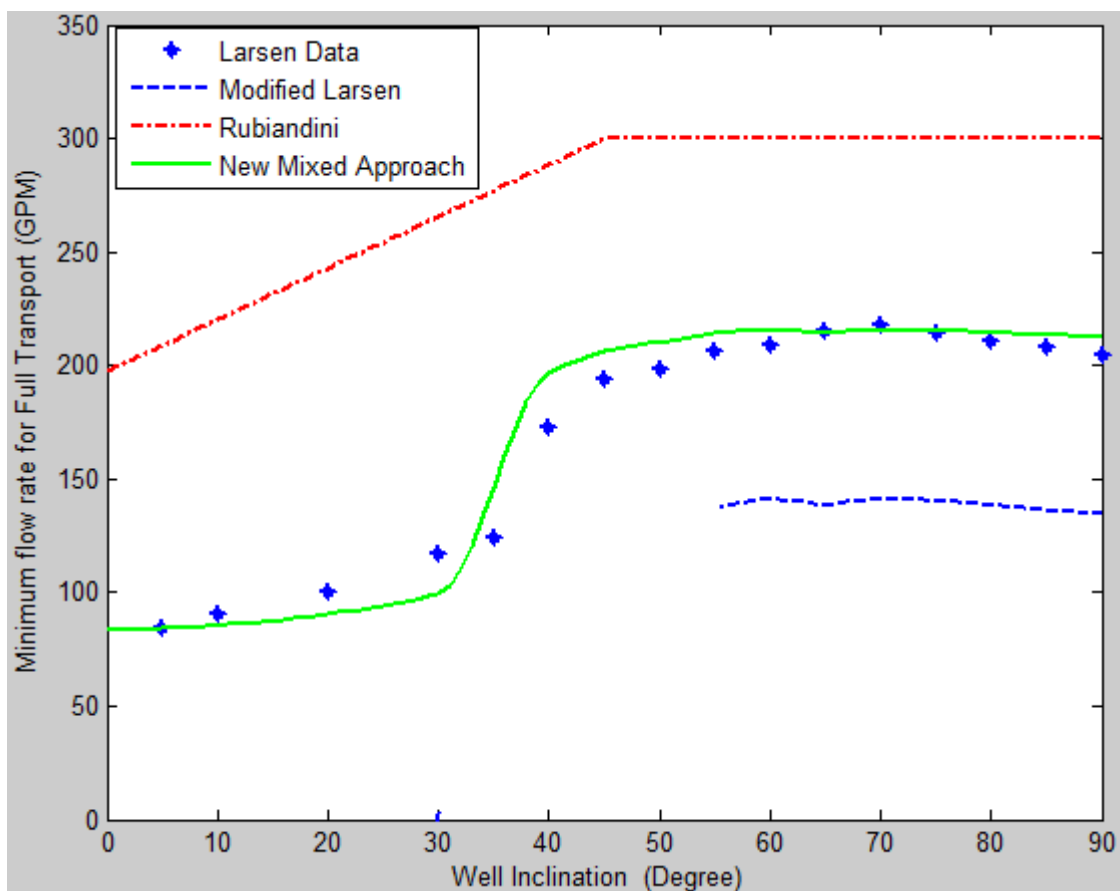


شکل ۳-۶: مقایسه حداقل دبی مورد نیاز محاسبه شده توسط روش‌های اصلاح شده لارسن، روبیاندینی، ملکزاده و محمد صالحی، روش پیشنهادی و داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰)؛ برای حالت بدون چرخش رشته حفاری.

جدول ۳-۶: دقت مدل‌های لارسن، روبیاندینی، ملکزاده و محمد صالحی و روش پیشنهادی در محاسبه حداقل دبی؛ برای حالت بدون چرخش رشته حفاری.

		زاویه شیب چاه (درجه)	
		55-90	0-90
درصد خطا (%)	Modified Larsen	2.68	-
	Rubiandini	46.93	78.58
	Malekzade&Mohammadsalehi	1.96	21.71
	New Mixed Approach	1.14	3.32

شکل ۷-۳ نیز حالتی که رشته حفاری در حال چرخش می‌باشد را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مدل پیشنهادی مقدار حداقل دبی مورد نیاز را با دقت بسیار مناسبی نسبت به سایر روش‌ها و برای همه زاویه‌های چاه (۰ تا ۹۰ درجه) تخمین می‌زند. میزان دقت مدل‌های اصلاح‌شده لارسن، روبیاندینی و روش پیشنهادی در محاسبه حداقل دبی یا دبی بحرانی نسبت به داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) در جدول ۷-۳ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳: مقایسه حداقل دبی مورد نیاز محاسبه شده توسط روش‌های اصلاح‌شده لارسن، روبیاندینی و روش پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰)؛ همراه با چرخش رشته حفاری.

جدول ۳-۷: دقت مدل‌های اصلاح‌شده لارسن، روبیاندینی و روش پیشنهادی؛ همراه با چرخش رشته حفاری.

		زاویه شیب چاه (درجه)	
		55-90	0-90
درصد خطا (%)	Modified Larsen	34.28	-
	Rubiandini	42.33	74.74
	New Mixed Approach	2.58	4.99

۴ فصل چهارم

رفتار سنجی و بهینه سازی هیدرولیک حفاری یک

جکت دریایی

۱-۴ مقدمه

به دلیل بالا بودن هزینه برپایی دکل در دریا، چاه‌های دریایی اغلب عمیق، انحرافی و افقی حفاری می‌شوند تا بتوان از طریق یک سکو چندین چاه را حفاری کرد و به نقاط مختلف یک مخزن دست‌یافت. عمق زیاد و زاویه انحراف بالای چاه‌های دریایی موجب پررنگ شدن بحث تمیز سازی چاه و وزن معادل گل در حال گردش می‌شود؛ زیرا اولاً همان‌طور که در فصل دوم بیان شد، با افزایش زاویه شیب چاه مکانیسم انتقال کنده‌های حفاری تغییر می‌کند و به دبی بیشتری برای تمیز سازی چاه نیاز خواهد بود و از طرفی با افزایش زاویه چاه و نزدیک شدن به حالت افقی بسترهای کنده حفاری شرایط تمیز سازی چاه را بسیار مشکل می‌کنند. ثانیاً، با افزایش عمق چاه و نزدیک شدن فشار منفذی به گرادیان شکست سازند، پنجره ایمن گل حفاری کوچک می‌شود و نگه‌داشتن وزن در حال گردش گل حفاری میان پنجره ایمن گل حفاری بسیار مشکل خواهد بود. از طرفی، تجهیزات استفاده‌شده در دکل‌های دریایی دارای محدودیت‌های عملیاتی خاصی نیز می‌باشند.

با توجه به دلایل فوق و اهمیت بالای بحث سرعت و ایمنی حفاری در حفاری‌های دریایی، لزوم استفاده از روش‌های جدید بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری که بتواند علاوه بر در نظر گرفتن محدودیت‌های عملیاتی، حفاری ایمن و کم‌هزینه‌ای را تضمین کند احساس می‌شود.

در فصل‌های قبل، چگونگی محاسبه افت فشارها، بررسی وضعیت تمیز سازی چاه و بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری به تفصیل شرح داده شد. همان‌طور که بیان شد، بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری به منظور یافتن اندازه‌ی بهینه نازل‌ها مته و دبی گلی می‌باشد که بتواند تمیز سازی مته و فضای حلقوی چاه را به صورت هم‌زمان انجام دهد. در این فرآیند، محدودیت‌های دکل، سازند و سایر محدودیت‌ها بایستی در نظر گرفته شود.

در این فصل از روش بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری با در نظر گرفتن تمیز سازی کل چاه و وزن معادل گل در حال گردش برای یک جکت دریایی استفاده می‌شود. ابتدا مطالعات رفتار سنجی چاه‌های حفاری شده انجام می‌شود سپس بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی صورت می‌گیرد.

۲-۴ معرفی جکت (چاه‌های) دریایی مورد مطالعه

در این تحقیق، رفتار سنجی و بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری هشت حلقه چاه یک جکت دریایی انتخاب شده است. این هشت حلقه چاه در منطقه پارس جنوبی و به صورت حفاری دسته‌ای^۱ حفاری شده‌اند.

اطلاعات محلی و هندسی چاه‌ها به دلیل محرمانه بودن، در این پایان‌نامه آورده نمی‌شود.

۳-۴ استخراج داده‌ها

برای بررسی هیدرولیک حفاری چاه‌های این جکت دریایی و بهینه‌سازی آن، اولین گام استخراج داده‌ها است؛ به همین منظور، داده‌های موردنیاز از گزارش‌های روزانه حفاری^۲، گزارش‌های روزانه گل^۳، گزارش‌های روزانه واحد نمودار گیری گل^۴ استخراج می‌شوند.

داده‌های موردنیاز برای تحلیل هیدرولیک حفاری و تمیز سازی چاه عبارت‌اند از:

۱. پروفایل چاه: داده‌های پیمایش چاه^۵ (عمق عمودی، عمق اندازه‌گیری شده، شیب، جهت و

آزیموت چاه)

۲. مشخصات سازند: فشار منفذی و شکست سازند

¹ Batch Drilling

² Daily Drilling Reports(DDRs)

³ Daily Mud Reports(DMRs)

⁴ Daily Mud logging Reports(DMLRs)

⁵ Survey

۳. هندسه چاه: قطر داخلی، عمق شروع و پایان حفره در قسمت چاه باز^۱ و قطر داخلی و خارجی،

عمق کفشک‌ها در قسمت جداری گذاری شده

۴. خصوصیات عملیاتی: مشخصات پمپ، دبی جریان گل، سرعت چرخش رشته حفاری، سرعت

حفاری

۵. خصوصیات لوله‌ها و اتصالات: خصوصیات لوله حفاری، خصوصیات اتصالات ته چاهی

۶. مشخصات مته: اندازه مته، تعداد و اندازه نازل‌ها و سطح مقطع جریانی مته، عمق ورود، عمق

خروج، متراژ و ساعات حفاری شده هر مته

• خصوصیات گل: نوع گل، خصوصیات رئولوژی گل (داده‌های ویسکومتر، گرانیوی پلاستیک و

نقطه تسلیم)، وزن گل و مقاومت ژله‌ای

۷. خصوصیات کنده‌ها: اندازه و چگالی کنده‌ها

• گرفتن حالت پایا و بدون فرسایش، برای بستر کنده‌های حفاری در محاسبات تمیز سازی چاه.

۴-۴ تحلیل و بررسی رفتار هیدرولیکی چاه‌ها و بهینه‌سازی آن

۱-۴-۴ حفره ۲۴ اینچ

خلاصه‌ای از حفره ۲۴ اینچ

حفره ۲۴ اینچ چاه، دومین مرحله حفاری است که بعد از حفره ۳۲ اینچ حفاری می‌شود. حفره ۲۴

اینچ چاه‌های این جکت دریایی، به‌طور معمول از عمق ۱۸۰ متر و زاویه چاه صفر درجه آغاز و تا عمق

۱۱۰۰ متر و زاویه چاه ۱۵ درجه ادامه می‌یابند. این حفره به‌طور معمول توسط ۲ الی ۳ مته حفاری شده

است.

¹ Open Hole

بخش ابتدایی حفره ۲۴ اینچ با سرعت نسبتاً بالا در حدود ۱۵ متر بر ساعت حفاری شده است. با افزایش عمق این سرعت به تدریج کاهش می یابد به طوری که سرعت حفاری در بخش های انتهایی به حدود ۱۰ متر بر ساعت می رسد. دبی مورد استفاده برای حفاری بخش های ابتدایی حفره ۲۴ اینچ، حدود ۸۰۰ گالن بر دقیقه است و در بخش های انتهایی به حداکثر مقدار خود که حدود ۱۰۱۵ گالن بر دقیقه است می رسد.

سیالات مورد استفاده در این حفره، آب دریا و پیل^۱ می باشند. البته سیالی که در هنگام حفاری از آن استفاده می شود آب دریا است و تنها برای تمیز سازی خرده های باقی مانده از زمان حفاری، از پیل استفاده می شود. نوع پیل مورد استفاده در این حفره PHB Pill و NG Hi-Vis Pill است که معمولاً بعد از حفاری یک شاخه لوله حفاری^۲، حدود ۳۰ تا ۵۰ بشکه پیل نیز استفاده می شود.

آنالیز حفره ۲۴ اینچ

بعد از بررسی داده ها، دو چاه ۱ و ۹ به دلیل کامل تر بودن داده هایشان در این حفره از چاه، به عنوان چاه های مورد مطالعه انتخاب می شوند.

بهینه سازی هیدرولیک حفاری و محاسبه دبی و اندازه نازل های (TFA) بهینه معمولاً برای هر بار رانش مته^۳ انجام می شود؛ به این صورت که قبل از فرستادن مته و حفاری هر بخش از چاه، مقدار دبی و اندازه نازل های بهینه برای رسیدن به انتهای این بخش از چاه محاسبه و اعمال می شود. در این بخش، چگونگی رسیدن به هیدرولیک بهینه برای اولین رانش مته در حفره ۲۴ اینچ چاه ۱ که از عمق ۱۸۰ متر و زاویه ۱/۴۶ درجه آغاز و تا عمق ۳۰۱ متر و زاویه ۲/۵ درجه ادامه می یابد به تفصیل ارائه می شود. اولین گام در بهینه سازی هیدرولیک حفاری، یافتن محدوده عملیاتی یا همان حداقل و حداکثر دبی و فشار مجاز است. در حفاری این بخش از حفره ۲۴ اینچ چاه ۱، از دو پمپ مشابه به صورت متوالی با

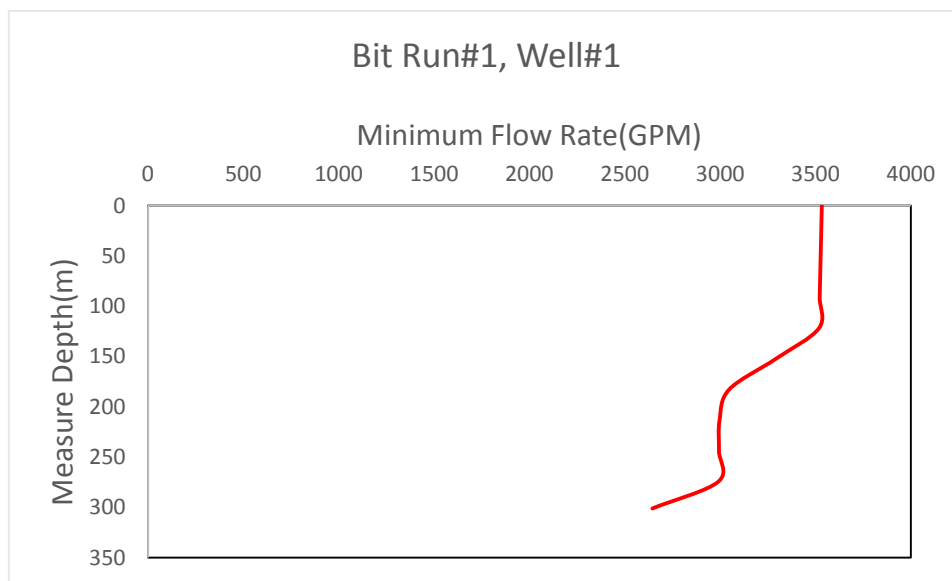
¹ Pill

² Stand

³ Bit Run

لاینر ۶/۵ اینچی استفاده می‌شود که این پمپ‌ها در ایده آل ترین حالت (راندمان ۰.۹۵) می‌توانند ۴۷۷۳ psi فشار، ۱۲۸۳ gpm دبی و ۲۲۰۰ hp توان تولید کنند؛ اما به‌طور معمول به دلیل بروز نشت احتمالی و افزایش احتمال خراب شدن پمپ هیچ‌گاه پمپ‌ها در حداکثر راندمان استفاده نمی‌شوند. بر اساس بررسی داده‌های حفاری، راندمان ۰.۸۰٪ برای عملکرد این دو پمپ در نظر گرفته می‌شود. حداکثر فشار قابل تحمل تجهیزات سطحی نیز متناسب با نوع تجهیزات و خصوصیات دکل حفاری مشخص می‌شود که در این دکل، حداکثر فشار قابل تحمل تجهیزات حدود ۳۶۰۰ psi است؛ بنابراین حداکثر فشار مجاز برابر ۳۶۰۰ psi و حداکثر دبی مجاز نیز ۱۰۳۰ gpm خواهد بود.

برای محاسبه حداقل دبی مجاز نیز می‌بایست حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها و تمیز سازی چاه را توسط روش پیش نهادی که در فصل سوم ارائه شده است محاسبه کرد. با در نظر گرفتن آب دریا به‌عنوان سیال حفاری با وزن ۸/۳ ppG، گرانیوی پلاستیک ۱ cp، نقطه تسلیم صفر $lb_f/100ft^2$ ، زاویه شیب ۱/۵ تا ۲/۵ درجه برای اولین رانش مته، سرعت نفوذ ۱۵ m/hr و سرعت چرخش رشته حفاری ۵۰ RPM، حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها در این قسمت توسط روش پیشنهادی حدود ۳۵۳۳/۹ gpm محاسبه می‌شود؛ بنابراین حداقل دبی مجاز برابر ۳۵۳۳/۹ gpm خواهد بود.



شکل ۴-۱: حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌های محاسبه‌شده توسط روش پیش نهادی در طول اولین رانش مته در حفره ۲۴ اینچ چاه ۱، در صورت استفاده از آب دریا.

برای به دست آوردن فشار شکست و فشار منفذی سازند، به دلیل نبود تست‌های Leak off و عدم نمودارگیری در این چاه، از داده‌های مخزن این فاز از پارس جنوبی استفاده می‌شود. فشار شکست و فشار منفذی در کفشک لوله جداری ۲۶ اینچ که در عمق ۱۸۰ متری قرار دارد، به ترتیب برابر وزن معادل ۱۰/۹ و ۸/۶ پوند بر گالن است. حال با داشتن محدودیت‌های عملیاتی می‌توان فرآیند بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری را آغاز نمود.

برای شروع بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری، ابتدا باید شرط بزرگ‌تر بودن حداکثر دبی تولیدی پمپ از حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها ($Q_{min} \leq Q_{max}$) بررسی شود. با بررسی وضعیت تمیز سازی چاه (به‌وسیله روش پیشنهادی ارائه‌شده در فصل سوم)، حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی چاه عدد $3533/9$ gpm محاسبه شد. این دبی، مقدار بسیار بالایی است و اعمال این دبی غیرممکن است؛ چراکه خارج از ظرفیت پمپ (1030 gpm) است. با توجه به داده‌های روزانه حفاری، مشاهده می‌شود که دبی بکار رفته در این بخش حدود 815 gpm است. به دلیل زاویه کم این بخش از چاه (کمتر از 30 درجه) با استفاده از مدل پراکندگی و معادله (۲-۴۹) غلظت کنده‌های حفاری در این قسمت از چاه در صورت اعمال 815 gpm و استفاده از آب دریا به‌عنوان سیال حفاری، حدود 70% است؛ درحالی‌که حداکثر غلظت مجاز کنده‌های حفاری در چاه‌های عمودی و نزدیک به عمود حدود 5% است و در صورت بیشتر شدن غلظت کنده‌ها از این مقدار، احتمال دوباره خورد شدن خرده‌های حفاری، درجا زدن مته^۱، افزایش سرعت سایش مته، کاهش عمر مته، کاهش شدید نرخ حفاری، بسته شدن چاه و گیر لوله حفاری بالا می‌رود.

همان‌طور که در فصل دوم نیز بیان شد، در صورت بیشتر بودن حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها از حداکثر دبی تولیدی پمپ، ابتدا باید شرایط تمیز سازی چاه بهبود یابد و حداقل دبی موردنیاز کمتر

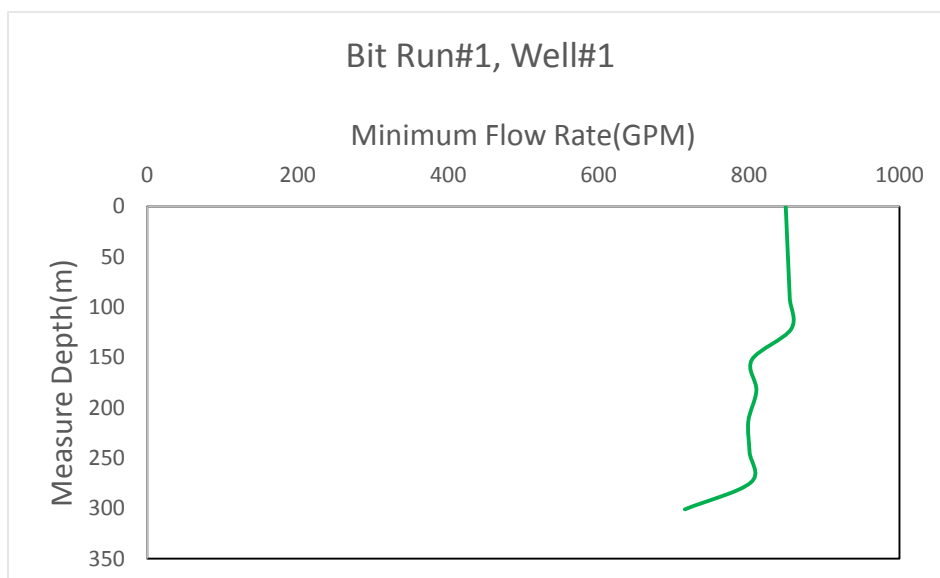
¹ Bit Floutring

از حداکثر توان تولیدی پمپ بشود تا بتوان فرآیند بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری را آغاز نمود. با توجه به مطالبی که در فصل دوم نیز بیان شد،

راهکارهای مختلفی برای بهبود شرایط تمیز سازی چاه پیشنهاد می‌شوند که بهترین راهکار برای بهبود وضعیت تمیز سازی چاه در حفره ۲۴ اینچ، طراحی گلی مناسب جهت حمل سریع و پیوسته خرده‌ها در هنگام حفاری است.

برای رسیدن به خصوصیات سیالی که منجر به حداقل دبی موردنیاز کمتر از مقدار 1030 gpm (حداکثر دبی تولیدی پمپ‌ها) شود باید خصوصیات چگالی، گرانروی پلاستیک و نقطه تسلیم سیال را تغییر داد و با استفاده از روش سعی و خطا به خصوصیات گلی دست‌یافت که بتواند حداقل دبی را به مقداری کمتر از حداکثر دبی قابل تولید پمپ برساند. البته برای محاسبه خصوصیات سیال جدید، عامل محدود کننده دیگری نیز وجود دارد که هم‌زمان با بحث تمیز سازی چاه باید به آن توجه شود و آن بحث عدم تشکیل جریان آشفته در قسمت چاه باز (بدون لوله جداری) این بخش از حفاری است. در واقع بعد از انجام فرآیند سعی و خطا و به دست آوردن خصوصیات سیال جدید، این سیال به دست آمده باید در محاسبات افت فشار در فضای حلقوی قسمت بدون لوله جداری چاه نیز آزمایش شود تا از عدم وجود جریان آشفته توسط این سیال اطمینان حاصل شود چراکه یکی از مشکلات رایج در قسمت‌های کم‌عمق چاه، شسته شدن و ریزش دیواره چاه است.

با تغییر خصوصیات سیال و با استفاده از روش پیشنهادی در فصل سوم برای محاسبه حداقل دبی موردنیاز، چگالی حدود 9 ppg ، گرانروی پلاستیکی 5 cp و نقطه تسلیم $18 \text{ lb}/100\text{ft}^2$ به‌عنوان خصوصیات سیال جدید معرفی می‌شود که حداقل دبی موردنیاز را به عدد $856/6 \text{ gpm}$ می‌رساند و این مقادیر برای محاسبه افت فشار در فضای حلقوی بدون لوله جداری این بخش از چاه استفاده می‌شود که نتایج حاکی از وجود عدد رینولدز کمتر 2100 و جریان آرام است.



شکل ۴-۲: حداقل دبی مورد نیاز حمل کنده‌های محاسبه‌شده توسط روش پیش نهادی در طول اولین رانش مته در حفره ۲۴ اینچ چاه ۱، در صورت استفاده از سیال جدید.

بعد از طراحی گلی با ظرفیت حمل مناسب کنده‌ها و مساعد شدن شرایط تمیز سازی چاه، فرآیند بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری آغاز می‌شود. مطابق روند ارائه‌شده در فصل دوم، ابتدا دبی بهینه برای افت فشار اتلافی (Δp_d) را که در معادلات (۲-۱۹) یا (۲-۲۱) صدق می‌کند محاسبه می‌کنیم تا بتوان دبی بهینه را بر اساس معیارهای بهینه‌سازی حداکثر نیروی هیدرولیکی مته و حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای جت مته محاسبه کرد. این مقدار دبی بهینه برای معیار حداکثر نیروی هیدرولیکی مته برابر $1253/4$ gpm و برای معیار حداکثر نیروی هیدرولیکی ضربه‌ای جت مته برابر $1624/6$ gpm به دست می‌آید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار دبی بهینه برای هر دو معیار بهینه‌سازی از حداکثر دبی مجاز (1030 gpm) بیشتر است. بنابراین طبق روند بهینه‌سازی که در فصل دوم آمده است، در صورتی که دبی بهینه به دست آمده توسط هر یک از معیارهای بهینه‌سازی بیشتر از حداکثر دبی مجاز باشد ($Q_{opt} \geq Q_{max}$)، دبی بهینه برابر حداکثر دبی مجاز است ($Q_{opt} = Q_{max}$)؛ بنابراین در این قسمت، دبی بهینه نهایی مقدار 1030 gpm است. با در نظر گرفتن دبی 1030 gpm، افت فشار رشته حفاری $952/46$ psi افت فشار فضای حلقوی $104/58$ psi و بنابراین افت فشار اتلافی برابر 1057 psi محاسبه می‌شود. با کم کردن این مقدار از حداکثر فشار مجاز 3600 psi طبق معادله (۲-۲۴)، افت فشار مته در

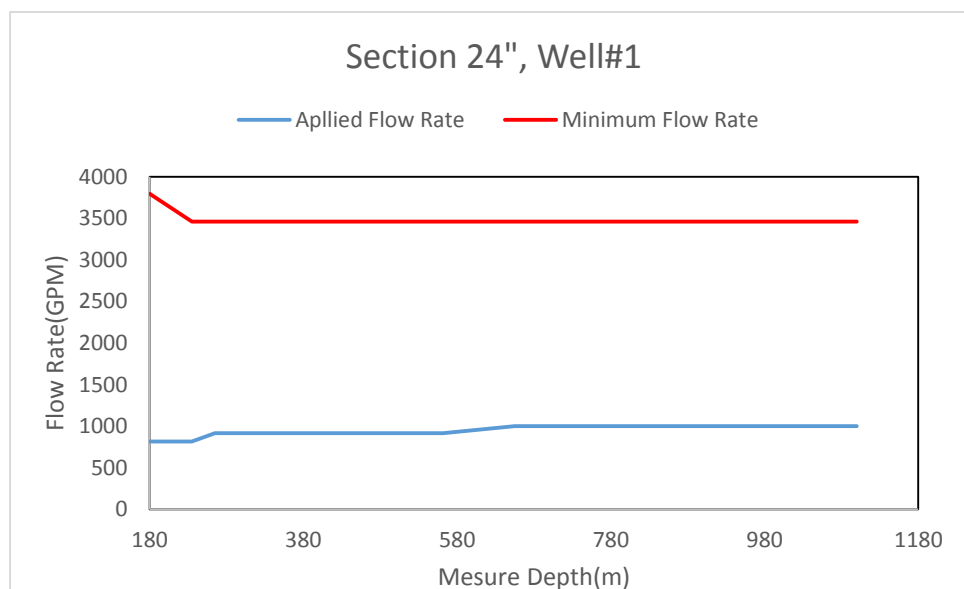
این دبی $2560/16$ psi خواهد بود. سپس با استفاده از معادله (۲-۲۵) مقدار TFA بهینه را برابر $0/586$ اینچ مربع به دست می آوریم.

تا این مرحله از بهینه سازی، دبی و اندازه نازل بهینه را محاسبه کرده ایم. حال با جایگزین کردن اندازه نازل های جدید، افت فشار در مته تغییر می کند و با تغییر اندازه نازل های مته و محاسبه افت فشارهای سیستم، افت فشار کل سیستم گردش گل یا همان افت فشار لوله ایستا (مجموع افت فشار مته و افت فشار اتلافی) برابر $3717/19$ psi محاسبه می شود که از مقدار حداکثر فشار مجاز سیستم بیشتر است؛ بنابراین باید با کاهش دبی، افت فشار کلی سیستم را به عدد 3600 psi برسانیم. با در نظر گرفتن مقدار 1010 gpm افت فشار رشته حفاری $957/34$ psi، افت فشار فضای حلقوی $74/28$ psi و بنابراین افت فشار اتلافی $1031/6$ psi به دست می آید. در این دبی افت فشار مته $2461/7$ psi و افت فشار کلی سیستم $3592/2$ psi می شود که کمتر از حداکثر فشار مجاز سیستم است؛ بنابراین دبی بهینه مقدار 1010 gpm در نظر گرفته می شود.

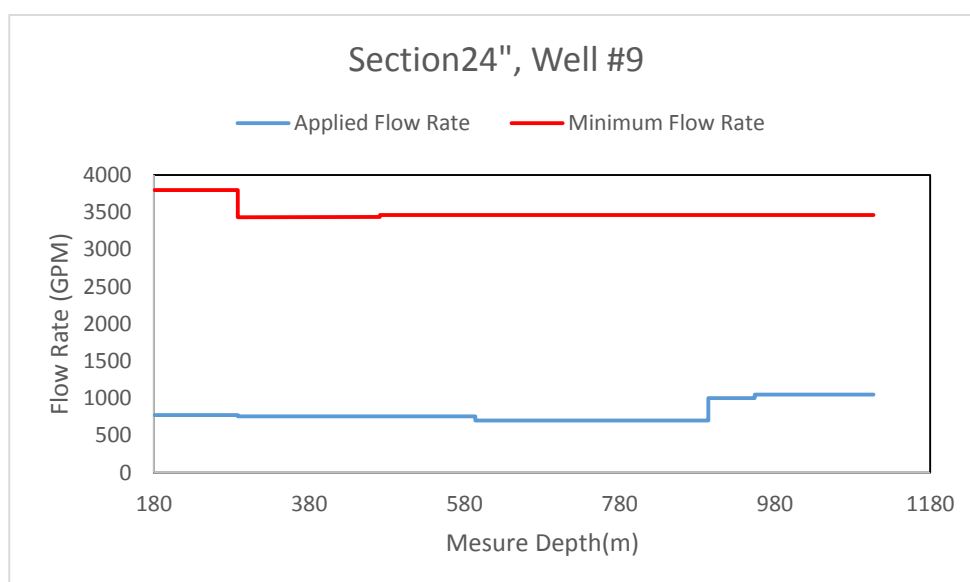
در آخرین مرحله باید مقدار ECD در کفشک لوله جداری (عمق 180 متری) در این دبی بهینه را محاسبه نماییم که برابر $9/33$ ppG است که این مقدار از فشار شکست سازند در این نقطه ($10/9$ ppG) کمتر است.

با به دست آوردن دبی بهینه نهایی و سطح مقطع بهینه جریان مته متناظر با این دبی ($0/586$ اینچ مربع)، می توان پارامترهای هیدرولیکی از قبیل درصد افت فشار در مته، توان هیدرولیکی اعمال شده به مته، توان هیدرولیکی مته در هر اینچ مربع، نیروی جت مته، سرعت جت سیال مته و وزن معادل گل در حال گردش در پاشنه لوله جداری را برای حالت حفاری با پارامترهای بهینه و گل طراحی شده و همچنین برای حالت حفاری با آب دریا به دست آورد.

تمام محاسباتی که برای اولین رانش مته در حفره ۲۴ اینچ چاه ۱ انجام شد عیناً برای سایر رانش‌های مته در حفره ۲۴ اینچ چاه ۱ و ۹ انجام می‌شود. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل‌های ۳-۴ تا ۶-۴ و جدول ۱-۴ نشان داده شده است.

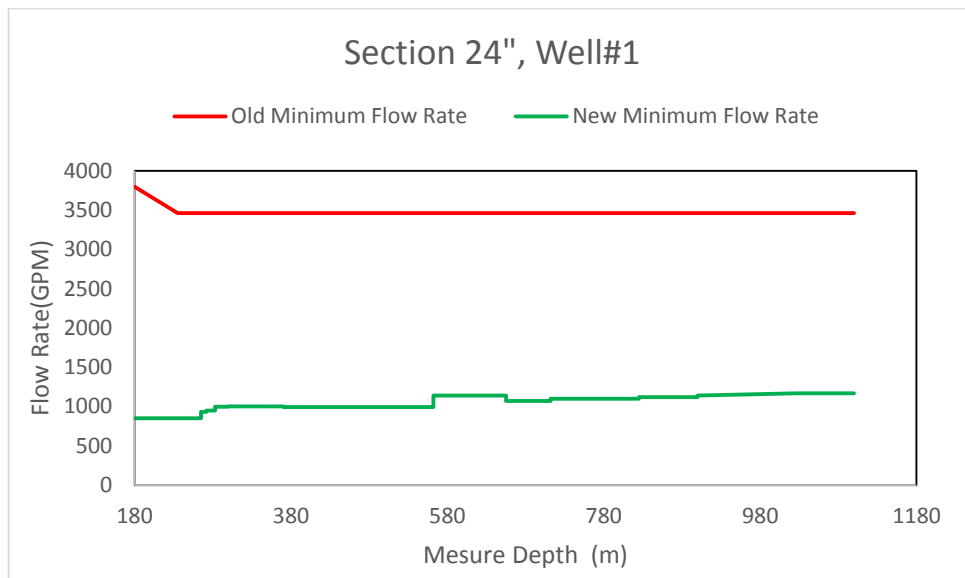


شکل ۳-۴: دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده شده در چاه ۱ (آب دریا)؛ زاویه شیب چاه ۱/۵ الی ۱۵/۵ درجه است.

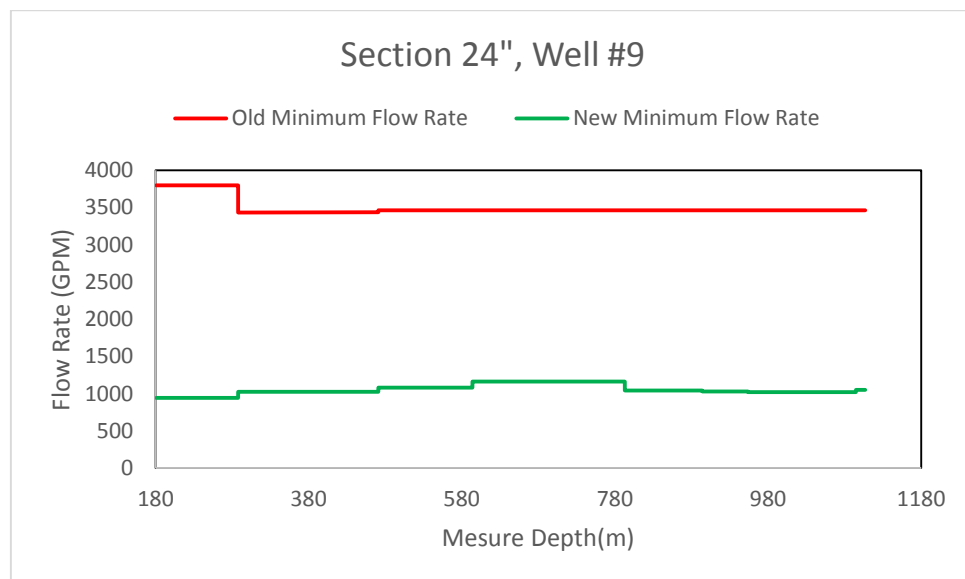


شکل ۴-۴: دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده شده در چاه ۹ (آب دریا)؛ زاویه شیب چاه ۰ الی ۱۵ درجه است.

شکل های ۴-۵ و ۴-۶، کاهش حداقل دبی مورد نیاز برای تمیز سازی چاه (بهبود وضعیت تمیز سازی چاه) با استفاده از گل طراحی شده را برای حفره ۲۴ اینچ چاه های ۱ و ۹ نشان می دهند.



شکل ۴-۵: تأثیر استفاده از گل طراحی شده بر کاهش حداقل دبی حمل کننده ها در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۱/۵ الی ۱۵/۵ درجه است.



شکل ۴-۶: تأثیر استفاده از گل طراحی شده بر کاهش حداقل دبی حمل کننده ها در چاه ۹؛ زاویه شیب چاه ۰ الی ۱۵ درجه است.

همان طور که در نمودارها پیداست، با طراحی گل جدید می توان توسط پمپ های موجود، به حداقل

دبی مورد نیاز برای تمیز سازی چاه دست یافت.

مقادیر پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده در حالت بهینه و حالت اصلی برای حفره ۲۴ اینچ چاه‌های ۱ و ۹ به‌طور کامل در جدول ۴-۱ آمده است.

همان‌طور که در جدول ۴-۱ نیز مشاهده می‌کنید، با تغییر خصوصیات سیال حفاری و طراحی گلی با خصوصیات رئولوژی مناسب برای تمیز سازی چاه و همچنین اعمال معیارهای بهینه‌سازی مته حفاری، شرایط مناسبی از نظر تمیز سازی کل چاه و تمیز سازی مته حفاری حاصل می‌شود.

جدول ۴-۱: پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۲۴ اینچ چاههای ۱ و ۹.

	Bit Run #		PV	YP	Q	Q _{min}	TFA	P _b	HHPb	HSI	IF	V _j	ECD _{shoe}
			cp.	lb _f /100ft ²	gal/min	gal/min	in ²	%pp	hhp	hhp/in ²	lb _f	ft/s	lb/gal
Well 1	#1	Orig.	1	0	815	3533.9	1.524	26	107.6	0.2	623	171.6	8.6
		Opt.	5	18	1010	856.6	0.586	68.5	1450.3	3.2	2603.8	553	9.33
	#2	Orig.	1	0	915	3460	1.524	25.5	164.7	0.4	816.4	200.3	8.6
		Opt.	5-6	19	1015	933-1140	0.928	43	594	1.4	1679	351	9.1
	#3	Orig.	1	0	1015	3460	1.117	38.7	334.14	0.7	1208.6	274.5	8.6
		Opt.	4-5	19	1015	1170	0.9	44	631	1.4	1731.2	369	9.1
Well 9	#1	Orig.	1	0	1000	3790	1.47	26	215	0.5	975.1	218.9	8.6
		Opt.	4	19	950	942	1	35	397	0.9	1290	305	8.8
	#2	Orig.	1	0	1014	3460	1.47	27	224.1	0.5	1002	222	8.6
		Opt.	4	19	1014	1078	0.94	45	577	1.3	1654	346.1	9.1
	#3	Orig.	1	0	1000-1050	3460	1.168	44	370	0.8	1298	283	8.6
		Opt.	5	19	1030	1160-1200	0.91	50	645	1.4	1763	363.1	9.19

۴-۴-۲ حفره ۱۶ اینچ

خلاصه‌ای از حفره ۱۶ اینچ

در پروژه حفاری این جکت دریایی، حفره ۱۶ اینچ چاه سومین مرحله حفاری است که بعد از حفره ۲۴ اینچ حفاری می‌شود. به‌طورمعمول حفره ۱۶ اینچ، از عمق ۱۱۰۰ متر و زاویه چاه ۱۵ درجه آغاز و تا عمق ۱۹۰۰ متر و زاویه ۴۵ یا ۶۰ درجه ادامه می‌یابد (چاه‌های ۱ و ۷ تا زاویه ۶۰ درجه ادامه می‌یابند و در بقیه چاه‌ها زاویه انتهایی ۴۵ درجه است). این حفره در قسمت زاویه سازی^۱ قرار دارد و به‌طورمعمول توسط ۲ الی ۳ مته حفاری شده است.

سرعت حفاری در اوایل حفره، حدود ۱۶ متر بر ساعت است و با افزایش عمق سرعت حفاری تا مقدار ۷ متر بر ساعت کاهش می‌یابد. دبی مورد استفاده برای حفاری این حفره، در اوایل حفاری حدود ۸۵۰ گالن بر دقیقه می‌باشد و سپس این دبی تا انتهای این حفره، در مقدار حداکثر دبی تولیدی که حدود ۱۰۱۵ الی ۱۰۳۰ گالن بر دقیقه است ثابت می‌ماند.

سیالات مورد استفاده در این حفره، گل بنتونیتی و پیل می‌باشند. البته سیالی که در هنگام حفاری از آن استفاده می‌شود گل بنتونیتی با وزن ۹/۱ الی ۹/۴۵ پوند بر گالن است. از پیل تنها برای تمیز سازی خرده‌های باقی‌مانده از زمان حفاری استفاده می‌شود. نوع پیل مورد استفاده در این حفره PHB Pill و NG Hi-Vis Pill می‌باشد که معمولاً بعد از حفاری یک شاخه از لوله، به مقدار حدود ۳۰ تا ۵۰ بشکه استفاده می‌شود.

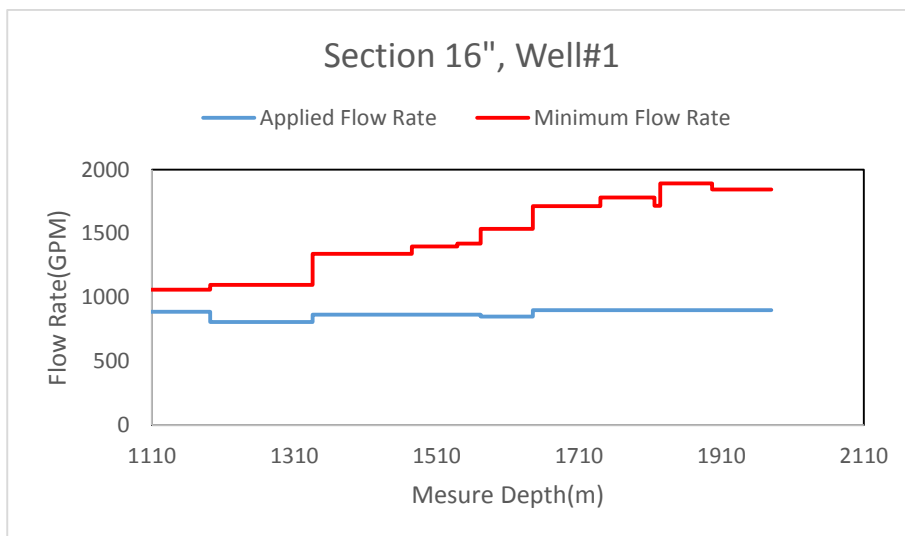
آنالیز حفره ۱۶ اینچ

با بررسی داده‌ها، دو چاه ۱ و ۲ به دلیل کامل‌تر بودن داده‌هایشان در این حفره از چاه، به‌عنوان چاه‌های مورد مطالعه انتخاب می‌شوند.

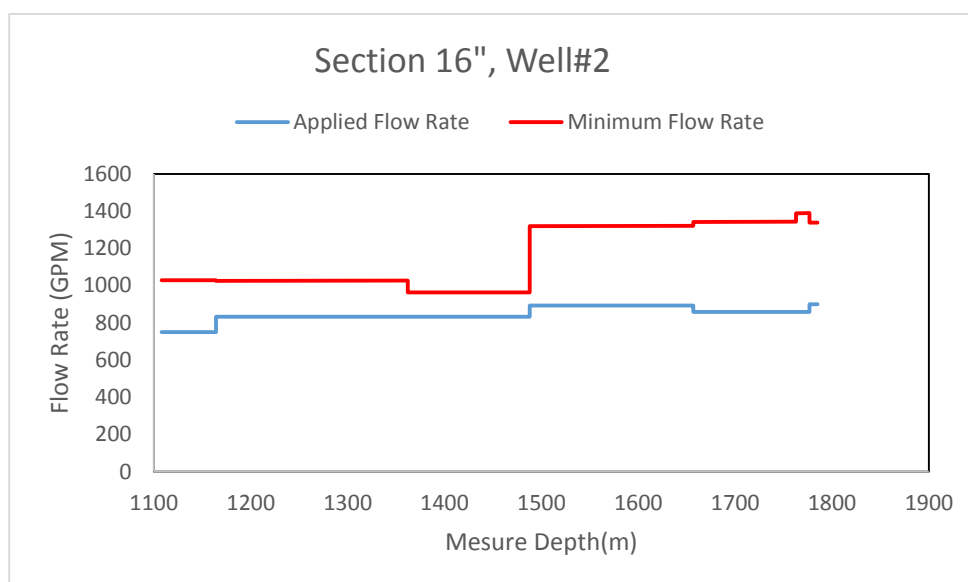
¹ Build Section

مطابق محاسبات مربوط به اولین رانش مته حفره ۲۴ اینچ چاه ۱، بعد از مشخص کردن محدوده عملیاتی، اولین گام در بهینه‌سازی محاسبه حداقل دبی حمل کنده‌ها است که برای محاسبه این پارامتر از روش پیشنهادی ارائه‌شده در فصل سوم استفاده می‌شود. نتایج حاصل از محاسبات نشان می‌دهد که با افزایش عمق و زاویه چاه در این حفره، مقدار حداقل دبی از مقدار حدود ۹۵۰ تا ۱۴۰۰ گالن بر دقیقه برای چاه ۲ و از ۱۰۲۰ تا ۱۷۰۰ گالن بر دقیقه برای چاه ۱ تغییر می‌کند. همان‌طور که می‌بینید، به دلیل بالا بودن حداقل دبی موردنیاز تمیز سازی چاه در این حفره، پمپ گل توانایی تمیز سازی چاه را نخواهد داشت؛ بنابراین باید با استفاده از راهکارهای بهبود تمیز سازی چاه، مقدار حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی چاه را به حداکثر دبی قابل تولید پمپ نزدیک کرد تا بتوان با استفاده از پمپ‌های موجود، تمیز سازی چاه را بهبود بخشید و عملیات بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری را آغاز نمود.

به‌منظور طراحی گل مناسب، مطابق روشی که در محاسبات اولین رانش حفره ۲۴ اینچ چاه ۱ ارائه شد خصوصیات گل جدید به دست می‌آید که شامل چگالی ۹/۱ الی ۹/۴ پوند بر گالن، گرانیروی پلاستیک $33 \text{ lb}_f/100\text{ft}^2$ الی $29 \text{ lb}_f/100\text{ft}^2$ و $32 \text{ lb}_f/100\text{ft}^2$ الی $28 \text{ lb}_f/100\text{ft}^2$ و نقطه تسلیم 13 cp الی ۱۵ به ترتیب برای چاه ۲ و ۱ می‌شود.

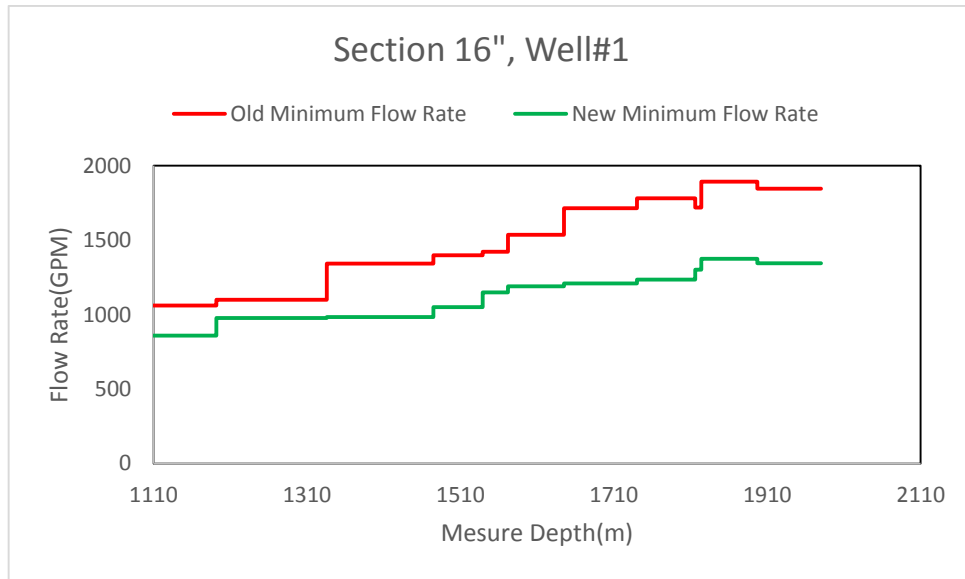


شکل ۴-۷: دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۶۰ درجه است.

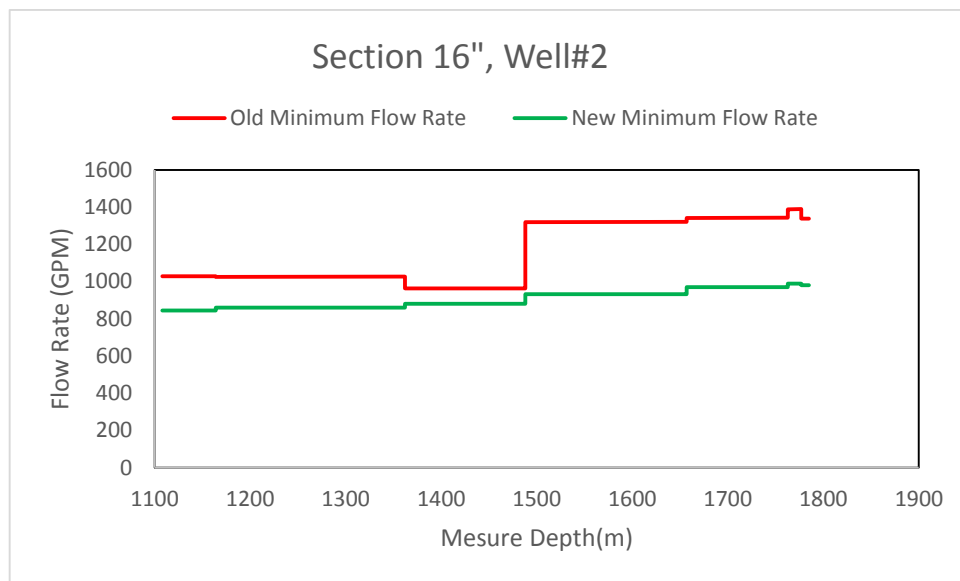


شکل ۴-۸: دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۲؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۴۵ درجه است.

شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰، کاهش حداقل دبی موردنیاز حمل کنده‌ها (بهبود وضعیت تمیز سازی چاه) با استفاده از گل طراحی‌شده را برای حفره ۱۶ اینچ چاه‌های ۱ و ۲ نشان می‌دهند.



شکل ۴-۹: تأثیر استفاده از گل طراحی شده بر کاهش حداقل دبی حمل کننده‌ها در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۶۰ درجه است.



شکل ۴-۱۰: تأثیر استفاده از گل طراحی شده بر کاهش حداقل دبی حمل کننده‌ها در چاه ۲؛ زاویه شیب چاه ۱۵/۵ الی ۴۵ درجه است.

بعد از طراحی گل مناسب و رساندن حداقل دبی موردنیاز به مقداری کمتر از توان تولیدی پمپ،

عملیات بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری مطابق با روندی که در اولین رانش مته حفره ۲۴ اینچ چاه ۱

طی شد انجام می‌شود. بعد از محاسبه دبی و اندازه نازل‌های (TFA) بهینه، مقادیر سایر پارامترهای

هیدرولیکی نیز به دست می آید که مقادیر پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده در حالت بهینه و حالت اصلی برای حفره ۱۶ اینچ چاه های ۱ و ۲ در جدول ۴-۲ آمده است.

بررسی تمیز سازی ته چاهی و مته در حفره ۱۶ اینچ نشان می دهد که اندازه نازل های استفاده شده در این حفره به اندازه نازل های بهینه نزدیک تر هستند و همین امر موجب تمیز سازی مناسب مته شده است. به همین دلیل در این حفره، مشکلات عدم تمیز سازی مته همچون دوباره خرد کردن خرده ها، درجا زدن مته و سایش مته ها کمتر گزارش شده است.

جدول ۴-۲: پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۱۶ اینچ چاههای ۱ و ۲.

	Bit Run		PV cp.	YP lb/100ft ²	Q gal/min	Q _{min} gal/min	TFA in ²	P _b %p _p	HHPb hhp	HSI hhp/in ²	IF lb _f	V _j ft/s	ECD _{shoe} lb/gal
Well 1	#1	Orig.	13	17-20	865	1460	0.92	30.7	381.6	1.9	1256.5	301.5	9.45
		Opt.	13	29-30	1000	1121	0.776	40.3	830	4.1	1991.8	413.4	9.52
	#2	Orig.	14-16	19-20	950	1718	1.104	23.1	354.8	1.8	1276.6	276	9.55
		Opt.	14-16	32	990	1300	0.831	34.5	709.4	3.5	1842.6	382.2	9.63
	#3	Orig.	15-16	19	900	1890	1.104	21.7	301.73	1.5	1148.7	261.4	9.54
		Opt.	15-16	33	995	1370	0.89	30.4	627.88	3.1	1737.8	359	9.64
2 Well	#1	Orig.	13-14	18-19	915	1342	1.11	19.4	311	1.5	1175.8	262.5	9.59
		Opt.	13-14	29-32	970	970	0.98	24	482.34	2.4	1508	317.6	9.68
	#2	Orig.	13-14	18-19	900	1388	1.18	19.3	296	1.5	1137	258	9.59
		Opt.	13-14	32	980	978	1	23.6	477.8	2.4	1508.5	314.5	9.68

۴-۴-۳ حفره ۱۲/۲۵ اینچ

خلاصه‌ای از حفره ۱۲/۲۵ اینچ

حفره ۱۲/۲۵ اینچ، به‌طور معمول از عمق ۱۸۵۰ متر و زاویه چاه حدود ۴۵ یا ۶۰ درجه آغاز و تا عمق ۳۴۵۰ یا ۴۳۰۰ متر و زاویه چاه ۴۵ یا ۶۰ درجه ادامه می‌یابد (چاه‌های ۱ و ۷ تا عمق ۴۳۰۰ متر و زاویه ۶۰ درجه ادامه می‌یابند و بقیه چاه‌ها به عمق و زاویه ۳۴۵۰ متر و ۴۵ درجه منتهی می‌شوند). این حفره که در قسمت زاویه ثابت^۱ قرار دارد و به‌طور معمول توسط ۳ الی ۶ مته حفاری شده است. سرعت حفاری در اوایل حفره، حدود ۱۶ متر بر ساعت است و با افزایش عمق سرعت حفاری تا مقدار ۷ متر بر ساعت کاهش می‌یابد. همچنین دبی مورد استفاده در اوایل حفاری حدود ۹۰۰ گالن بر دقیقه و به تدریج تا مقدار ۷۸۰ گالن بر دقیقه کاهش می‌یابد.

سیالات مورد استفاده در این حفره، گل پلیمری، هیدروفیل^۲ و Hi-Vis Pill می‌باشند. سیال حفاری تا اواسط حفره ۱۲/۲۵ اینچ، گل پلیمری با وزن ۹/۳ الی ۱۱ پوند بر گالن و سپس گل هیدروفیل با وزن ۱۱ الی ۱۱/۳ پوند بر گالن است. همچنین از Hi-Vis Pill برای تمیز سازی کنده‌های باقی‌مانده از حفاری و بعد از اتمام حفاری هر شاخه از لوله حفاری استفاده می‌شود.

آنالیز حفره ۱۲/۲۵ اینچ

با بررسی داده‌ها، دو چاه ۱ و ۹ به دلیل کامل‌تر بودن داده‌هایشان در این حفره از چاه، به‌عنوان چاه‌های مورد مطالعه انتخاب می‌شوند.

با وجود اینکه زاویه چاه در این حفره از چاه همانند حفره ۱۶ اینچ است و چاه از نظر تمیز سازی در زاویه‌های بحرانی قرار دارد اما به دلیل قطر کوچک‌تر حفره ۱۲/۲۵ اینچ نسبت به حفره ۱۶ اینچ وضعیت تمیز سازی شرایط مطلوب‌تری دارد. در واقع با کوچک‌تر شدن اندازه قطر چاه و تنگ‌تر شدن فضای

¹ Hold Section

² Hydro Foil

حلقوی، سرعت سیال در فضای حلقوی افزایش می‌یابد و این افزایش سرعت باعث بهبود انتقال خرده‌های حفاری به سطح دکل و تمیز سازی چاه می‌شود؛ بنابراین با وجود یکسان بودن زاویه چاه در این حفره و حفره ۱۶ اینچ، حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی چاه برای حفره ۱۲/۲۵ اینچ کمتر از حفره ۱۶ اینچ هست. به طوری که حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی حفره ۱۲/۲۵ اینچ، از مقدار حدود ۱۰۳۰ گالن بر دقیقه تا مقدار ۷۵۰ گالن بر دقیقه برای چاه ۹ و از حدود ۱۱۲۰ تا ۸۶۰ گالن بر دقیقه برای چاه ۱ تغییر می‌کند.

از آنجایی که حداقل دبی موردنیاز برای تمیز سازی چاه در این حفره، بخصوص در چاه ۹، نزدیک و حتی کمتر از مقدار ۱۰۰۰ گالن بر دقیقه است شاید این نتیجه‌گیری استنباط شود که در حفره ۱۲/۲۵ اینچ وضعیت تمیز سازی چاه مطلوب هست، اما این نتیجه‌گیری اشتباه است زیرا با افزایش عمق، افت فشار سیستم گردش گل افزایش می‌یابد و در نتیجه حداکثر دبی قابل تولید پمپ کاهش می‌یابد به طوری که حداکثر دبی قابل تولید پمپ از مقدار حدود ۱۰۳۰ گالن بر دقیقه به مقدار حدود ۹۷۰ گالن بر دقیقه می‌رسد.

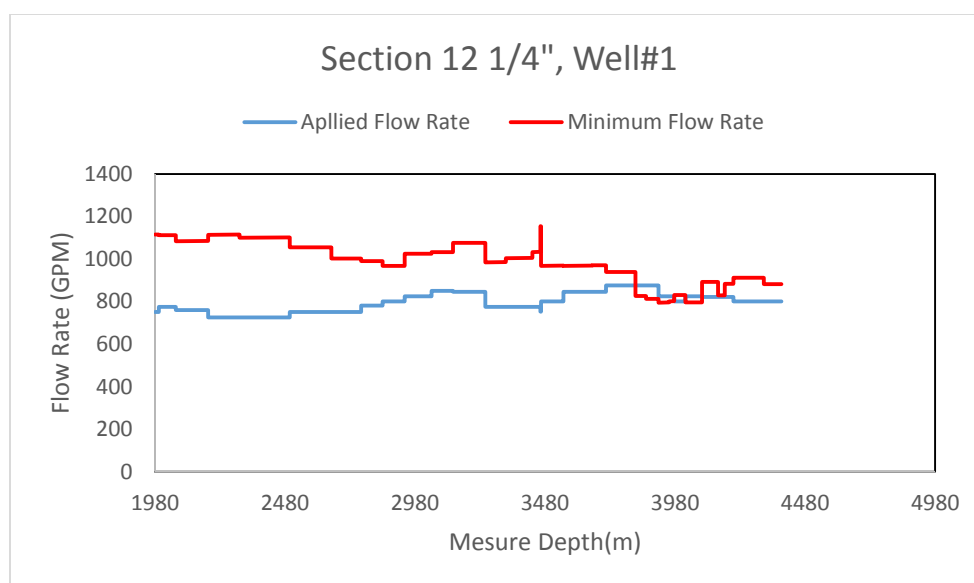
با توجه به موارد ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که به طور کلی وضعیت تمیز سازی چاه در حفره ۱۲/۲۵ اینچ چندان مناسب نیست و بایستی با استفاده از راهکارهای بهبود وضعیت تمیز سازی چاه تمیز سازی چاه در این حفره بهبود یابد.

به منظور طراحی گل جدید، با استفاده از مدل‌های موجود و بررسی انواع خصوصیات رئولوژی گل حفاری می‌توان نتیجه گرفت که با اعمال تغییرات اندک در خصوصیات گل استفاده شده، شرایط تمیز سازی چاه بهبود می‌یابد.

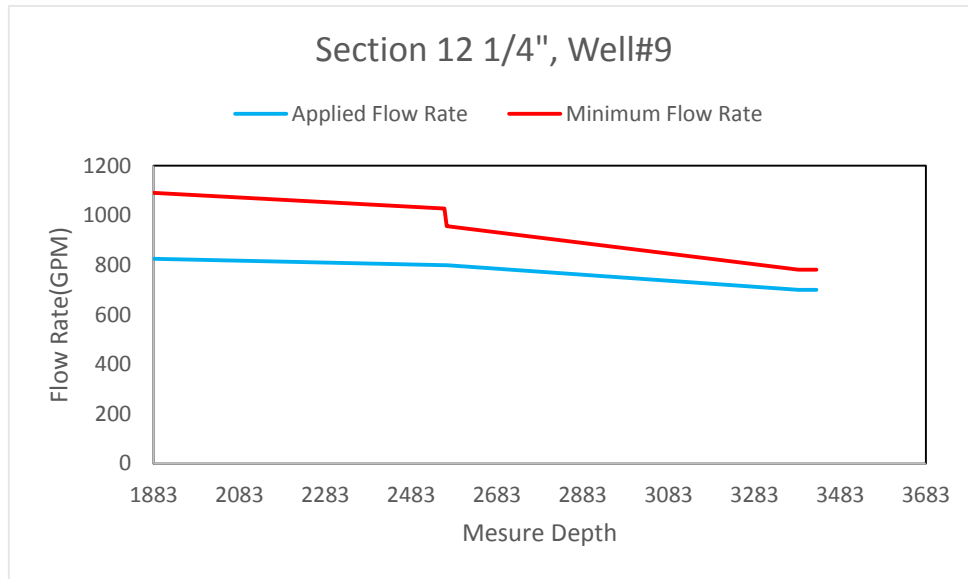
برای حفره ۱۲/۲۵ اینچ چاه ۹، به دلیل مناسب بودن خصوصیات رئولوژی گل هیدروفیل، می‌توان با تغییر خواص رئولوژی گل پلیمری و افزایش نقطه تسلیم آن، به شرایط مطلوب تمیز سازی چاه رسید؛ بنابراین به منظور طراحی گل مناسب، مطابق روشی که در محاسبات اولین رانش حفره ۲۴ اینچ چاه ۱

ارائه شد، خصوصیات گل جدید به دست می آید که برای چاه ۹، پیشنهاد می شود از گل پلیمری با وزن حدود ۹/۳ ppg، گرانیوی پلاستیک ۱۴ cp الی ۱۹ cp و نقطه تسلیم $21 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$ همچنین از همان گل هیدروفیل بکار رفته در حفاری استفاده شود. برای حفره ۱۲/۲۵ اینچ چاه ۱ نیز، به دلیل شرایط نامطلوب تمیز سازی چاه، پیشنهاد می شود از گل پلیمری و هیدروفیل با وزن حدود ۹/۳ ppg الی ۱۱/۳، گرانیوی پلاستیک ۱۹ cp الی ۲۲ cp و نقطه تسلیم $22 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$ الی $27 \text{ lbf}/100\text{ft}^2$ استفاده شود.

با استفاده از گل های پیشنهادی برای چاه ۹، می توان حداقل دبی مورد نیاز تمیز سازی چاه را به عددی کمتر از حداکثر توان پمپ و مقدار حدود 780 gpm الی 960 gpm و برای چاه ۱ نیز، می توان حداقل دبی را به مقدار 800 gpm الی 960 gpm رساند.

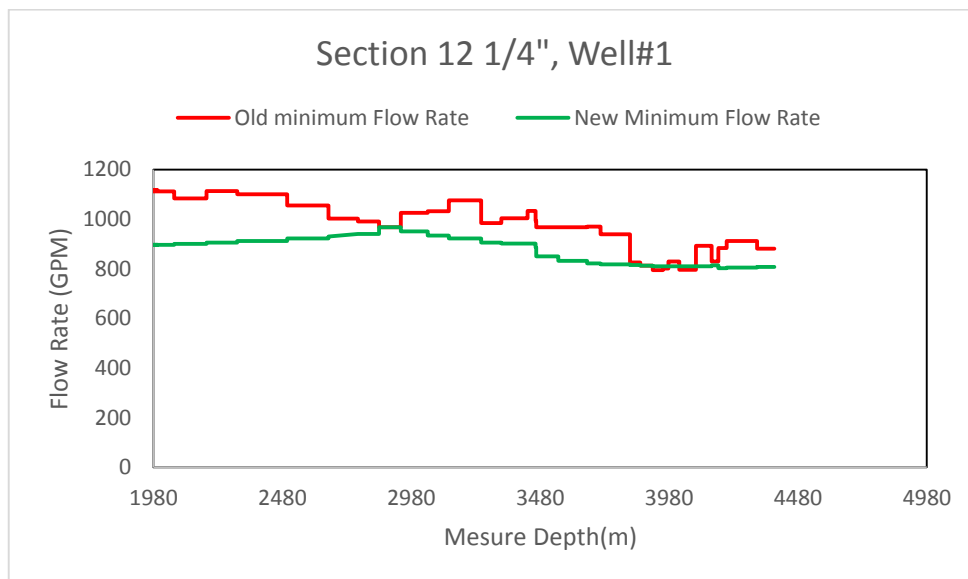


شکل ۱۱-۴: دبی بکار رفته و حداقل دبی مورد نیاز حمل کننده ها برای سیال حفاری استفاده شده در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است.

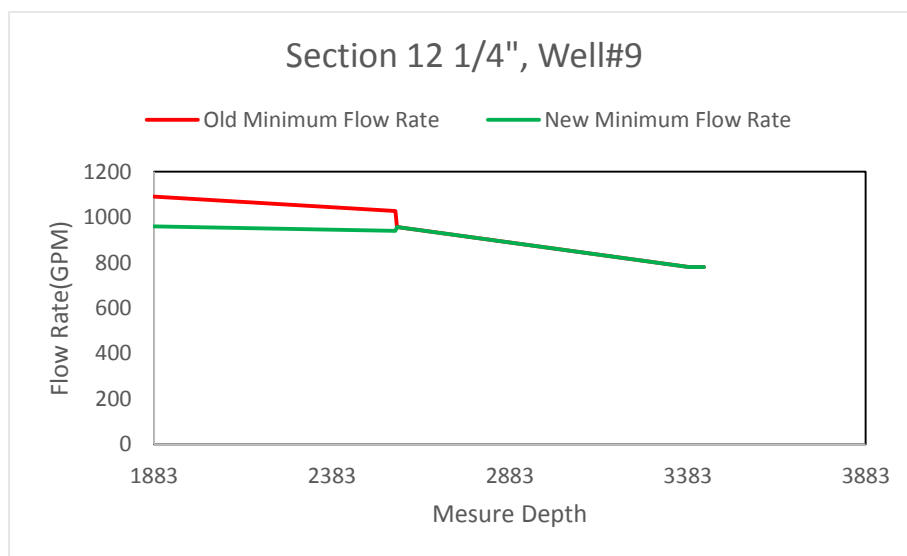


شکل ۴-۱۲: دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده‌شده در چاه ۹؛ زاویه شیب چاه ۴۵ درجه است.

شکل‌های ۴-۱۳ و ۴-۱۴، کاهش حداقل دبی موردنیاز تمیز سازی چاه (بهبود وضعیت تمیز سازی چاه) با استفاده از گل طراحی‌شده را برای حفره ۱۲/۲۵ اینچ چاه‌های ۱ و ۹ نشان می‌دهند.



شکل ۴-۱۳: تأثیر استفاده از گل طراحی‌شده بر کاهش حداقل دبی حمل کننده‌ها در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است.



شکل ۴-۱۴: تأثیر استفاده از گل طراحی شده بر کاهش حداقل دبی حمل کنده‌ها در چاه ۹؛ زاویه شیب چاه ۴۵ است.

بعد از طراحی گل مناسب و رساندن حداقل دبی موردنیاز به مقداری کمتر از توان تولیدی پمپ، عملیات بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری مطابق با روندی که در اولین رانش مته حفره ۲۴ اینچ چاه ۱ طی شد انجام می‌شود. بعد از محاسبه دبی و اندازه نازل‌های (TFA) بهینه، مقادیر سایر پارامترهای هیدرولیکی نیز به دست می‌آید که مقادیر پارامترهای هیدرولیکی محاسبه‌شده در حالت بهینه و حالت اصلی برای حفره ۱۲/۲۵ اینچ چاه‌های ۱ و ۹ در جدول ۴-۳ آمده است.

جدول ۳-۴: پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۱۲/۲۵ اینچ چاههای ۱ و ۹

Well	Bit Run #		PV	YP	Q	Q _{min}	TFA	P _b	HHP _b	HSI	IF	V _j	ECD _{shoe}
			cp.	lb _f /100ft ²	gal/min	gal/min	in ²	%pp	hhp	hhp/in ²	lb _f	ft/s	lb/gal
Well 1	#1	Orig.	16-21	19-24	700-800	990-1111	1.2	11.6	170.94	1.5	815.5	208.1	10.08
		Opt.	16-21	27	940	900-940	0.924	19.5	506.84	4.3	1541.6	326.4	10.13
	#2	Orig.	20	21	750-870	967-1030	1.39	8.7	144.44	1.2	774.7	185.1	10.43
		Opt.	20	25	900	900	1.06	14.2	353.30	3	1285.1	273	10.49
	#3	Orig.	20-21	20-24	860	812-992	1.39	8	192	1.6	961.7	199	11.23
		Opt.	20-21	25	812	812	0.96	15	340.3	3	1240	272.4	11.23
	#4	Orig.	20	22	821	794-829	1.39	7.9	173	1.4	908	189	11.60
		Opt.	20	24	810	810	1.07	13	280.5	2.5	1146	243	11.63
	#5	Orig.	20	20	800	880	1.49	6.5	139	1.2	802	172	11.63
		Opt.	20	24	808	808	1.29	8.5	190	1.6	942	200	11.63
Well 9	#1	Orig.	14-17	15-18	800	1030	1.49	11.9	120	1	692	172.1	9.96
		Opt.	14-17	21	950	942	1.2	16	310.2	2.6	1213	254	10.01
	#2	Orig.	16-25	19-22	700	781	1.58	8.2	83.07	0.7	581.3	142	10.17
		Opt.	16-25	19-22	790	781	0.9	23	369	3.1	1301	281	11.62

۴-۴-۴ حفره ۸/۵ اینچ

خلاصه‌ای از حفره ۸/۵ اینچ

حفره ۸/۵ اینچ، به‌طورمعمول از عمق ۳۹۵۰ یا ۴۳۰۰ متر و زاویه چاه حدود ۴۵ یا ۶۰ درجه آغاز و تا عمق ۳۹۰۰ یا ۵۰۰۰ متر و زاویه چاه ۴۵ یا ۶۰ درجه ادامه می‌یابد (چاه‌های ۱ و ۷ تا عمق ۵۰۰۰ متر و زاویه ۶۰ درجه ادامه می‌یابند و بقیه چاه‌ها به عمق و زاویه ۳۹۰۰ متر و ۴۵ درجه منتهی می‌شوند). این حفره که در قسمت زاویه ثابت نیز قرار دارد به‌طورمعمول توسط ۱ الی ۲ مته حفاری شده است.

معمولاً سرعت حفاری در این حفره حدود ۶ الی ۱۰ متر بر ساعت می‌باشد. همچنین دبی مورد استفاده حدود ۴۸۰ الی ۵۶۰ گالن بر دقیقه است.

سیالات مورد استفاده در این حفره، گل پلیمری و یا گل پلیمری نمکی^۱ می‌باشند.

آنالیز حفره ۸/۵ اینچ

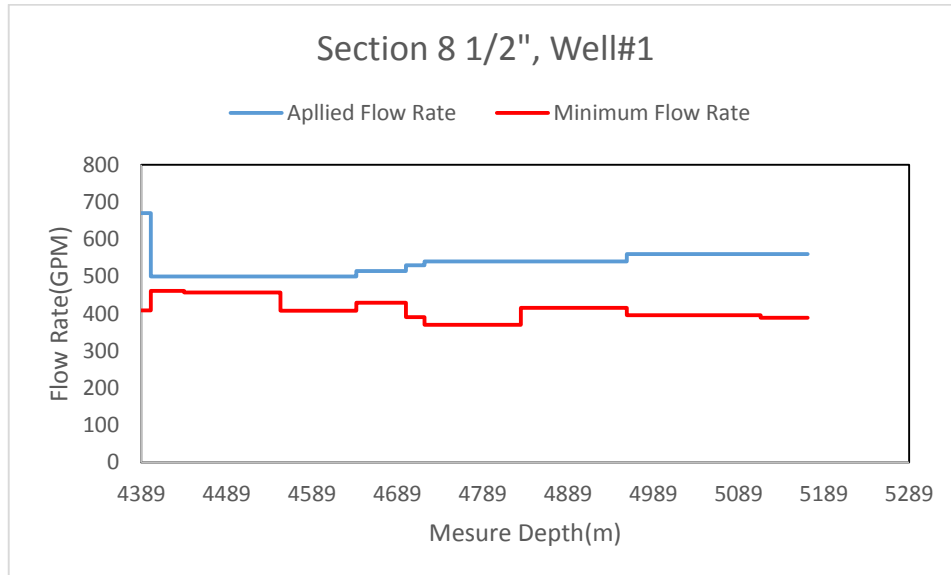
با بررسی داده‌ها، چاه‌های ۱، ۷ و ۸ به دلیل کامل‌تر بودن داده‌هایشان در این حفره از چاه، به‌عنوان چاه‌های مورد مطالعه انتخاب می‌شوند.

با وجود اینکه زاویه چاه در این حفره از چاه همانند حفره ۱۲/۲۵ اینچ است و چاه‌ها در زاویه‌های بحرانی از نظر تمیز سازی قرار دارند؛ اما وضعیت تمیز سازی به دلیل قطر کوچک‌تر حفره ۸/۵ اینچ نسبت به حفره ۱۲/۲۵ اینچ شرایط بسیار بهتری دارد. به‌طوری‌که حداقل دبی مورد نیاز برای تمیز سازی حفره ۸/۵ اینچ، از مقدار حدود ۳۸۰ گالن بر دقیقه تا مقدار ۴۶۰ گالن بر دقیقه تغییر می‌کند.

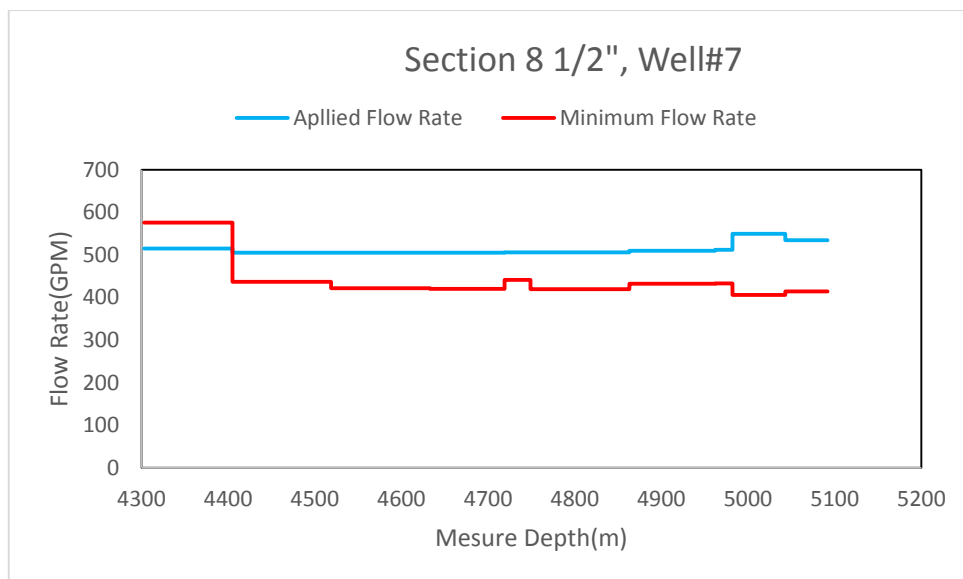
با محاسبه حداقل دبی مورد نیاز توسط روش پیشنهادی ارائه‌شده در فصل سوم و مقایسه آن با دبی استفاده‌شده در حین حفاری می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت تمیز سازی حفره ۸/۵ اینچ چاه‌های ۱،

¹ Salt-Polymer

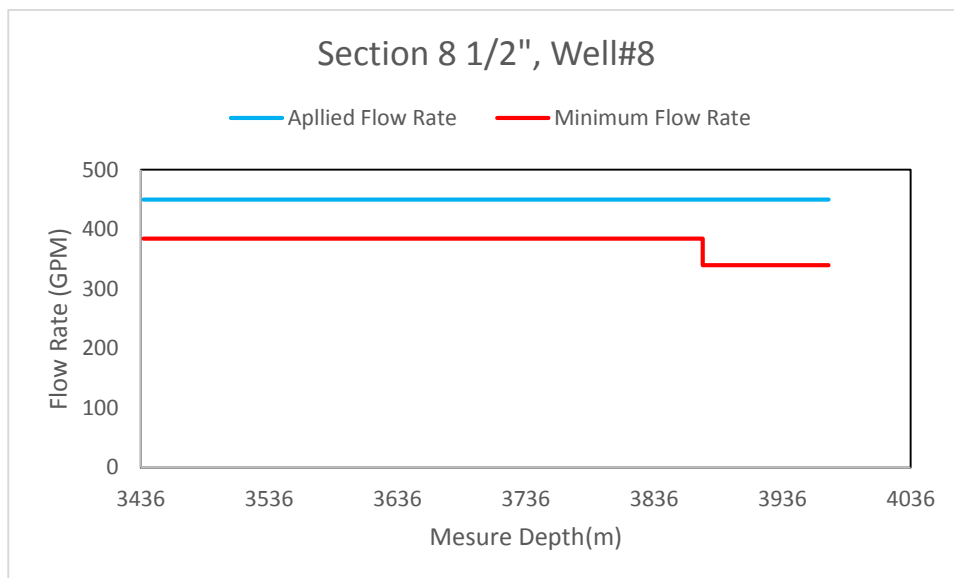
۷ و ۸ وضعیت مطلوبی دارند؛ به طوری که در همه چاهها حداقل دبی مورد نیاز برای تمیز سازی چاه، کمتر از دبی استفاده شده در حین حفاری می باشد.



شکل ۴-۱۵: دبی بکار رفته و حداقل دبی مورد نیاز حمل کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده شده در چاه ۱؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است.



شکل ۴-۱۶: دبی بکار رفته و حداقل دبی مورد نیاز حمل کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده شده در چاه ۷؛ زاویه شیب چاه ۶۰ درجه است.



شکل ۴-۱۷: دبی بکار رفته و حداقل دبی موردنیاز حمل کننده‌ها برای سیال حفاری استفاده شده در چاه ۸؛ زاویه شیب چاه ۴۵ درجه است.

بنابراین برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری در این حفره از چاه، نیاز به تغییر خصوصیات سیال حفاری نیست و مطابق روشی که در اولین رانش مته حفره ۲۴ اینچ چاه ۱ توضیح داده شد، بعد از محاسبه محدوده عملیاتی فرآیند محاسبه دبی و اندازه نازل‌های بهینه را آغاز می‌کنیم. بعد از محاسبه دبی و اندازه نازل‌های (TFA) بهینه، مقادیر سایر پارامترهای هیدرولیکی نیز به دست می‌آید که مقادیر پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده در حالت بهینه و حالت اصلی برای حفره ۸/۵ اینچ چاه‌های ۱، ۷ و ۸ در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴: پارامترهای هیدرولیکی استفاده شده در حفاری و پارامترهای بهینه پیشنهادی برای حفاری حفره ۸/۵ اینچ چاه های ۱، ۷ و ۸.

	Bit Run #		PV cp.	YP lb _f /100ft ²	Q gal/min	Q _{min} gal/min	TFA in ²	P _b %p _p	HHPb .hhp	HSI hhp/in ²	IF lb _f	V _j ft/s	ECD _{shoe} lb/gal
Well 1	#1	Orig.	14-24	19-26	500-560	388-407	0.76	12.44	174.74	3.1	733.8	236.4	12.66
		Opt.	14-24	19-26	460	388-407	0.357	35.17	438.92	7.7	1054	413.4	12.41
Well 7	#1	Orig.	18-22	19-21	520	420-576	0.76	11.65	137.97	2.4	623.8	219.5	12.14
		Opt.	18-22	19-21	468	420-576	0.357	35.25	455.74	8	1075	420.6	12.02
	#2	Orig.	21	21-23	520-580	414-433	0.76	11.94	163.18	2.9	697.8	232.2	12.23
		Opt.	21	21-23	460	414-433	0.35	35.31	450.25	7.9	1060	421.7	12.03
Well 8	#1	Orig.	18-23	18-27	450	340-383	0.76	16	90.65	1.6	473.8	190	11.79

۵ فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این فصل با توجه به نتایج به دست آمده در فصل‌های قبلی و مطالعه موردی صورت گرفته، نتایج کلی و پیشنهادهای مورد نظر برای تحقیقات بعدی ارائه می‌گردد.

۱-۵ نتیجه‌گیری

- انتخاب نوع مدل رئولوژی در محاسبات افت فشار، تخمین وزن معادل گل در حال گردش و فرآیند بهینه‌سازی بسیار تأثیرگذار می‌باشد.
- با ترکیب روش انطباق نمودار و رگرسیون خطی و غیرخطی و استفاده از دو پارامتر میانگین درصد خطا (EAAP) و ریشه (جذر) مربعات خطا (R^2) می‌توان بهترین مدل رئولوژی که بیشترین دقت را در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری دارد مشخص کرد.
- بهترین مدل رئولوژی از نظر دقت در پیش‌بینی خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری بستگی به سیال حفاری دارد؛ به طوری که برای دو سیال مورد بررسی در این پایان‌نامه نتایج تقریباً متفاوت است. برای یکی از سیالات، مدل سیسکو، API، هرشل بالکلی، رابرتسون-استیف، کی سون، پاورلاو و بینگهام پلاستیک به ترتیب بهترین مدل‌ها برای توصیف خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری هستند و برای سیال دیگر، مدل رابرتسون-استیف، هرشل بالکلی، API، سیسکو، پاورلاو، کی سون و بینگهام پلاستیک به ترتیب بهترین مدل‌ها برای توصیف خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری هستند.
- زمانی که یک مدل رئولوژی خصوصیات رئولوژیکی سیال را با دقت خوبی پیش‌بینی می‌کند الزاماً این مدل نمی‌تواند خصوصیات هیدرولیکی جریان مثل افت فشار را نیز به خوبی پیش‌بینی نماید.
- مدل کی سون بهترین و دقیق‌ترین مدل برای محاسبات افت فشار است؛ زیرا علاوه بر دقت بالا در تخمین افت فشارها، مدلی ساده و دو پارامتری است که همین سادگی باعث افزایش دقت این مدل می‌شود.

- مکانیسم انتقال کنده‌ها در چاه‌های عمود و نزدیک به عمود و چاه‌های مایل و افقی متفاوت است. بر اساس این تفاوت‌ها، چاه از نظر مکانیسم‌های انتقال کنده‌ها و تمیز سازی به دو بخش ۰ تا ۳۵ و ۳۵ تا ۹۰ درجه تقسیم می‌شود.
- در قسمت‌ها عمودی و نزدیک به عمود چاه (زاویه ۰ تا ۳۵ درجه)، از مدل پراکندگی برای محاسبه غلظت کنده‌ها استفاده می‌شود و با توجه به اینکه حداکثر مجاز غلظت کنده‌ها در فضای حلقوی این بخش از چاه کمتر از ۰.۵٪ حجمی می‌باشد، می‌توان حداقل دبی لازم برای تمیز سازی چاه را توسط غلظت به دست آمده از مدل پراکندگی محاسبه نمود.
- در قسمت‌های مایل و افقی چاه (زاویه ۴۰ تا ۹۰)، حداقل دبی مورد نیاز به صورت حداقل دبی که از تشکیل بسترهای کنده حفاری جلوگیری می‌کند تعریف می‌شود.
- از میان مدل‌های تحلیلی-تجربی موجود برای محاسبه حداقل دبی مورد نیاز برای قسمت‌های مایل و افقی چاه، مدل اصلاح شده لارسن دقت نسبتاً بالا ولی محدود به زاویه ۵۵ تا ۹۰ درجه است. مدل روبیاندینی برای همه زاویه‌ها ولی دقت پایینی دارد. مدل ملک‌زاده و محمدصالحی برای زاویه‌های ۰ تا ۴۰ درجه دقت نسبتاً پایینی دارد.
- با ترکیب مدل‌های پراکندگی و اصلاح شده لارسن و درون‌یابی زاویه‌های (۳۰ تا ۵۵ درجه) و سپس ترکیب مدل حاصل با مدل روبیاندینی و در نهایت اعتبار سنجی آن با داده‌های آزمایشگاهی لارسن (۱۹۹۰) می‌توان به روشی یکپارچه برای محاسبه حداقل دبی مورد نیاز تمیز سازی چاه با دقتی بالاتر از مدل‌های پیشین دست یافت.
- برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری با در نظر گرفتن تمیز سازی چاه و وزن معادل گل در حال گردش (ECD)، از دو پنجره عملیاتی تحت عنوان پنجره هیدرولیک فضای حلقوی و پنجره بهینه‌سازی هیدرولیک مته استفاده می‌شود و با ایجاد ارتباط میان این دو پنجره عملیاتی، می‌توان به دبی و اندازه نازل‌های بهینه‌ای رسید که علاوه بر تمیز سازی کامل چاه (تمیز سازی مته و کل

فضای حلقوی چاه) وزن معادل گل در حال چرخش را میان پنجره ایمن گل نگه می‌دارد و منجر به پایداری دیواره چاه می‌شود.

- یکی از راهکارها برای بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری تغییر خصوصیات گل حفاری است. در واقع زمانی که با انتخاب دبی و اندازه نازل مناسب نمی‌توان هیدرولیک حفاری را از نظر تمیز سازی و پایداری دیواره چاه بهینه کرد، بهترین گزینه تغییر خصوصیات سیال (خصوصیات رئولوژیکی و وزن گل) می‌باشد.
- در بخش ۲۴، ۱۶ و ۱۲/۲۵ اینچ چاه‌های جکت دریایی مورد مطالعه، با طراحی گلی جدید می‌توان هیدرولیک حفاری را با در نظر گرفتن تمیز سازی چاه و ECD به‌خوبی بهینه‌سازی کرد و به دبی و اندازه نازل‌های (TFA) بهینه در هر رانش مته رسید.

۲-۵ پیشنهادها

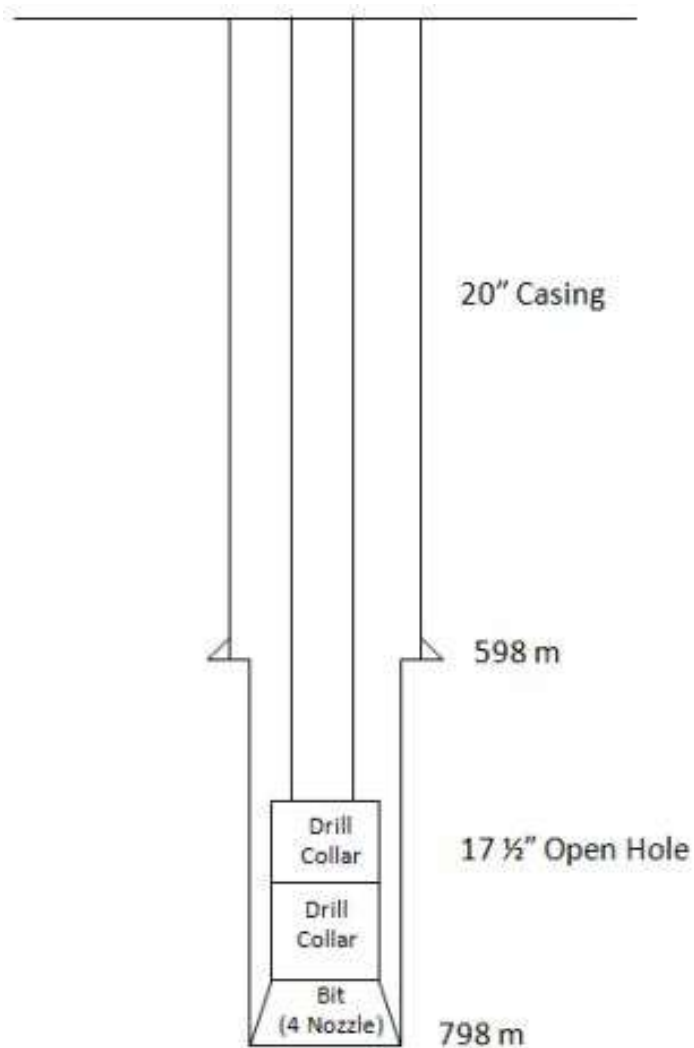
- چرخش رشته حفاری و خروج از مرکز رشته حفاری می‌تواند بر روی افت فشار فضای حلقوی، وزن معادل گل در حال گردش و فرآیند تمیز سازی چاه در قسمت‌های مایل و افقی چاه تأثیر بگذارد؛ بنابراین استفاده از مدل‌های عددی برای در نظر گرفتن تأثیر این پارامترها پیشنهاد می‌شود.
- اتصالات رشته حفاری نیز می‌تواند با تغییر قطر و اندازه فضای حلقوی بر روی افت فشار فضای حلقوی مؤثر باشد؛ بنابراین استفاده از مدل‌های عددی برای در نظر گرفتن تأثیر این پارامتر پیشنهاد می‌شود.
- در نظر گرفتن حالت غیر پایا (گذرا) و همراه با فرسایش، برای بستر کنده‌های حفاری در محاسبات تمیز سازی چاه.

- در این پایان‌نامه از روش‌های تحلیل-تجربی برای بررسی فرآیند تمیز سازی چاه استفاده شده که دقت کمتری نسبت به مدل‌های مکانیکی و عددی دارند؛ بنابراین برای افزایش دقت محاسبات استفاده از مدل‌های عددی و مکانیکی پیشنهاد می‌شود.
- در این پایان‌نامه در قسمت بهینه‌سازی هیدرولیک حفاری، برای حالتی که مجبور به تغییر خصوصیات رئولوژی سیال حفاری بودیم از روش سعی و خطا به‌منظور یافتن خصوصیات رئولوژی مناسب استفاده شد. پیشنهاد می‌شود برای افزایش دقت و سرعت از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده شود.

پیوست‌ها

پیوست "الف"

ابعاد هندسی بخش‌های جداره گذاری شده و جداره گذاری نشده، ابعاد لوله جداری و چاه، خصوصیات رئولوژیکی گل، ابعاد رشته حفاری و فشار لوله ایستا متناظر با هر دبی به ترتیب در در شکل الف-۱، جداول الف-۱، الف-۲، الف-۳ و الف-۴ آمده است [۱۶].



شکل الف-۱: شماتیکی از چاه و لوله جداری [۱۶].

جدول الف-۱: ابعاد لوله جداری و چاه [۱۶].

سایز لوله جداری (in)		عمق (m)		بخش چاه باز (in)
قطر خارجی	قطر داخلی	از	تا	17 ½
20	19	0	598	
		598	798	

جدول الف-۲: داده‌های رئولوژی اندازه‌گیری شده در شرایط استاندارد [۱۶].

سرعت چرخشی (rpm)	مقدار خوانده شده از Fann35 (degree)
600	38
300	26
200	22
100	15
6	5
3	4.5

جدول الف-۳: ابعاد رشته حفاری [۱۶].

نوع	طول (m)	قطر خارجی (in)	قطر داخلی (in)
Stand Pipe	20	-	4
Rotary Hose	20	-	3.5
Swivel	3.5	-	3.5
Kelly	12	-	3.5
Drill Pipe	513.6	5	4.28
Heavy Weigth	137	5	3
Drill Collar	70	9	3
Drill Collar	77	11 ¼	3
Bit		0.4	Nozzles: +"3* 15/32 "1 * 14/32

منابع و مراجع

- [۱] Mohammadsalehi M., Malekzadeh N., (2011) "Optimization of Hole Cleaning and Cuttings Removal in Vertical and Horizontal Wells", SPE 143675, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia.
- [۲] Noah A.Z. (2013) "Optimizing Drilling Fluid Properties and Flow Rates for Effective Hole Cleaning at High- Angle and Horizontal Wells", *Journal of Applied Sciences Research*, Vol.9, N. 1, pp. 705-718.
- [۳] Zhang F., Miska S., Yu M., Ozbayoglu E. and Takach N., (2015) "Is Well Clean Enough? A Fast Approach to Estimate Hole Cleaning for Directional Drilling", SPE-173681-MS, SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition, Woodlands, Texas, USA.
- [۴] Rubiandini R., (1999) "Equation for Estimating Mud Minimum Rate for Cuttings Transport in an Inclined-Until-Horizontal Well", SPE/IADC 57541, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Abu Dhabi.
- [۵] Unegbu C., (2010) "Hole Cleaning and Hydraulics", M.Sc. thesis, University of Stavanger, Norway.
- [۶] Pereira J., (1999) "Comprehensive Optimization of Drilling Parameters for Horizontal Wells", M.Sc. thesis, The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma.
- [۷] API Recommended Practice 13D, (2009) "Rheology and Hydraulics of Oil-Well Drilling Fluids".
- [۸] Adari R.B., Miska S., Kuru E., Bern P. and Saasen, A., (2000) "Selecting Drilling Fluid Properties and Flow rates for Effective Hole Cleaning in High angle and Horizontal wells", SPE 63050, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas.
- [۹] Aadnøy B., (2010) "Modern Well Design", Taylor & Francis Group, London, UK, Second edition.pp38-45.
- [۱۰] سالم ا، شپهر م، شایسته کو خدابنده ا، (۱۳۸۴)، "مطالعه خواص رئولوژیکی گل حفاری با استفاده از مدل ریاضی جدید"، اولین کنگره ملی صنعت حفاری ایران. تهران.

- [۱۱] پور شیرانی س.، هرمزی ف و جهانگیری م، (۱۳۸۷)، "تعیین رفتار رئولوژیکی سیال حفاری گل سنگین"، اولین کنگره ملی صنعت حفاری ایران، تهران.
- [۱۲] Okafor M. and Evers J., (1992) "Experimental Comparison of Rheology Models for Drilling Fluids", SPE 24086-MS Western Regional Meeting, Bakersfield, California.
- [۱۳] Maglione R. and Robotti G., (1996) "Field Rheological Parameters Improve Stand Pipe Pressure Prediction While Drilling", SPE Latin America/ Caribbean Petroleum Engineering Conference.
- [۱۴] Simon K., (2004) "The Role of Different Rheological Models in Accuracy of Pressure Loss Prediction", *Rudarsko-geološko-naftni zbornik* Vol. 16 pp. 85-89.
- [۱۵] Ochoa M., (2006) "Analysis of Drilling Fluid Rheology and Tool Joint Effect to Reduce in Hydraulics Calculation", Ph.D. dissertation, The University of Texas A&M University, Texas, USA.
- [۱۶] Chowdhury D., Skalle P. and Rahman M., (2009) "Prediction of Stand Pipe Pressure Using Conventional approach", Chemical Engineering Research Bulletin.
- [۱۷] Okoli U., (2015) "Optimizing Hydraulics for Drilling Operations", SPE-178478-MS, Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Lagos, Nigeria.
- [۱۸] Sadigov J. and Belayneh M., (2016) "Analyses of Field Measured Data with Rheology and Hydraulics Models", *International Journal of Fluids Engineering*. Vol. 8, N. 1, pp. 1-12.
- [۱۹] Zhang F., (2015) "Numerical Simulation and Experimental Study of Cuttings Transport in Intermediate Inclined Wells", Ph.D. dissertation, The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, USA.
- [۲۰] Chien S.F., (1972) "Annular Velocity for Rotary Drilling Operations", *International journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 9, No. 3, pp. 403-416.
- [۲۱] Moore Preston L., (1974) "Drilling Practice Manual", The Petroleum Publishing Co., Tulsa.

- [۲۲] Larsen T.I., (1990) "A Study of the Critical Fluid Velocity in Cuttings Transport for Inclined Wellbores", M.Sc. thesis, The University of Tulsa, Tulsa, OK, USA.
- [۲۳] Jalukar L.S., (1993) "A Study of Hole Size Effect on Critical and Subcritical Drilling Fluid Velocities in Cuttings Transport for Inclined Wellbores", M.Sc. thesis, The University of Tulsa, Tulsa, OK, USA.
- [۲۴] Bassal A. A., (1996) "The Effect of Drill Pipe Rotation on Cuttings Transport in Inclined Wellbores", M.Sc. thesis, University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, USA.
- [۲۵] Ozbayoglu M.E., Sorgun M., Saasen A. and K. Svanes (2010) "Hole Cleaning Performance of Light-Weight Drilling Fluids During Horizontal Underbalanced Drilling", SPE 136689, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, Vol. 49, No.04, p21-26.
- [۲۶] Malekzadeh N. and Mohammadsalehi M., (2011) "Hole Cleaning Optimization in Horizontal Wells, a New Method to Compensate Negative Hole Inclination Effects", SPE 143676, Brasil Offshore Conference and Exhibition held in Macae, Brazil.
- [۲۷] Peterson J., (2015) "Determining the Cuttings Critical Transport Fluid Velocity using Simple Geometrical Approximations", SPE-173843, SPE Bergen Seminar held in Bergen, Norway.
- [۲۸] Kendall H.A. and Goins W.C., (1960) "Design and Operation of Jet-Bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact Force and Jet Velocity", *Petroleum Transactions, AIME*, Vol. 219, pp. 238-250.
- [۲۹] Randall B.V., (1975) "Optimum Hydraulics In The Oil Patch", *Petroleum Engineer*, 48, 36.
- [۳۰] Miska S. and Skalle P., (1981) "Theoretical Description of A New Method of Optimal Program Design", *Society of Petroleum Engineers Journal*, Vol 25, No. 4, pp. 425-434.
- [۳۱] Maidla E.E., Reay A.J., Beck F.E. and Tan C.P., (1996) "Rheology Design to Optimize Rate of Penetration", IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana.
- [۳۲] Zamora M. and Roy S., (2007) "Bit Hydraulics Optimization with Variable Rheological Properties", AADE National Technical Conference and Exhibition

held at the Wyndam Greenspoint Hotel, Houston, Texas.

- [۳۳] Mohammadsalehi M. and Malekzadeh N., (2012) “Application of New Hole Cleaning Optimization Method within All Ranges of Hole Inclinations”, IPTC 14154, International Petroleum Technology Conference held in Bangkok, Thailand.
- [۳۴] Zhi-chuan G., Ming L., wang L., qiang X., (2015) “Hole Cleaning Optimization of Horizontal Wells with the Multi-Dimensional Ant Colony Algorithm”, *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, Vol 28, pp. 347-355.
- [۳۵] Guo B., Liu G., (2011) “Applied Drilling Circulation Systems: Hydraulics, Calculations and Models”, Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier.
- [۳۶] Speer J.W., (1958) “A method for determining optimum drilling techniques”, *Drill. Prod. Prac. API*, 130– 147.
- [۳۷] Bourgoyne J r., A.T., Millheim, K.K., Chenevert, M.E., Young Jr., F.S., (1986) “Applied Drilling Engineering”, SPE Textbook Series, Dallas.
- [۳۸] Azar, JJ. And G. Robello Samuel, (2007) “Drilling Engineering”, Penn Well Corporation.
- [۳۹] Sutko A.A., Myers G.M., (1970) “The Effect of Nozzle Size, Number, and Extension on the Pressure Distribution Under a Tricone Bit”, *Journal of Petroleum Thechnology*, Vol 23, No. 11, pp. 39-47.
- [۴۰] Zhai1 Y., Wang Z., Zhang Q. and Gao Q., (2013) “The Study of Deep water Drilling Parameters Optimization”, *Applied Mechanics and Materials* Vols. 275-277, pp 554-557.
- [۴۱] Guo X., Wang Z., Long Z., (2012) “Research Progresses of Hydraulics for Extended Reach Drilling in China; Part III: Hydraulics design method and Risk analysis system”, *Advanced Materials Research* Vols 524-527, pp 1561-1564.
- [۴۲] MI, (2009) “Drilling Fluid Manual”.
- [۴۳] Sharman T., (2015) “Characterization and Performance Study of OBM at Various Oil-Water Ratios”, M.Sc. thesis, University of Stavanger, Norway.
- [۴۴] Fan H.H., Zhou H.B., Peng Q., Zhai Y.H., (2014) “A Generalized Hydraulic Calculation Model For Non-Newtonian Fluid Pipe Flow and Its Application Evaluation”, *Proceedings*. No2. P.39.

- [٤٥] Haobo Z., Fan H., Yinghu Z. and Peng Q., (2014) “A New Utility Calculation Model for Axial Flow of Non -Newtonian Fluid in Concentric Annuli”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 92, No. 5, pp. 945-952.
- [٤٦] Vahid Dokhani V., Ma Y. and Mengjiao Y., (2016) “Determination of Equivalent Circulating Density of Drilling Fluids in Deepwater Drilling”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, No.34, pp. 1096 -1105.
- [٤٧] Lidenger, C., (2014) “Joides Resolution Drill Ship Drill into Indian Rig Moho Hole Cleaning”, M.Sc. thesis, The University of Texas A&M University, Texas, USA.
- [٤٨] Clark R.K. and Bickham K L., (1994) “A Mechanistic Model for Cuttings Transport”, SPE-28306, 69th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, New Orleans, USA.
- [٤٩] Cayeux E., Mesagen T., Tantripada S., Zidan M., Fjelde K.K., (2014) “Real-Time Evaluation of Hole Cleaning Conditions Using a Transient Cuttings Transport Model”, Journal paper *SPE*, 163492 published in *SPE Drilling & Completion*, vol.29, No. 1, pp. 5-21.
- [٥٠] Sample K.J., Bourgoyne A.T., (1978) “Development of Improved Laboratory and Field Procedures for Determining the Carrying Capacity of Drilling Fluids”, SPE-7497-MS, 53rd Annual Technical conference and Exhibition of Society of Petroleum Engineers of AIME held in Houston, Texas, USA.
- [٥١] Desmond N. and Rahman S.S., (1998) “A Three-Layer Hydraulic Program for Effective Cuttings Transport and HoleCleaning in Highly Deviated and Horizontal Wells”, *SPE Drilling & Completion*, Vol.13, N. 03, pp 182-189.
- [٥٢] Yilmaz, D., (2012) “Discrete Phase Simulation of Drilled Cuttings transport Process in Highly Deviated Wells”, M.Sc. thesis, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana, USA.
- [٥٣] Tomren P.H, Iyoho A.W., Azar J.J., (1986) “Experimental Study of Cuttings Transport in Deviated Wells”, *SPE Drilling Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 58-6.
- [٥٤] Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J., (1997) “Development of a New Cutting Transport Model for High-Angle Wellbores Including Horizontal Wells”, Paper SPE 25872, *SPE Drilling & Completion Journal*, vol. 12, No. 2, pp 129-136.
- [٥٥] Ramadana A., Skalle P. and Saasen A., (2004) “Application of a Three-Layer

- Modeling Approach for Solids Transport in Horizontal and Inclined Channels ”, *Chemical Engineering Science*, Vol.60, pp 2557 – 2570.
- [٥٦] Ford J.T., Peden J.M., Oyenevin M.B., Gao E., and Zarrough R., Heriot-Watt U., (1990) “Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes”, SPE-20421-MS, 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers held in New Orleans, Louisiana, USA.
- [٥٧] Peden J.M., Ford J.T., Oyenevin M.B., (1990) “Comprehensive Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Wells Including the Effects of Rotation and eccentricity”, SPE20925, presented at Europec, The Hague, Netherlands.
- [٥٨] Luo, Y., Bern, P.A., Chambers, B.D., and Kellingray, D.S., (1994) “Simple Charts To Determine Hole Cleaning Requirements in Deviated Wells”, IADC/SPE 27486, SPE/IADC Drilling Conference, Dallas, USA.
- [٥٩] Bui B. and Tutuncu A., (2016) “A Generalized Rheological Model for Drilling Fluids With Cubic Splines”, SPE 169527. *SPE Drilling & Completion*, Vol 31, N.01, pp 26-39.
- [٦٠] Ranjbar R., (2010) “Cuttings Transport in inclined and horizontal wellbore”, M.Sc. thesis, University of Stavanger, Norway.

Abstract

Nowadays, for reaching the new oil and gas reservoirs underneath the earth and oceans, drilling of directional, horizontal, ERW and multilateral wells are common. With the increment of well's depth and inclination, hole cleaning becomes severe and the safe mud window becomes narrower. These difficulties cause various problems such as pipe sticking, hole pack off, fluid loss and etc. which will cause well loss or a waste of money if we do not manage and control it properly. Drilling hydraulics optimization is the best tool for preventing and controlling this kind of problems. Due to what have been mentioned regarding hole cleaning and ECD in modern drilling, the necessity of drilling hydraulics optimization and the ECD is an obvious fact.

In this method of optimization, we are looking for the specific flow rate and nozzle size (with the consideration of practical limitations) in which the hole cleaning and well stability (ECD and staying in the safe mud window) is been guaranteed. For this process of optimization, it is necessary to calculate the precise pressure drop and hole cleaning condition in which the rheological model used is playing a prominent role.

In this thesis, firstly, in order to find the best rheological model for predicting rheological properties and pressure drop of the fluid, seven common rheological model in drilling industry such as Bingham-Plastic, Power-law, API, Herschel-Bulkley, Casson, Robertson-Stiff, and Sisko had been investigated. The results show that the Casson model is the best one for pressure drop calculations. For the investigation of hole cleaning, by combining three analytic-experimental models of the Dispersed model, Modified Larsen and Rubidiani a comprehensive approach for predicting the minimum required flow rate for carrying the cuttings had been recommended in which the results show the excellency of the precision of this model in comparison with other analytical-experimental models. After that, for optimizing the drilling hydraulics, with considering proper hole cleaning and ECD, the annular hydraulics window and bit hydraulics optimization windows had been employed. Finally, the recommended approach for optimization had been used for drilling hydraulics optimization in the wells of an offshore jacket located in the Southern-Pars field.

Key words: Drilling hydraulic optimization, Hole cleaning, Equivalent Circulation Density (ECD), Pressure drop, Rheology, Cuttings, Drilling mud



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering-Drilling

Title of thesis:

**A New Approach for Drilling Hydraulic
Optimization, Considering ECD
and Hole Cleaning**

By: Masoud Noei

Supervisor:

Dr. Mehrdad Soleimani Monfared

Dr. Mohammad Fazaelizadeh

May 2017