

ارائه یک رابطه تجربی بین رئولوژی سیال حفاری و نرخ حفاری (ROP) در میدان نفتی کبود

سید محسن پیغمبرزاده^۱، حمید کاظمی اسفه^۲، ایوب امرائی^۳

^۱ هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی

^۲ هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی

^۳ کارشناسی ارشد مهندسی نفت گرایش بهره‌برداری دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر

چکیده

هدف این تحقیق، ارائه یک رابطه تجربی بین رئولوژی سیال حفاری و نرخ حفاری (ROP) در میدان نفتی کبود بود. برای این منظور تأثیر خواص رئولوژی سیال حفاری همچون گرانیروی پلاستیک، وزن سیال و نقطه واروی سیال حفاری مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های مربوط به متغیرهای رئولوژی سیال حفاری و نرخ حفاری چاه‌های KD008 و KD009 واقع در میدان نفت کبود از آزمایشگاه شرکت پداکس اخذ گردید و در تجزیه و تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. برای بررسی ارتباط بین متغیرهای رئولوژی سیال حفاری و نرخ حفاری از رگرسیون خطی بهره‌گیری شد. نتایج حاکی از ارتباط منفی و معنی‌دار متغیرهای وزن سیال (ضریب $-0/233$ - با سطح احتمال $0/0000$)، گرانیروی پلاستیک سیال (ضریب $-0/39$ - با سطح احتمال $0/0000$) و رابطه مثبت و معنی‌دار نقطه واروی سیال حفاری (ضریب $0/37$ - با سطح احتمال $0/0000$) با نرخ حفاری در چاه‌های میدان نفت کبود بود. گرانیروی بالای سیال حفاری به دلیل وارد شدن حجم بالای جامدات ناشی از حفاری سرمته منجر به کاهش تمیزکاری چاه و در نتیجه نرخ حفاری پایین‌تر می‌گردد. همچنین افزایش نقطه واروی نیز از طریق کاهش میزان از دست دادن خاصیت سیال حفاری منجر به افزایش نرخ حفاری می‌گردد. وزن سیال حفاری نیز سبب افزایش فشار هیدرولیک ستون سیال و فشار سیال سازند (فشار فراتعادلی) شده و نرخ حفاری را کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: رئولوژی، سیال حفاری، میدانی نفتی کبود، نرخ حفاری.

مقدمه

افزایش تولید نفت از مخازن در چند دهه گذشته و افزایش شدیدی محدودیت دسترسی آسان به نفت خام باعث شده است که اکتشاف و تولید از مخازن نفت سنگین و تولید مجدد از مخازنی که فشار آن‌ها نسبت به گذشته افت کرده است مورد توجه قرار گیرد، همچنین قوانین سخت‌گیرانه و تقاضای روزافزون برای بازیابی و بازدهی مخازن منجر به پیشرفت روزافزون تکنولوژی در این زمینه شده است. از جمله راه‌های مهم برای کاهش هزینه‌ها پیشرفت تکنولوژی حفاری است که این پیشرفت بدون تحقیق در زمینه بهبود سیال حفاری مورد استفاده در چاه‌های نفت امکان‌پذیر نمی‌باشد.

سیال حفاری به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزاء بخش حفاری بخش قابل توجهی از هزینه‌های حفاری را شامل می‌شود؛ لذا جهت کاهش بار هزینه حفاری باید سیال حفاری به کار گرفته شود که بیشترین کارایی را بر روی نرخ حفاری داشته باشد. یک سیال حفاری مطلوب مستلزم قدرت گرانیروی پلاستیک، وزن و دیگر خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری می‌باشد تا با بهبود انتقال کنده‌های حفاری به سطح زمین، روان کردن مته و لوله‌های حفاری، کنترل فشارهای زیرزمینی، انتقال توان هیدرولیکی پمپ‌های گل به مته و به حرکت درآوردن تیغه‌های متحرک مته نرخ حفاری را بهبود بخشد. هدف از این تحقیق، مدل‌سازی نرخ حفاری بر اساس ویژگی‌های رئولوژی سیال حفاری به وسیله رگرسیون می‌باشد. در این تحقیق داده‌های مربوط به متغیرهای رئولوژی سیال حفاری مانند گرانیروی پلاستیک، نقطه واروی و وزن سیال از آزمایشگاه شرکت پدکس جمع آوری می‌گردد. داده‌های مذکور مربوط به چاه‌های شماره ۸ و ۹ میدان کبود در شهرستان آبدانان استفاده خواهد شد. لازم به ذکر است که نوع سازند میدان نفتی کبود پابده و آسماری می‌باشد. پس از وارد کردن دیتا به محیط نرم افزار SPSS 22 با استفاده از رگرسیون اقدام به برآورد نرخ حفاری بر اساس متغیرهای اندازه گیری شده خواهد شد. پس از انجام رگرسیون مدل ریاضی استخراج شده جهت تعیین اهمیت و میزان تأثیر متغیرهای مستقل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مبانی نظری

نرخ نفوذ (ROP): نرخ نفوذ عبارت از متراف حفر شده در واحد زمان (متر بر ساعت) می‌باشد. وزن مخصوص سیال حفاری (MV): برای محاسبه وزن مخصوص سیال، از دستگاه ترازو (Mud Balance) استفاده می‌شود. خواص رئولوژی سیال حفاری مانند گرانیروی پلاستیک (PV)، نقطه واروی (YP) با استفاده از دستگاه VG Meter اندازه گیری خواهد شد.

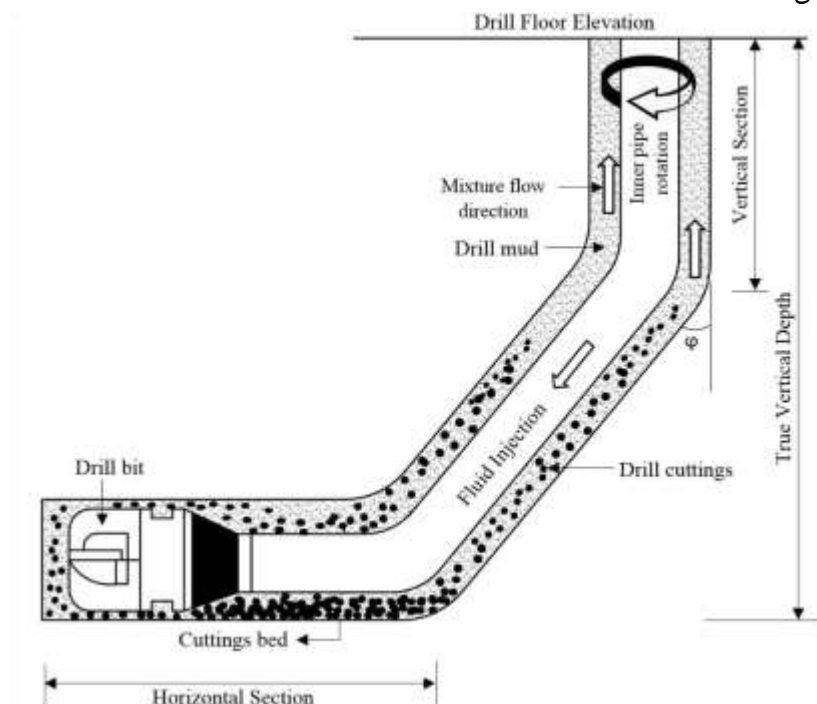
اندازه گیری گرانیروی پلاستیک سیال (PV)^۱: گرانیروی پلاستیک سیال یا همان مقاومت سیال در برابر جاری شدن برابر است با مدت زمان عبور کامل حجم ثابت سیال از یک ارفیس (قیف مارش).

اندازه گیری نقطه واروی سیال (YP)^۱: نقطه واروی توانایی تحمل حمل کنده‌ها در حالت دینامیک را نشان می‌دهد. یکی از مشخصات گل می‌باشد که توسط دستگاه گرانیروی سنج دوار قابل اندازه گیری و محاسبه می‌باشد. واحد اندازه گیری نقطه واروی پوند بر صد فوت مربع ($\text{lbs}/100 \text{ ft}$) می‌باشد. بالا بودن نقطه واروی نشانه نیروی جاذبه بالا و ازدیاد ویسکوزیته می‌باشد.

سیال حفاری

سیال حفاری وظایف بسیار مهمی را بر عهده دارد. از جمله این وظایف میتوان به کنترل فشار، تثبیت دیواره چاه، روانکاری، فراهم سازی توان هیدرولیکی برای پاکسازی مته از کنده های حفاری و انتقال کنده‌های حفاری به سطح اشاره نمود. یکی از مهم‌ترین وظایف سیال حفاری از میان موارد ذکر شده، تمیزکاری چاه از کنده‌های حفاری میباشد. سیال حفاری از طریق لوله حفاری و نازل‌های مته به درون چاه پمپ میشود. سپس کنده های حفاری از طریق فضای حلقوی بین لوله حفاری و دیواره چاه

به سطح زمین انتقال داده میشوند (روکی^۱ و همکاران، ۲۰۱۴؛ ۲۰۱۵). در شکل ۱ مسیر حرکت سیال حفاری و انتقال کنده ها به بیرون از چاه نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای شماتیک مسیر حرکت سیال حفاری و انتقال کنده ها به بیرون از چاه حفاری (اپیل و جیروچیورجیس^۲، ۲۰۱۷)

وظایف گل حفاری

از وظایف گل حفاری انتقال خرده های حفاری از ته چاه به سطح زمین بود و با توسعه سامانه حفاری دورانی، وظایف گل سنگین تر گردید. اجرای وظایف گل محوله به گل و سیال حفاری در عملیات حفر چاه آن قدر مهم و اساسی است که نمیتوان آن ها را نادیده گرفت، به همین جهت باید در انتخاب، نگهداری و بهکارگیری سیال حفاری دقت لازم را انجام داد. وظایف مهم یک گل حفاری مطلوب و کارساز عبارتند از:

- (۱) تمیز کردن چاه و انتقال خرده های حفاری به سطح زمین.
- (۲) خنک کردن مته و لوله حفاری.
- (۳) روان کردن مته و لوله های حفاری.
- (۴) اندود کردن دیواره چاه و جلوگیری از ریزش چاه.
- (۵) کنترل فشارهای زیرزمینی.
- (۶) معلق نگه داشتن خرده های حفاری و مواد وزن افزا به هنگام قطع جریان گل حفاری.
- (۷) ترخیص شن و خرده های حفاری بر روی الک های لرزان و سایر تجهیزات جداکننده.
- (۸) تحمل قسمتی از وزن لوله های حفاری و لوله های جداری.
- (۹) به حداقل رساندن صدمات و آسیبها به سازندهای مجاور چاه.
- (۱۰) انتقال توان هیدرولیکی پمپهای گل به مته و به حرکت درآوردن تیغه های متحرک مته.
- (۱۱) ارائه اطلاعات به زمین شناس.

¹ Rooki.

² Epelle & Gerogiorgis.

(۱۲) کشف نفت، گاز یا آب داخل طبقات

تمیز کردن ته چاه از خرده‌های حفاری هنوز هم یکی از مهم‌ترین وظایف گل حفاری به شمار می‌آید. گل حفاری زمانی که در فضای حلقوی بالا می‌رود، خرده‌های حفاری را با خود حمل کرده و آن‌ها را از ته چاه به سطح زمین می‌رساند. بازدهی گل حفاری در انتقال کنده‌ها و خرده‌های حفاری به عوامل زیر بستگی دارد: سرعت انتقال در فضای حلقوی، گرانشی، وزن مخصوص، استحکام اولیه گل^۳، نقطه تسلیم، دوران لوله‌ها. گل حفاری تا حد زیادی باعث روان شدن مته و لوله‌های حفاری در چاه نیز می‌شود. رسی که در بیشتر گلهای حفاری پایه آبی مصرف می‌شود، علاوه بر سایر وظایف خود، به عنوان یک روانکننده نیز عمل می‌کند. یک گل حفاری خوب باید بتواند دیواره چاه را حتی اگر سست و نامنسجم باشد به وسیله یک لایه نازک و غیر قابل نفوذ طوری اندود کند که هم جلوی هرز رفتن گل به داخل سازند را بگیرد و هم به پایداری و تحکیم سنگهای سازند دیواره کمک کند و مانع ریزش آن‌ها به داخل چاه گردد. موادی که ذرات اندود گل را تشکیل می‌دهند، بیشتر بنتونیت یا نشاسته می‌باشند.

انواع سیال حفاری

بطور کلی هر سیال حفاری دارای دو فاز اصلی می‌باشد:

(۱) فاز پیوسته^۴

(۲) فاز ناپیوسته^۵

بخش عمده گل حفاری فاز پیوسته است و بنابراین گل های حفاری را بر مبنای فاز پیوسته آن‌ها به سه گروه زیر تقسیم بندی می نمایند (بنیون^۶، ۱۹۹۹؛ باگسی^۷ و همکاران، ۲۰۰۰).

(۱) گل های پایه آبی^۸

(۲) پل های پایه روغنی^۹

(۳) گل های پایه گازی

فاز پیوسته این نوع گل، آب است و بقیه مواد جامد یا مایع که برای ایجاد خاصیتی به گل افزوده می‌شود، فاز ناپیوسته آن را تشکیل می‌دهند. بهترین آب برای استفاده در گل حفاری، آبی است که املاح نمک، کلسیم و منیزیم کمتری داشته باشد، زیرا کنترل اتلاف آب^{۱۰} و ایجاد گرانشی در چنین آبی بهتر صورت می‌گیرد. فاز جامد مورد استفاده در گل حفاری به صورتهای زیر است:

(۱) جامدات فعال^{۱۱}

جامداتی هستند که بر خواص گل حفاری تأثیر می‌گذارند. مانند رسها و بنتونیت، که افزودن آن‌ها به گل حفاری علاوه بر ایجاد گرانشی و بالا بردن ظرفیت حمل خرده‌های توسط گل باعث ایجاد اندودی غیر قابل نفوذ از گل روی دیواره چاه جهت جلوگیری از نفوذ گل به داخل سازند می‌گردد. با مواد جامد نظیر خاک رس میتوان حداکثر به گلی با وزن ۸۶ pcf دست یافت که در این وزن، گرانشی گل بسیار بالاست.

(۲) جامدات غیر فعال^{۱۲}

^۳ Gel Strength.

^۴ Continuous phase.

^۵ Discontinuous phase.

^۶ Bennion.

^۷ Bagci.

^۸ Water based muds.

^۹ Oil based muds.

^{۱۰} Water loss.

^{۱۱} Active solids.

^{۱۲} Inert solids.

این جامدات از نظر شیمیایی خنثی و بی‌اثر هستند و بر اساس نظر کارشناس گل، برای افزایش وزن به آن اضافه میشوند و یا ممکن است در حین حفاری به صورت ناخواسته وارد گل شوند. کانیهای رسی در آب نامحلولند لیکن عواملی مثل هیدراته شدن، نیروهای برشی و غیره سبب پراکندگی آنها در آب میگردد. بنتونیت مهم‌ترین کانی رسی است که در گل حفاری مورد استفاده قرار میگیرد و وظیفه اصلی آن ایجاد گرانروی در گل برای بالا بردن ظرفیت حمل خرده‌های حفاری و نیز ایجاد کیک گل است. بنتونیت وقتی در آب شیرین قرار میگیرد صفحاتش در اثر جذب آب متورم شده و در نتیجه نیروهای بین صفحه‌ای آنها سست شده و کمترین نیروی برشی این صفحات را جدا میکند که به این پدیده پراکندگی میگویند. پراکندگی رسها سبب ویسکوز شدن سیال حفاری میگردد. رسها از نظر تمایل به جذب آب به دو دسته آبدوست و آبگریز تقسیم میشوند. بنتونیت یک کانی رسی آبدوست است. رفتار رئولوژیکی سیالات حفاری به زمان وابسته است، از این جهت به دو دسته سیالات رئوپکتیک و تیکسوتروپیک تقسیم بندی می‌گردد.

پیشینه داخلی

روکی و همکاران (۱۳۹۲) در تحقیقی اقدام به شبیه سازی جریان سیال کف و تخمین افت فشار در فضای حلقوی چاه در شرایط حفاری زیر تعادلی با استفاده از روش عددی حجم محدود نمودند. سیال کف به عنوان سیال غیر نیوتنی قانون توان و هرشل بالکلی در نظر گرفته شده است و نتایج افت فشار با هم مقایسه می‌شوند. همچنین تاثیر پارامترهای مختلف عملیاتی از قبیل رئولوژی سیال کف، سرعت سیال کف، کیفیت کف، چرخش لوله حفاری و عدم هم مرکزی لوله و چاه، بر افت فشار بررسی می‌شوند. نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی مطالعات قبلی مقایسه شده است. متوسط خطای نسبی بین نتایج روش عددی با نتایج آزمایشگاهی برای تخمین افت فشار، کمتر از ۵٪ می‌باشد. نتایج روش عددی با در نظر گرفتن مدل رئولوژیکی هرشل بالکلی برای کف، به نتایج آزمایشگاهی نزدیک تر است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت و کیفیت سیال کف، افت فشار افزایش و با افزایش عدم هم مرکزی افت فشار کاهش می‌یابد، ولی چرخش لوله تاثیر چشم گیری در افت فشار ندارد.

پیراسته نیا و طالبی (۱۳۹۵) در تحقیقی به بررسی تأثیر متغیرهای رئولوژی و نرخ جریان سیال حفاری بر افت فشار در سیستم گردش سیال حفاری پرداختند. نتایج نشان داد که در حالتی که گرانروی پلاستیک ۴ برابر با ۱۵، نقطه واروی ۵ برابر ۲۱ و وزن سیال حفاری ۶ برابر ۲/۱۰ پوند بر گالن است افت فشار در متغیرهای رئولوژی پیشینه است. همچنین با افزایش جریان خروجی پمپ ها از ۸۵۰ به ۱۲۰۰ گالن در دقیقه افت فشار در سیستم سیال حفاری روند افزایشی دارد.

رستمی و همکاران (۱۳۹۶) در تحقیقی به بررسی و بهبود خواص رئولوژی سیال حفاری پایه آبی به وسیله خرده شیشه یا Glass bead پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که مخلوط حاصل از Glass bead بیوپلیمر و سورفکتانت، از نظر خواص رئولوژیکی و خواص کنترل کننده هرزروی و صافاب نسبت به سیالی که فقط بر پایه پلیمر یا فقط سورفکتانت است عملکرد بهتری دارد.

پیشینه خارجی

پایمن^{۱۳} و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی به بررسی خواص سیال حفاری بر نرخ نفوذ پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که خواص سیال حفاری به وزن گل، گرانروی سیال و محتویات جامد سیال بستگی دارد. همچنین با توجه به نتایج این تحقیق سرعت نفوذ با افزایش ویسکوزیته، محتوای جامد و وزن کاهش کی یابد. میزان نفوذ با افزایش عمق رابطه معکوس دارد زیرا با افزایش عمق مقاومت سنگ افزایش و تخلخل کاهش می‌یابد.

¹³ Paiaman.

سوخوبوکا^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی به بررسی مایع حفاری تحت فشار بالا در شرایط دمای بالا و تأثیر آن بر میزان نفوذ و نرخ حفاری پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که درجه حرارت تأثیر قابل توجهی در ویسکوزیته سیال حفاری نسبت به فشار دارد.

روش جمع آوری اطلاعات

این پژوهش در دو مرحله به صورت کتابخانه‌ای و میدانی صورت گرفت. روش انجام این پژوهش کتابخانه‌ای-میدانی بود. در بخش اول ابتدا با مراجعه به کتابخانه و مطالعه منابع معتبر و دست اول و کتاب‌ها و مقالات و پایان نامه‌های مرتبط اقدام به جمع آوری و استخراج مفاهیم و الگوی نظری و پیشینه پژوهش شد. در بخش دوم بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و مقالات مرتبط با موضوع تحقیق اقدام به اندازه‌گیری متغیرهای تحقیق شد و سپس با استفاده از رگرسیون خطی اقدام به برآورد روابط بین متغیرها بر اساس فرضیات تحقیق شد.

جامعه آماری پژوهش

جامعه آماری میدان نفتی کبود می‌باشد.

متغیرهای تحقیق

متغیرهای تحقیق شامل مولفه‌های مربوط به رئولوژی سیال حفاری موثر بر سرعت حفاری مانند گرانیروی پلاستیک، نقطه واروی و وزن سیال، متغیرهای مستقل و نرخ نفوذ متغیر وابسته می‌باشد. اندازه‌گیری متغیرهای تحقیق به شرح ذیل می‌باشد. نرخ نفوذ (ROP): نرخ نفوذ عبارت از متراف حفر شده در واحد زمان (متر بر ساعت) می‌باشد. وزن مخصوص سیال حفاری (MV): برای محاسبه وزن مخصوص سیال، از دستگاه ترازو (Mud Balance) استفاده می‌شود. خواص رئولوژی سیال حفاری مانند گرانیروی پلاستیک (PV)، نقطه واروی (YP) با استفاده از دستگاه VG Meter اندازه‌گیری خواهد شد.

اندازه‌گیری گرانیروی پلاستیک سیال (PV):^۱ گرانیروی پلاستیک سیال یا همان مقاومت سیال در برابر جاری شدن برابر است با مدت زمان عبور کامل حجم ثابت سیال از یک ارفیس (قیف مارش).

اندازه‌گیری نقطه واروی سیال (YP):^۱ نقطه واروی توانایی تحمل حمل‌کننده‌ها در حالت دینامیک را نشان می‌دهد. یکی از مشخصات گل می‌باشد که توسط دستگاه گرانیروی سنج دوار قابل اندازه‌گیری و محاسبه می‌باشد. واحد اندازه‌گیری نقطه واروی پوند بر صد فوت مربع (Lbs/100Ft)^۲ می‌باشد. بالا بودن نقطه واروی نشانه نیروی جاذبه بالا و ازدیاد ویسکوزیته می‌باشد.

ویسکومتر دستگاهی ای برای سنجش میزان ویسکوزیته (گرانیروی) مایعات است. برای موادی که ویسکوزیته آن‌ها با جریان یافتن تغییر می‌کند از ویسکومتر ویژه ای به نام رئومتر استفاده می‌گردد. در حالت کلی در یک ویسکومتر دو حالت وجود دارد:

۱- یا مایع ویسکوز ساکن است و یک شی جانبی در داخل آن (ابزار اندازه‌گیری ویسکوزیته) حرکت می‌کند.

۲- یا وسیله اندازه‌گیری ویسکوزیته ساکن بوده و سیال ویسکوز حرکت می‌کند.

در هر دو صورت، نیروی کششی که سبب ایجاد حرکت نسبی سیال نسبت به سطح می‌شود می‌تواند به عنوان عاملی برای اندازه‌گیری گرانیروی به کار گرفته شود. حالت جریان باید به گونه ای باشد که عدد رینولدز (نسبت نیروی لختی به نیروی گرانیروی) به حدی کوچک باشد که بتوان جریان را آرام فرض نمود. ویسکومترهای چرخشی یا دورانی^{۱۵}:

¹⁴ Sukhoboka

¹⁵ Rotation viscometers.

اینگونه ویسکومتر ها که از استوانه های هم محور ساخته شده اند، بر اساس اندازه گیری مقدار گشتاور لازم جهت به چرخش در آوردن یک جسم خارجی در داخل سیال استوار هستند که می تواند راهی برای اندازه گیری گرانروی سیال باشد. در این ویسکومترها یک استوانه مانند سیلندر (Bob) درون استوانه دیگری (Cup) قرار گرفته، سیال در حجم محصور بین این دو استوانه ریخته می شود و یکی از استوانه ها را با سرعت زاویه ای (Ω) معینی چرخانده، گشتاور (T) را بر روی استوانه چرخان یا استوانه ثابت اندازه می گیریم. بنابراین رابطه گشتاور و سرعت زاویه ای به دست می آید. اما از طرفی تنش وارده از طرف سیال بر روی دیواره استوانه ها، با گشتاور رابطه مستقیم داشته و سرعت برش نیز با سرعت درون استوانه متناسب است. در نهایت از روی این روابط، ارتباط تنش و سرعت برش به دست می آید و با توجه به رابطه زیر، گرانروی در سرعت برش های مختلف به دست می آید:

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma}$$

روش های آماری تجزیه و تحلیل داده ها

برای این منظور ابتدا داده های مربوط به متغیرهای تحقیق از آزمایشگاه شرکت پدکس اخذ گردید و سپس این دیتا برای مدل سازی به عنوان داده های ورودی به نرم افزار استفاده شد. سپس جهت تجزیه و تحلیل داده ها، با استفاده از روش رگرسیون خطی اقدام به بررسی روابط بین متغیرهای رئولوژی سیال با نرخ حفاری شد. لازم به ذکر است که کلیه تجزیه و تحلیل ها به وسیله نرم افزار SPSS 22 صورت گرفت.

بررسی فرضیات تحقیق

برای بررسی تأثیر رئولوژی سیال حفاری ابتدا یک فرضیه اصلی به صورت ذیل تعریف شد:

«رئولوژی سیال حفاری یکی از پارامترهایی است که می تواند سبب بهبود نرخ حفاری (ROP) در چاه های حفاری میدان نفتی کبود شود».

سپس برای بررسی این فرضیه سه سوال مطرح شد که با استفاده از آزمون رگرسیون اقدام به پاسخگویی به سوالات تحقیق شد.

تأثیر گرانروی سیال حفاری بر نرخ حفاری

برای بررسی تأثیر گرانروی پلاستیک سیال حفاری بر نرخ حفاری ابتدا فرضیه مذکور به صورت ذیل تعریف شد:

H0: گرانروی پلاستیک سیال حفاری بر نرخ حفاری (ROP) در چاه های حفاری میدان نفتی کبود تأثیر معنی داری ندارد.

H1: گرانروی پلاستیک سیال حفاری بر نرخ حفاری (ROP) در چاه های حفاری میدان نفتی کبود تأثیر معنی داری دارد.

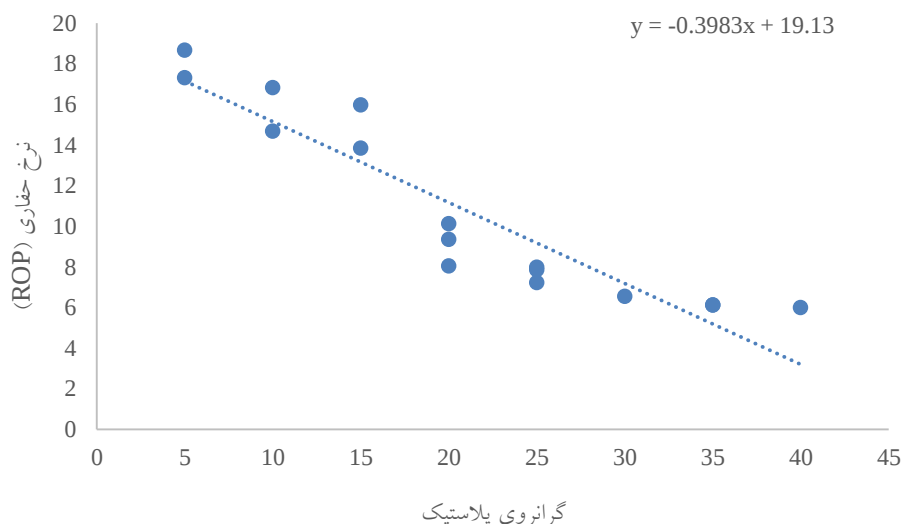
سپس با استفاده از آزمون رگرسیون اقدام به برآورد فرضیه مذکور شد که نتایج آن به شرح جدول ۱ می باشد.

جدول ۱. آزمون رگرسیون تأثیر گرانروی پلاستیک سیال حفاری بر نرخ حفاری

مدل	ضریب B	خطای معیار	آماره t (T-STATIC)	سطح احتمال (P.V)
عرض از مبدأ	۱۹/۱۳	۱/۰۰۹	۱۸/۹۵	۰/۰۰۰۰
گرانروی پلاستیک	-۰/۳۹	۰/۰۴۳	-۹/۲۱	۰/۰۰۰۰
Adjusted R-squared				
F-Statistic				
Prob (F-Statistic)				
				۰/۸۴
				۸۴/۹۴
				۰/۰۰۰۰

با توجه به نتایج جدول (۱) آماره t مربوط به متغیر مستقل گرانروی پلاستیک سیال حفاری ۹/۲۱ و سطح احتمال آن برابر ۰/۰۰۰۰ می باشد و ضریب آن نیز برابر -۰/۳۹ می باشد. با توجه به اینکه سطح خطای در نظر گرفته شده برای این تحقیق برابر ۰/۰۵ بوده است؛ بنابراین متغیر گرانروی پلاستیک سیال حفاری تأثیر معنی داری بر نرخ حفاری در چاه های میدان نفت

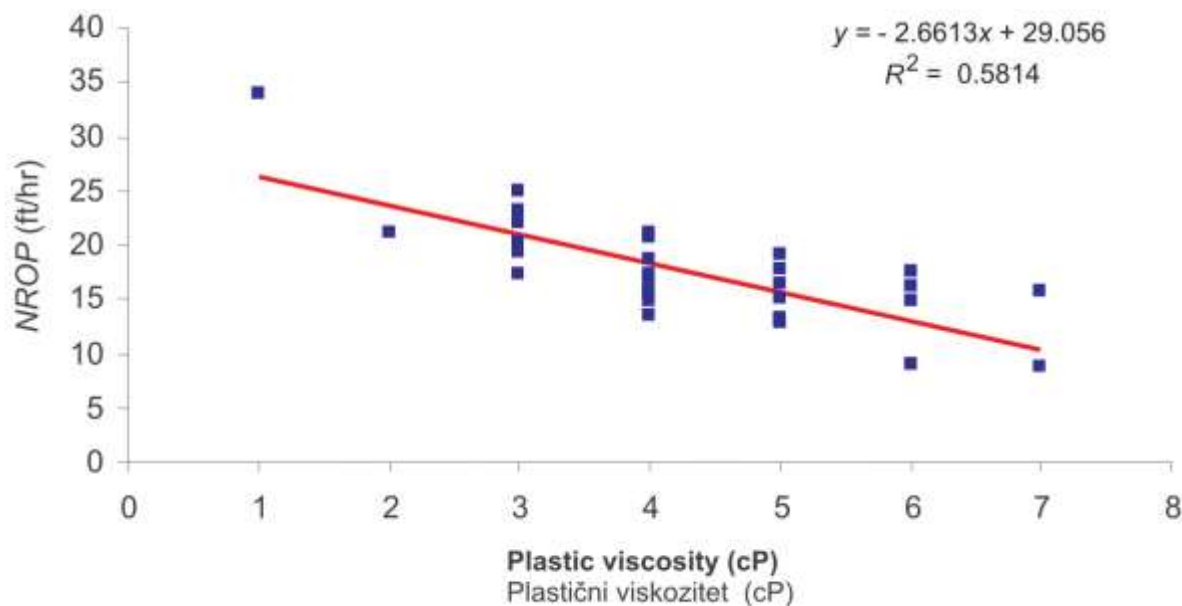
کبود دارد. همچنین از آنجا که علامت ضریب منفی می‌باشد لذا نوع تأثیر گرانروی پلاستیک سیال حفاری بر نرخ حفاری منفی و معکوس می‌باشد، به این صورت که با کاهش گرانروی سیال حفاری نرخ حفاری افزایش می‌یابد (شکل ۲).



شکل ۲. نمودار تغییرات نرخ حفاری بر گرانروی پلاستیک

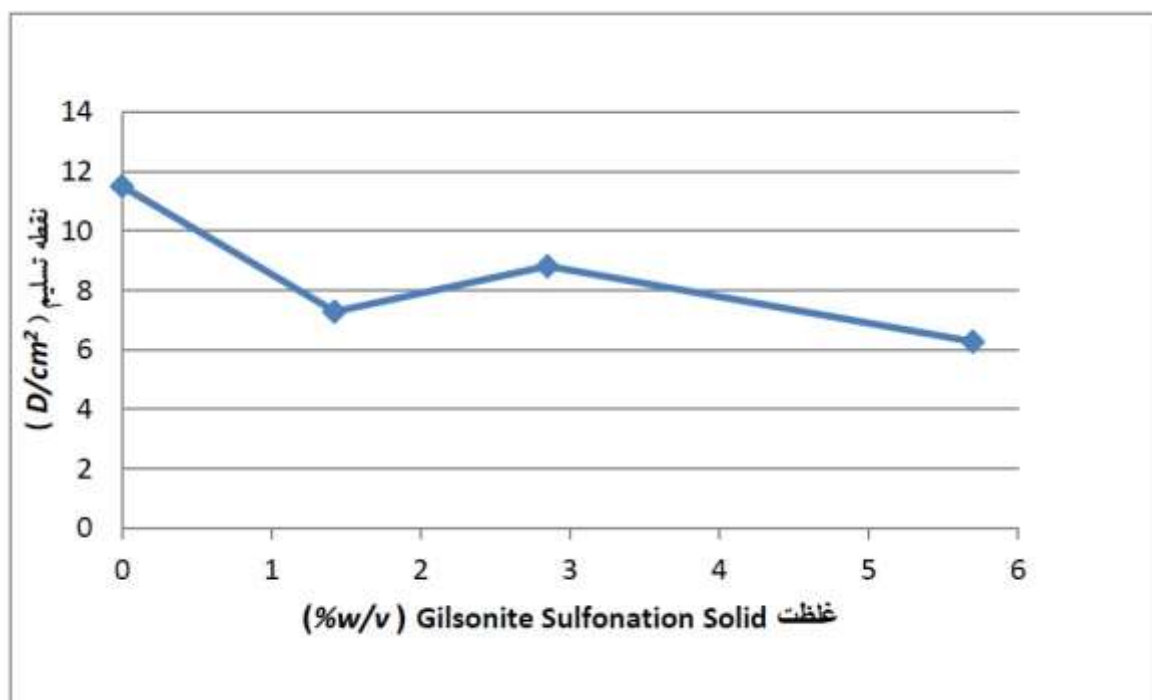
نتایج تحقیق نشان داد که گرانروی پلاستیک سیال حفاری با نرخ حفاری رابطه معکوس دارد. پارامتر گرانروی پلاستیک سیال حفاری مقاومت ایجاد شده ناشی از وجود بارهای مثبت و منفی درون سیال حفاری است که بیشتر در عملیات میدانی و در بررسی آثار افزودنی‌های شیمیایی و اثر خرده‌های وارد شده از سازند به درون سیال حفاری اهمیت می‌یابد. کاهش گرانروی سیال حفاری موجب می‌شود تا از هرزروی گل به درون سازند جلوگیری گردد (واйт^{۱۶} و همکاران، ۲۰۰۳). همسو با یافته‌های این تحقیق پایمن و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که با افزایش ویسکوزیته پلاستیک نرخ نفوذ با شیب معمولی کاهش می‌یابد.

¹⁶ White.



شکل ۳. منبع: پایمن و همکاران (۲۰۰۹)

سلمان زاده و همکاران (۱۳۹۷) در تحلیل سه بعدی جریان سیال حفاری همراه با کنده‌های حفاری درون فضای حلقه ای چاه افقی گزارش کردند که استفاده از آب به عنوان سیال حفاری به دلیل پایین بودن ویسکوزیته منجر به کاهش افت فشار و در نتیجه ایجاد سرعت بالاتر در انتقال کنده‌ها می‌گردد. از سوی دیگر گزارش کردند که ویسکوزیته بالاتر سیال حفاری با ایجاد افت فشار سبب می‌شود انتقال کنده‌ها به سطح به خوبی صورت نگیرد و در نتیجه تمیزکاری چاه به صورت بهینه انجام نگیرد. مهدی نسب و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی استفاده از قیر طبیعی در سیال حفاری گزارش کردند افزودن قیر طبیعی به سیال باعث افزایش گرانروی پلاستیک سیال و کاهش نقطه تسلیم می‌گردد که منجر به افزایش نرخ حفاری می‌گردد.



شکل ۴. منبع: مهدی نسب و همکاران (۱۳۹۵).

عمدتاً ترکیب موادی نظیر شن، شل، لمپستون و دولومیت که از جامدات نامرغوب محسوب می‌گردند از مهم‌ترین عوامل ازدیاد گرانروی پلاستیک سیال حفاری می‌باشد که منجر به ازدیاد اصطکاک بین جامدات می‌گردد (سلطانی و ریاض خراط، ۱۳۷۸) که سبب اختلال در حفاری می‌شود. کم کردن اندازه جامدات گل در یک حجم ثابت، باعث افزایش گرانروی پلاستیکی می‌شود. همچنین افزایش سطح، در اثر آسیاب شدن ذرات جامد زیر مته حفاری نیز گرانروی پلاستیکی را افزایش می‌دهد. روش‌های متعددی جهت کاهش گرانروی پلاستیکی بکار می‌رود که از جمله روش‌های روتین می‌توان رقیق کردن گل حفاری به وسیله آب، استفاده از توریه‌های لرزان، کاربرد سانتریفیوژ یا سیکلون‌های جدا کننده، استفاده از جداکننده‌های شن و ماسه، را نام برد (سلطانی و خراط، ۱۳۷۸).

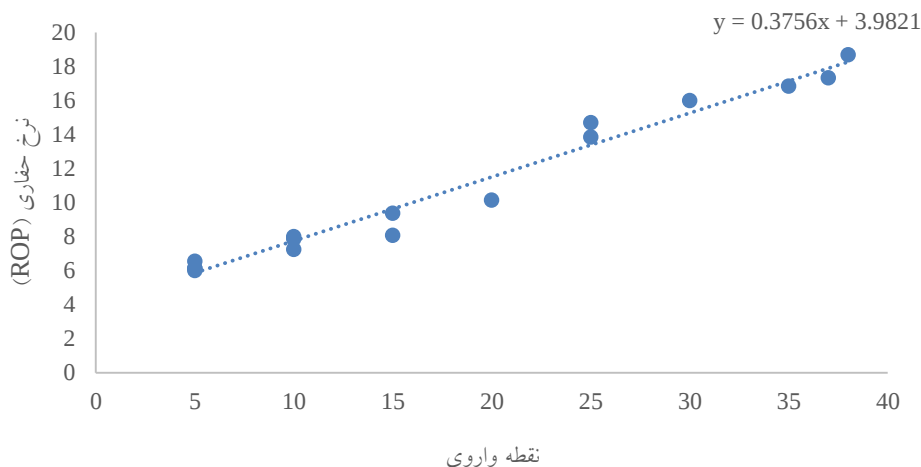
تأثیر نقطه واروی سیال حفاری بر نرخ حفاری

برای بررسی تأثیر نقطه واروی سیال حفاری بر نرخ حفاری ابتدا فرضیه مذکور به صورت ذیل تعریف شد:
H0: نقطه واروی سیال حفاری بر نرخ حفاری (ROP) در چاه‌های حفاری میدان نفتی کبود تأثیر معنی‌داری ندارد.
H1: نقطه واروی سیال حفاری بر نرخ حفاری (ROP) در چاه‌های حفاری میدان نفتی کبود تأثیر معنی‌داری دارد.
سپس با استفاده از آزمون رگرسیون اقدام به برآورد فرضیه مذکور شد که نتایج آن به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲. آزمون رگرسیون تأثیر نقطه واروی سیال حفاری بر نرخ حفاری

مدل	ضریب B	خطای معیار	آماره t (T-STATIC)	سطح احتمال (P.V)
عرض از مبدأ	۳/۹۸	۰/۳۵	۱۱/۱۴	۰/۰۰۰۰
نقطه واروی	۰/۳۷	۰/۰۱۷	۲۲/۶۵	۰/۰۰۰۰
Adjusted R-squared				
F-Statistic				
Prob (F-Statistic)				
				۰/۹۷
				۵۱۳/۳۵
				۰/۰۰۰۰

با توجه به نتایج جدول (۲) آماره t مربوط به متغیر مستقل نقطه واروی سیال حفاری ۲۲/۶۵ و سطح احتمال آن برابر ۰/۰۰۰۰ می‌باشد و ضریب آن نیز برابر ۰/۳۷ می‌باشد. با توجه به اینکه سطح خطای در نظر گرفته شده برای این تحقیق برابر ۰/۰۵ بوده است؛ بنابراین متغیر نقطه واروی سیال حفاری تأثیر معنی‌داری بر نرخ حفاری در چاه‌های میدان نفت کبود دارد. همچنین از آنجا که علامت ضریب مثبت می‌باشد لذا نوع تأثیر نقطه واروی سیال حفاری بر نرخ حفاری مثبت و مستقیم می‌باشد، به این صورت که با افزایش نقطه واروی سیال حفاری نرخ حفاری افزایش می‌یابد (شکل ۵).



شکل ۵. نمودار تغییرات نرخ حفاری بر نقطه واروی

یکی دیگر از اجزاء مقاومت در برابر جریان در گل حفاری، نقطه واروی می‌باشد. در سیالاتی که از نوع پلاستیک می‌باشند یا از قانون بینگهام پلاستیک تبعیت می‌نمایند، برای به حرکت در آوردن سیال، از زمانی که فشاری بر مایع وارد می‌شود تا هنگامی که فشار به نقطه ای برسد که در آن نقطه مایع شروع به حرکت کند، آن نقطه را نقطه واروی می‌گویند. نقطه واروی میزان سنجش نیروی جاذبه یا الکتروشمی بین ذرات است. این نیروها، بارهای منفی و مثبتی است که در سطح ذرات و یا نزدیک یکدیگر قرار دارند. نقطه واروی سنجش یا نشان دهنده این نیروها تحت شرایط جریان است و بستگی به خصوصیات سطح ذرات گل حفاری، غلظت جامدات و محیط الکتریکی (الکترولیت) که این جامدات را احاطه کرده اند یا به عبارت دیگر غلظت و نوع یونهای که در فاز مایع گل هستند دارد. ده ودار و همکاران (۱۳۹۶) گزارش کردند در سازند های نرم نقطه واروی بالا سبب می‌گردد تمیزکاری چاه بهتر صورت گرفته و در نتیجه نرخ حفاری افزایش یابد.

نتایج این تحقیق نشان داد که ارتباط نقطه واروی سیال حفاری با نرخ حفاری نیز مثبت و مستقیم می‌باشد.

عموماً افزایش نقطه واروی به دلیل افزایش گرانی سیال حفاری بر اثر موارد ذیل می‌گردد.

وارد شدن آلودگی های حلال نظیر نمک، انیدریدها یا سنگ گچ که بارهای منفی ذرات خاک را خنثی کرده آنها را به صورت کلوخه درآورده و در نتیجه باعث ازدیاد نقطه واروی می‌گردد.

شکستگی ذرات خاک به وسیله عمل آسیابی مته و لوله های حفاری، ایجاد نیروی رسوبی در روی لبه های شکسته ذرات می کند (شکستگی اتصالات)، این نیروها تمایل دارند که ذرات را به طرف خود جذب نمایند که باعث کلوخه شدن گل و در نتیجه ازدیاد نقطه واروی می گردند.

وارد شدن جامدات بی اثر در سیستم که باعث ازدیاد نقطه واروی می‌شود. نتیجه وارد شدن این جامدات، حرکت ذرات بطرف یکدیگر است. چون در حقیقت فاصله بین ذرات کاهش نمی یابد بلکه جذب نیرو بین ذرات افزایش می یابد.

حفاری ایندیریدها، شل یا گل رس که باعث وارد شدن جامدات فعال تازه ای به داخل سیستم می گردند. که نیروهای جاذبه بین ذرات را زیاد نموده و ذرات را به همدیگر نزدیک می نماید که نتیجه اش ازدیاد بارهای الکتریکی است.

افزودن مواد شیمیایی بیشتر از حد معمول یا ناکافی نیز باعث ازدیاد نیروهای جاذبه و در نتیجه ازدیاد نقطه واروی می‌گردد.

تأثیر وزن سیال حفاری بر نرخ حفاری

برای بررسی تأثیر وزن سیال حفاری بر نرخ حفاری ابتدا فرضیه مذکور به صورت ذیل تعریف شد:

H0: وزن سیال حفاری بر نرخ حفاری (ROP) در چاه های حفاری میدان نفتی کبود تأثیر معنی داری ندارد.

H1: وزن سیال حفاری بر نرخ حفاری (ROP) در چاه های حفاری میدان نفتی کبود تأثیر معنی داری دارد.

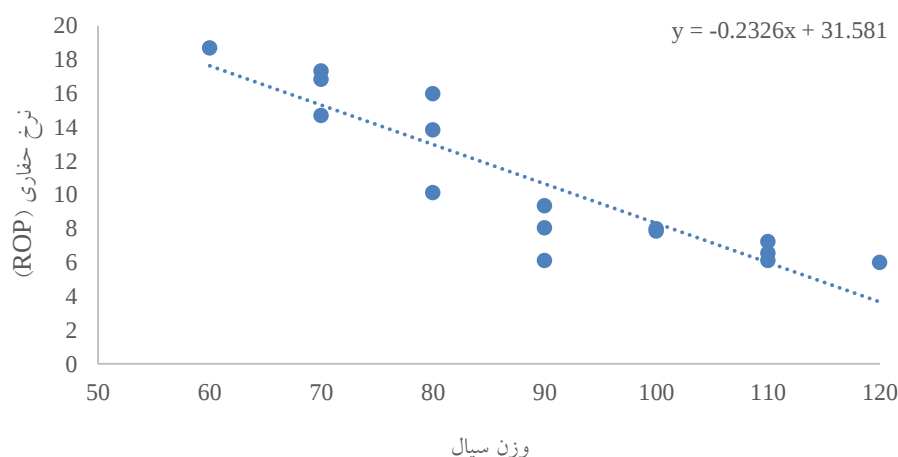
سپس با استفاده از آزمون رگرسیون اقدام به برآورد فرضیه مذکور شد که نتایج آن به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳. آزمون رگرسیون تأثیر وزن سیال حفاری بر نرخ حفاری

مدل	ضریب B	خطای معیار	آماره t (T-STATIC)	سطح احتمال (P.V)
عرض از مبدأ	۳۱/۵۸	۲/۸۰	۱۱/۲۸	۰/۰۰۰۰
وزن سیال	-۰/۲۳۳	۰/۰۳۱	-۷/۵۶۲	۰/۰۰۰۰
Adjusted R-squared				
F-Statistic				
Prob (F-Statistic)				
				۰/۷۸
				۵۷/۱۸۲
				۰/۰۰۰۰

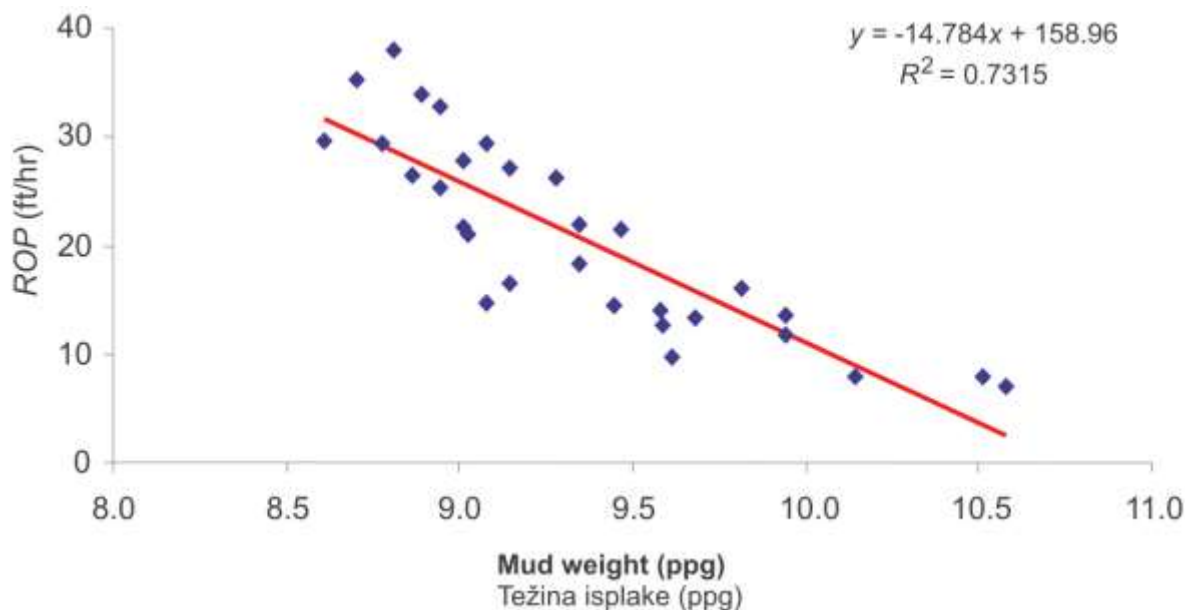
با توجه به نتایج جدول (۳) آماره t مربوط به متغیر مستقل وزن سیال حفاری ۷/۵۶- و سطح احتمال آن برابر ۰/۰۰۰۰ می‌باشد و ضریب آن نیز برابر ۰/۲۳۳- می‌باشد. با توجه به اینکه سطح خطای در نظر گرفته شده برای این تحقیق برابر ۰/۰۵ بوده است؛ بنابراین متغیر وزن سیال حفاری تأثیر معنی داری بر نرخ حفاری در چاه های میدان نفت کبود دارد. همچنین از انجا

که علامت ضریب منفی می باشد لذا نوع تأثیر وزن سیال حفاری بر نرخ حفاری منفی و معکوس می باشد، به این صورت که با کاهش وزن سیال حفاری نرخ حفاری افزایش می یابد (شکل ۶).



شکل ۶. نمودار تغییرات نرخ حفاری بر وزن سیال حفاری

یافته های تحقیق نشان داد که وزن سیال حفاری با نرخ حفاری رابطه منفی و معکوس دارد که این رابطه از نظر آماری معنی دار می باشد. در عملیات حفاری می بایست از سیال با وزن پایین استفاده شود تا بتوان تعادل فشاری را در نواحی کم فشار و تخلیه شده برقرار کرد. همراستا با یافته های این تحقیق پایمن^{۱۷} و همکاران (۲۰۰۹) نیز در بررسی ویژگی های سیال حفاری گزارش کردند که با افزایش وزن سیال حفاری نرخ حفاری کاهش می یابد.



شکل ۷. منبع: پایمن و همکاران (۲۰۰۹).

محققین گزارش کردند که با افزایش وزن گل حفاری، اختلاف فشار هیدرولیک ستون سیال و فشار سیال سازند (فشار فراتعادلی) بیشتر می شود این افزایش فشار باعث کوچکتر شدن حفره ایجاد شده توسط دندان مته کاج غلطان در سنگ شده و در نتیجه باعث کاهش سرعت حفاری خواهد شد (کانینگهام و اینیک^{۱۸}، ۱۹۵۹).

¹⁷ Paiaman.

¹⁸ Cunningham & Eenink.

نتیجه گیری

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر رئولوژی سیال حفاری بر بهبود نرخ حفاری (ROP) در چاه‌های حفاری میدان نفتی کبود انجام شد. برای این منظور تأثیر گرانیوی پلاستیک، نقطه واروی و وزن سیال حفاری بر نرخ حفاری مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیق با استفاده از داده‌های چاه‌های KD008 و KD009 واقع در میدان نفت کبود صورت پذیرفت. اطلاعات مربوط به متغیرهای تحقیق از آزمایشگاه شرکت پدکس اخذ گردید و در تجربه و تحلیل استفاده شد. برای پاسخ به سوالات تحقیق از آزمون رگرسیون خطی بهره‌گیری شد. نتایج و دستاوردهای حاصل از فراورد فرضیات تحقیق به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- متغیر وزن سیال بر نرخ حفاری چاه‌های نفتی میدان کبود تأثیر منفی و معنی‌داری دارد.
- ۲- متغیر گرانیوی سیال حفاری بر نرخ حفاری چاه‌های نفتی میدان کبود تأثیر منفی و معنی‌داری دارد.
- ۳- متغیر وزن نقطه واروی سیال حفاری بر نرخ حفاری چاه‌های نفتی میدان کبود تأثیر مثبت و معنی‌داری دارد.

پیشنهادهای تحقیق

پیشنهادهای کاربردی

- ۱) استفاده از موادی که گرانیوی سیال حفاری را کاهش می‌دهند منجر به بهبود نرخ حفاری می‌گردد.
- ۲) موادی که سبب افزایش میزان گرانیوی سیال حفاری می‌گردند منجر به افزایش نقطه واروی سیال حفاری و در نتیجه کاهش نرخ حفاری می‌گردد.
- ۳) استفاده از موادی که وزن سبک تر دارند همچون نانو ذرات منجر به بهبود نرخ حفاری می‌گردد.

پیشنهادهای جهت مطالعات آتی

- ۱) بررسی تأثیر استفاده از نانوذرات پلاستیک بر خواص رئولوژی سیال حفاری و نرخ حفاری.
- ۲) استفاده از فعال کننده های سطحی در سیال حفاری و تأثیر آن بر نرخ حفاری.

منابع و مآخذ

۱. اصائلو، مرتضی. (۱۳۹۹). روش های استخراج معادن سطحی (با تجدید نظر کلی). تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
۲. امیری، علیرضا. (۱۳۹۵). مبانی مهندسی گل حفاری. تهران: انتشارات کتاب آوا.
۳. پیراسته نیا، حسین. و طالبی، منصور. (۱۳۹۵). تأثیر متغیرهای رئولوژی و نرخ جریان سیال بر افت فشار در سیستم گردش سیال حفاری. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز. (۱۴۰): ۸۰-۸۷.
۴. دهودار، محسن. معارف وند، پرویز. مروجی کشاورزی، مصطفی. و فضائی زاده، محمد. (۱۳۹۶). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر نرخ نفوذ سرمته و خواص ظاهری کنده‌های حفاری بر شاخص تمیزکاری چاه‌های جهت دار. نشریه علمی ژئومکانیک نفت. ۱ (۱): ۱۵-۲۸.
۵. رستمی، رسول. ابراهیم آبادی، آرش. سعیدی دهقانی، امیرحسین. (۱۳۹۶). بهبود خواص رئولوژی سیال حفاری پایه آبی به وسیله خرده شیشه. نهمین همایش پژوهش های نوین در علوم و فناوری.
۶. سلطانی، عباس. و خراط، ریاض. (۱۳۷۸). مطالعه آزمایشگاهی تأثیر مواد افزودنی (پلیمر و نمک ها) روی خواص فیزیکی و رئولوژی گل حفاری در سیکل گردش گل. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی. دانشگاه علوم و فنون مازندران.
۷. روکی، رضا. نوروزی، محمود. دولتی ارده جانی، فرامرز. و مرادزاده، علی. (۱۳۹۲). مطالعه عدیی جریان سیال حفاری کف در فضای حلقوی چاه‌های نفت. مهندسی مکانیک مدرس. ۱۳ (۷): ۷۴-۸۶.
۸. سلمان زاده، پیام. بحرینیان، سید سعید. و دنده‌زفولی، علیرضا. (۱۳۹۷). تحلیل سه بعدی جریان سیال همراه با کنده‌های حفاری درون فضای حلقه ای چاه افقی. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مکانیک گرایش تبدیل انرژی. دانشگاه شهید چمران اهواز.

۹. مهدی نسب، حمیدرضا، و احمدی، مجتبی. (۱۳۹۵). بررسی آزمایشگاهی امکان سنجی استفاده از قیر طبیعی در گل حفاری. پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی. دانشگاه رازی گرمانشاه.
10. Al-Yasiri, M., & Wen, D. (2019). Gr-Al₂O₃ Nanoparticles-based multifunctional drilling fluid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(23), 10084-10091.
11. Amyx, J., Bass, D., & Whiting, R. L. (1960). Petroleum reservoir engineering physical properties.
12. Ancey, C. (2005). Introduction to fluid rheology. LHE École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
13. Bagci, S., Kok, M. V., & Turksoy, U. (2000). Determination of formation damage in limestone reservoirs and its effect on production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 28(1-2), 1-12.
14. Duan, M., Miska, S. Z., Yu, M., Takach, N. E., Ahmed, R. M., & Zettner, C. M. (2009). Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells. *SPE Drilling & Completion*, 24(02), 229-238.
15. Epelle, E. I., & Gerogiorgis, D. I. (2017). A multiparametric CFD analysis of multiphase annular flows for oil and gas drilling applications. *Computers & Chemical Engineering*, 106, 645-661.
16. habeeb Assi, A. (2017). Enhancing the lifting capacity of drilling fluids in vertical oil wells. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 18(3), 13-29.
17. Haolin, Z. (2014). A simplified mechanistic model for predicting the critical incipient velocity of cuttings in inclined pipes. *Journal of Chemical & Pharmaceutical Research*, 6(3), 735-744.
18. Kjosnes, I., Loklingholm, G., Saasen, A., Syrtstad, S. O., Agle, A., & Solvang, K. A. (2003, October). Successful water based drilling fluid design for optimizing hole cleaning and hole stability. In *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. OnePetro.
19. Lake, L.W. (2007). "Drilling Problems and Solutions", in *Petroleum Engineering Handbook Society of Petroleum Engineers: USA*, Vol.2, 2007, pp.433-454
20. Mao, H., Qiu, Z., Shen, Z., & Huang, W. (2015). Hydrophobic associated polymer based silica nanoparticles composite with core-shell structure as a filtrate reducer for drilling fluid at ultra-high temperature. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 129, 1-14.
21. Ozbayoglu, E. M., & Sorgun, M. (2010). Frictional pressure loss estimation of non-Newtonian fluids in realistic annulus with pipe rotation. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 49(12), 57-64.
22. Paiaman, A. M., Al-Askari, M. G., Salmani, B., Al-Anazi, B. D., & Masihi, M. (2009). Effect of drilling fluid properties on rate of penetration. *Nafta*, 60(3), 129-134.
23. Rooki, R., Ardejani, F. D., Moradzadeh, A., & Norouzi, M. (2015). CFD simulation of rheological model effect on cuttings transport. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 36(3), 402-410.
24. Saasen, A., Eriksen, N. H., Han, L., Labes, P., & Marken, C. D. (1998). Is annular friction loss the key parameter?. *Oil, gas (Hamburg)*, 24.
25. Sorgun, M. (2010). Modeling of Newtonian fluids and cuttings transport analysis in high inclination wellbores with pipe rotation.

26. Sorgun, M., Aydin, I., & Ozbayoglu, M. E. (2011). Friction factors for hydraulic calculations considering presence of cuttings and pipe rotation in horizontal/highly-inclined wellbores. *Journal of petroleum science and engineering*, 78(2), 407-414.
27. Sukhoboka, O. (2017, April). Drilling fluid rheology under high pressure high temperature conditions and its impact on the rate of penetration. In SPE Bergen One Day Seminar. Society of Petroleum Engineers.
28. White, C. C., Chesters, A. P., Ivan, C. D., Maikranz, S., & Nouris, R. (2003, February). Aphron-based drilling fluid: novel technology for drilling depleted formations in the North Sea. In SPE/IADC Drilling Conference. OnePetro.