



مقاله پژوهشی

شبیه سازی آزمایشگاهی عملیات حفاری جهت مطالعه عوامل موثر بر تمیزکاری و افت فشار سیال در حفاری یک چاه

پیام اسمعیل نیا^{۱*}؛ محسن ده ودار^{۲*}؛ پرویز معارف وند^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/ggj.2025.502182.1248

چکیده

اثر انتقال کنده های حفاری به معنای بهبود عملیات تمیزسازی چاه در فرایند حفاری است که نتیجه آن افزایش نرخ نفوذ مته، جلوگیری از گیرکردن لوله ها و کاهش مشکلات حاصل از گشتاور و کشش می باشد. در صورت تمیزسازی بهینه و به موقع چاه، سرعت حفاری افزایش و بنابراین هزینه نهایی کاهش خواهد یافت. پارامترهای موثر بر عملیات تمیزسازی چاه عبارتند از: خصوصیات سیال حفاری، خصوصیات کنده های حفاری از قبیل شکل و اندازه، طراحی آرایش ته چاهی (*BHA*)، ویژگی های نازل های مته، درجه انحراف چاه، نرخ حجمی سیال حفاری و نرخ نفوذ مته. هدف از این مطالعه بررسی اثر پایدارکننده حفاری بر تمیزکاری و افت فشار سیال می باشد. برای بررسی رفتار کنده ها از خروجی طراحی آزمایش برای شبیه ساز آزمایشگاهی استفاده شده است. در آزمایشات با تغییر زاویه دستگاه شبیه ساز، اثر زاویه انحراف چاه در حضور پایدارکننده حفاری بررسی شده است. با افزایش فاصله پایدارکننده از سرمته آزمایشگاهی، افت فشار کم می شود. در محیط آزمایشگاه، با چرخش بیشتر رشته حفاری، افت فشار کمتر خواهد شد. تا زمانی که چرخش باعث افزایش نیروی اصطکاک نشود و فقط به حرکت راحت تر کنده ها در مسیر چرخش شود، تمیزکاری بهبود خواهد یافت و حرکت بستر و تغییر ارتفاع آن را مشاهده خواهد شد. محل قرارگیری استابلایزر دارای موقعیت بهینه ای است که تغییر آن باعث کاهش راندمان پاک سازی چاه می شود. در این مطالعه، فاصله ۷۵ سانتی متری از مته به عنوان موقعیت بهینه تعیین شد.

واژگان کلیدی

تمیزکاری چاه، افت فشار فضای حلقوی، پایدارکننده حفاری، چرخش رشته حفاری، شبیه ساز آزمایشگاهی

۱. پیش گفتار

حفاری افزایش می یابد [2]. اصلی ترین چالش حفره تمیز کردن حفره است که در چاه های جهت دار شدیدتر است. در حین حفاری، افزایش چرخش رشته حفاری در چاه های جهت دار می تواند به طور موثر کنده های حفاری را به داخل فضای حلقوی در بالای قسمت پایینی حفره به حرکت درآورد [3]. هدف اصلی ایجاد ارتباط مربوط به بهینه سازی پارامترهای مختلف از جمله نرخ جریان، لوله، کنده ها و

ابزار اصلی جهت حمل کنده ها در حین عملیات حفاری، سیال در حال گردش یا همان سیال حفاری است. حمل و معلق نگه داشتن کنده های حفاری یکی از مهم ترین خواص مورد نظر هنگام انتخاب سیال حفاری است [1]. چگالی سیال حفاری به دلیل اثرات شناوری (*Buoyancy*)، از دیگر فاکتور هایی است که بر میزان انتقال خرده های حفاری اثر گذار است. با افزایش چگالی سیال، ظرفیت حمل کنده های

$$\Delta P_p = \Delta P_s + \Delta P_{dp} + \Delta P_b + \Delta P_{ann} \quad \text{رابطه ۱:}$$

افت فشار سطح الارضی، لوله‌ها و نیز دالیز ناشی از اصطکاک ایجاد شده بین دیواره‌ها و سیال است و به نام افت فشار اصطکاکی شناخته می‌شود در حالی که افت فشار ایجاد شده در مته ناشی از افزایش شتاب سیال است [8]. در فرمول‌های بالا افت فشار بر حسب psi/ft است.

یکی از تجهیزاتی که در بخش بالایی یا در طول لوله‌های وزنی استفاده می‌شود، پایدارکننده حفاری (*Stabilizer*) می‌باشد. پایدارکننده‌های حفاری به منظور نگه داشتن هم مرکز رشته حفاری با چاه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین پایدارکننده‌های حفاری در بالای مته برای کنترل انحراف چاه در حال حفاری استفاده می‌شود. پایدارکننده‌ها در واقع طولی از لوله را با تیغه‌های روی سطح خارجی آن شامل می‌شوند [9]. یک تثبیت‌کننده قابل تنظیم را می‌توان برای تولید انواع مختلف مجموعه ته‌چاهی بدون نیاز به خروج از چاه کنترل کرد [10]. مطالعه کامل پایدارکننده‌ها و رشته حفاری، می‌تواند امری مهم و موثر در هیدرولیک حفاری و تمیزکاری چاه باشد که خود مستلزم داشتن دانش درستی از خصوصیات چاه و سیال حفاری می‌باشد. پایدارکننده بر اساس شکل تیغه دارای دو نوع تیغه مارپیچ و تیغه مستقیم می‌باشد [11]. تمیز کردن ناکافی حفره‌ها می‌تواند منجر به مشکل‌های زیادی در چاه‌های افقی و جهت‌دار شود. موقعیت پایدارکننده بر زمان تمیز کردن حفره تأثیر می‌گذارد [12]. همچنین در حین حفاری حفره‌های بزرگ در بخش فوقانی، اغلب خرابی تثبیت‌کننده رخ می‌دهد [13]. در شکل ۱ تعدادی از پایدارکننده‌های حفاری مورد استفاده در صنعت و نمای کلی آن‌ها قابل مشاهده است.

ویژگی‌های سیال است [4]. تمیز کردن ناکافی حفره باعث سایش ابزار و کاهش راندمان حفاری می‌شود [5]. حذف ناکارآمدکننده‌ها از چاه منجر به افزایش کشش و گشتاور، گیر کردن لوله و ممکن است باعث هدر رفتن گردش سیال و در نتیجه افزایش زمان غیرمولد حفاری (*NPT*) شود [6].

مدل‌سازی حرکت‌کننده‌ها در حفاری چاه‌ها به علت زیاد بودن تعداد پارامتر اثرگذار و پدیده‌های درگیر، کاری سخت و پیچیده است. عوامل متعددی وجود دارند که بر قابلیت سیال حفاری در انتقال مؤثرکننده‌های حفاری از زیر مته و ایجاد تمیزکاری بهینه اثر می‌گذارند [7]:

- ۱) ظرفیت حمل‌کننده‌ها
- ۲) زاویه چاه در حال حفاری
- ۳) رئولوژی سیال حفاری
- ۴) نرخ نفوذ
- ۵) چرخش رشته حفاری
- ۶) اندازه و شکل‌کننده‌های حفاری
- ۷) مرکزیت رشته حفاری با چاه
- ۸) دبی جریان/سرعت فضای حلقوی.

هنگامی که سیال در حال گردش در رشته حفاری و دالیز است، سیال حفاری حرکت خود را از تانک گل به‌عنوان نقطه ۱ شروع کرده و پس از عبور از قسمت‌های مختلف چاه دوباره به تانک گل به‌عنوان نقطه ۲ برمی‌گردد. در این گردش سیال، برآیند تغییرات ارتفاع سیال برابر صفر و برآیند تغییرات سرعت سیال نیز برابر صفر خواهد بود؛ بنابراین فشار ایجاد شده توسط پمپ تنها صرف غلبه بر افت فشار ایجاد شده در اثر حرکت سیال در تجهیزات زیر است:

- ۱) پمپ گل (ΔP_p)
- ۲) تجهیزات سطح الارضی (ΔP_s)
- ۳) لوله‌های حفاری (ΔP_{dp})
- ۴) مته (ΔP_b)
- ۵) فضای دالیزی (ΔP_{ann})

باتوجه به این که سیال حفاری باید از تمام این نقاط عبور کند سپس به سطح بازگردد؛ بنابراین باید فشار خروجی پمپ با مجموع افت فشارهایی که سیال در مسیر دارد برابر باشد.

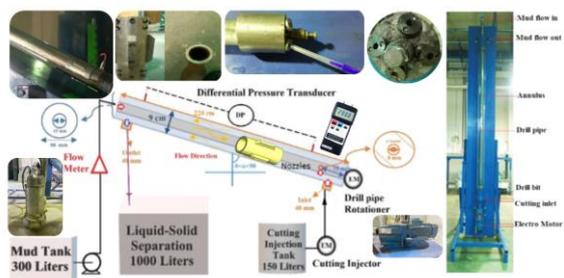
گرفت. در بخش اول به مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته با استفاده از دستگاه شبیه سازی حلقوی حفاری و شرایط حاکم پرداخته و در بخش دوم به مراحل انجام آزمایشات اشاره شده است.

۱.۲. مطالعات آزمایشگاهی

در این بخش به مراحل صورت گرفته از ابتدای کار آزمایشگاهی شامل نحوه نصب پایدارکننده، معرفی دستگاه حلقوی حفاری، فرضیات در نظر گرفته شده در آزمایشات، مراحل انجام آزمایشات، کنده های مورد استفاده در آزمایشات و انواع تست های انجام شده پرداخته است. هدف از انجام آزمایشات، مشاهده نحوه حرکت کنده ها در اطراف پایدارکننده حفاری، بررسی اثر حضور پایدارکننده حفاری در نقاط مختلف از رشته حفاری بر تمیزسازی دستگاه شبیه ساز فضای حلقوی از کنده ها و بررسی، تاثیر پارامترهای مختلف پایدارکننده اعم از زویا و مکان آن بر روی رشته حفاری بر افت فشار، مقایسه میزان اثر گذاری پایدارکننده در زویا و نقاط مختلف و تاثیر چرخش رشته حفاری بر افت فشار فضای دالیزی است.

۱.۱.۲. دستگاه شبیه ساز فضای حلقوی

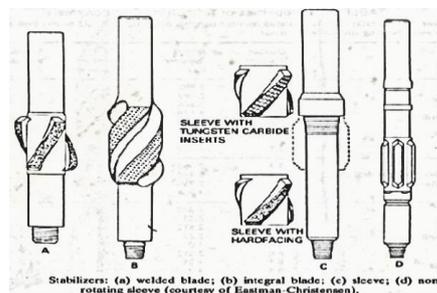
دستگاه شبیه ساز مورد استفاده دارای بخش های مختلفی شامل یک پمپ، یک الکتروموتور محرک، یک مخزن سیال حفاری، شیرهای تخلیه هوا، روتامتر آزمایشگاهی و بخش اصلی فضای حلقوی به همراه میز قابل تنظیم در زویای مختلف دستگاه است.



شکل ۲. شماتیک کلی دستگاه شبیه ساز مورد استفاده

۲.۱.۲. آزمایش های انجام شده و شرایط حاکم

در آزمایشات صورت گرفته دمای دستگاه ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته شده است. همچنین با استفاده از شیرهای تخلیه هوا در بالای پلکسی، تمامی هوای موجود در دستگاه از سیستم خارج شده و در نتیجه می توان در تمامی آزمایشات



شکل ۱. انواع پایدارکننده ها: (a) تیغه جوشی؛

(b) تیغه قالبی (یکپارچه)؛ (c) پایدارکننده آستین دار

(d) پایدارکننده ها با بوش غیر چرخشی [14].

هر چه نرخ چرخش لوله حفاری بیشتر باشد، مقدار بیشتری سیال را به سمت بالا حرکت می دهد. در چاه های انحرافی، این لایه از سیال حفاری بستر کنده های تشکیل شده اطراف لوله را که در بخش پایینی چاه تجمع یافته اند از بین می برد. در جریان آشفته بستر کنده ها تشکیل نخواهد شد. در نتیجه با توجه به داده های میدانی به نظر می رسد در دور های بالاتر از ۱۸۰ دور بر دقیقه، به دلیل آن که جریان در اغلب سیالات به صورت آشفته خواهد بود، اثر مثبت چرخش رشته حفاری بر تمیز سازی چاه کم رنگ تر خواهد شد. در چاه های جهت دار در مواقعی که از موتور درون چاهی برای جهت دهی به چاه استفاده می شود، تمیزسازی چاه به حداقل می رسد. بنابراین در این شرایط، زمان استفاده از موتور درون چاهی باید حتی الامکان کاهش یابد [15]. نتایج تحقیقات حاکی از آن است که چرخش رشته حفاری و دبی پارامترهای عملیاتی با بالاترین تأثیر مثبت بر فرآیند حمل کنده ها بودند. در مقابل، خروج از مرکز رشته حفاری تأثیر منفی بر راندمان حذف کنده ها دارد. عملکرد حمل و نقل کنده ها با چرخش لوله در سطوح مختلف خروج از مرکز، به ویژه در حفره های کاملاً خارج از مرکز، بیشتر بهبود می یابد. همچنین نشان داده شد که برداشتن قلمه های بزرگتر در حفره های افقی، آسان تر از کنده های کوچکتر به نظر می رسد [16].

۲. روش آزمایش

با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، افت فشار در فضای دالیزی و در حضور پایدارکننده حفاری در نقاط مختلف از رشته حفاری و در زویای مختلف چاه حفاری مورد بررسی قرار



شکل ۳. کنده های مورد استفاده در آزمایش ها (سمت راست سیلیس و سمت چپ ماسه)

جدول ۱: طراحی تست و پارامترهای مربوطه

دور چرخش رشته داخلی (RPM)	نوع کنده های حفاری	اندازه مش کنده ها	زاویه انحراف - چاه (نسبت به افق)	فاصله پایدارکننده از انتهای سرشته (cm)	اندازه نازل مورد استفاده (mm)
۵۰	ماسه	۳۰	۰	۷۵	۸
۵۰	ماسه	۳۰	۴۵	۱۲۵	۶
۱۰۰	سیلیس	۴۰	۴۵	۷۵	۶
۵۰	سیلیس	۳۰	۹۰	۲۵	۶
۱۰۰	ماسه	۳۰	۹۰	۱۲۵	۸
۱۰۰	ماسه	۳۰	۴۵	۲۵	۴
۵۰	سیلیس	۴۰	۴۵	۱۷۵	۸
۰	سیلیس	۴۰	۰	۱۲۵	۴
۵۰	ماسه	۴۰	۹۰	۲۵	۶
۱۰۰	ماسه	۳۰	۰	۱۷۵	۶
۰	ماسه	۳۰	۴۵	۲۵	۶
۰	ماسه	۳۰	۹۰	۷۵	۴

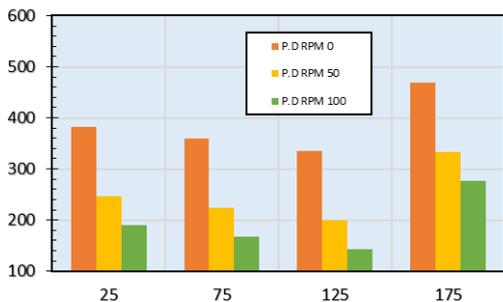
۲.۲. مراحل و روش انجام آزمایش

برای انجام این آزمایشات، طبق روش های زیر عمل شده است: در ابتدا کنده های حفاری را توسط الک های با اندازه مش

از لغزش صرف نظر نمود. به دلیل آن که آب سیالی رایج در حفاری چاه های نفت و گاز است و همچنین بخش اعظم سازند آسماری توسط آب حفاری شده است، در این آزمایشات از آب به عنوان سیال حفاری استفاده شده است. در این آزمایشات با تغییر زاویه دستگاه شبيه ساز، اثر زاویه انحراف چاه در حضور پایدارکننده حفاری بررسی شده است. از دیگر عواملی که در آزمایشات مورد بررسی قرار گرفته است، مکان قرار گیری پایدارکننده حفاری در طول رشته حفاری است. به عبارت دیگر با اضافه کردن پایدارکننده در چهار مکان مختلف از رشته حفاری و تغییر زاویه چاه، اثرات جابه جایی پایدارکننده در طول رشته و تغییر زاویه انحراف چاه در حضور پایدارکننده حفاری بر تمیزسازی چاه بررسی شده است. به دلیل آن که طول رشته حفاری در آزمایشگاه برابر عددی حدوداً ۲۰۰ سانتی متر بود، این مقدار را تقسیم بر ۴ کرده تا تاثیر پایدارکننده در فواصل مختلف دیده شود. به دلیل آن که کنده های تزریقی به دستگاه تا ارتفاعی از فضای حلقوی بالا می آمدند، مکان اولیه پایدارکننده حفاری برای شبيه سازى شرایط نزدیک مته، در فاصله ای معادل ۲۵ سانتی متر از سر مته انتخاب شد. مکان های بعدی پایدارکننده به طبع و با توجه به توضیحات بالا در فواصل ۷۵، ۱۲۵ و ۱۷۵ سانتی متری انتخاب شدند. زوایای مورد استفاده در این آزمایشات ۰ (برای شبيه سازى بخش عمودی چاه)، ۴۵ (برای شبيه سازى بخش جهت دار چاه) و ۹۰ درجه (برای شبيه سازى بخش افقی چاه) می باشند.

نرخ جریانی سیال فراهم شده توسط پمپ سانتریفیوژی در این آزمایشات ۳۰/۲۷ گالن بر دقیقه است. همچنین برای انجام این آزمایشات از نازل های با اندازه ۴، ۶ و ۸ میلی متر استفاده شده است. کنده های مورد استفاده در این آزمایشات از ماسه و همچنین سیلیس SiO_2 انتخاب شده است. بنابراین در تمامی این آزمایشات از ۵۰۰ گرم از این کنده ها که از مش ۳۰-۴۰ عبور کرده و دارای قطری کمتر از ۱ میلی متر هستند استفاده شده است.

در گام بعدی با نرم افزار طراحی آزمایش و با داشتن پارامترهای مورد نیاز برای انجام آزمایشات و همچنین حالت های مختلف آن ها، این نرم افزار با استفاده از روش دی اپتیمال تعداد ۱۲ آزمایش را تعیین نموده که شرح آن در جدول ۱ آمده است.



شکل ۴. نمودار افت فشار بر حسب گردش رشته حفاری با جا به جایی مکان پایدارکننده (طراحی آزمایش)

شکل ۴ بیانگر این است که در محیط آزمایشگاه با افزایش چرخش رشته حفاری، افت فشار به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. چرخش رشته حفاری می‌تواند به افت فشار در فضای آنالوس (فضای بین دیواره چاه و رشته حفاری) کمک کند. این به چند دلیل اتفاق می‌افتد:

۱. ایجاد جریان توربولانس: چرخش رشته حفاری موجب ایجاد جریان توربولانس در فضای آنالوس می‌شود. این جریان‌های توربولانس به حمل و نقل کنده های حفاری (cuttings) به سطح کمک می‌کنند و از ایجاد رسوبات و گرفتگی جلوگیری می‌کنند.
۲. کاهش گرانیوی سیال: چرخش رشته حفاری باعث می‌شود که سیال حفاری در فضای آنالوس سریع‌تر حرکت کند. این افزایش سرعت می‌تواند منجر به کاهش گرانیوی سیال شده و افت فشار را تسهیل کند.
۳. افزایش انتقال حرارت: چرخش رشته حفاری می‌تواند به انتقال حرارت بهینه‌تر کمک کند، که می‌تواند در نتیجه منجر به تغییر در خصوصیات سیال و افت فشار شود.

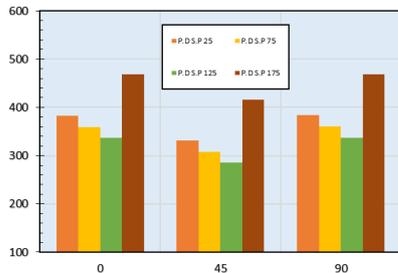
همچنین برای جابه‌جایی مکان پایدارکننده می‌توان اذعان داشت که هر چه از سرمته حفاری دورتر شود میزان افت فشار کمتر می‌شود. نتیجه به این صورت است که افت فشار ایجاد می‌کند. اما هر چه که از سرمته علت این امر این است، زمانی که پایدارکننده در نزدیک‌ترین حد فاصل به سرمته قرار دارد، به محض روشن شدن پمپ، سیال حفاری با دبی حداکثر وارد فضای دالیزی می‌شود و پایدارکننده که قطر آن به مراتب بیشتر از قطر رشته حفاری است موجب کاهش قطر فضای دالیزی در مجاورت آن می‌شود. با دورتر شدن کم‌کم به دلیل اصطکاک سیال با دیواره از سرعت آن کم شده و با شتاب

های ۳۰ و ۴۰ غربال کرده و سپس با وزن کردن ۵۰۰ گرم از کنده ها توسط ترازوی دیجیتالی، کنده های لازم جهت انجام آزمایش وزن شدند. دومین مرحله قرار دادن کنده ها به درون فضای حلقوی حفاری می باشد. در مرحله سوم مخزن ۵۰۰ لیتر را از آب پر کرده تا آب لازم برای تزریق به درون دستگاه به عنوان سیال حفاری فراهم شود. گام بعدی تزریق آب با شلنگ به داخل فضای حلقوی می باشد تا حجم فضای حلقوی پر از آب شود، در حالی که شیر شلنگ خروجی دستگاه بسته باشد. در گام پنجم باید عملیات هواگیری دستگاه از محل شلنگ های اندازه گیری اختلاف فشار انجام شود. حالا باید دستگاه ترانسیمتر اختلاف فشاری و اتصال ها مانند شیر های پنوماتیکی را جهت شروع تست، روشن نمود. اگر تست مورد نظر نیاز به چرخش رشته حفاری دارد، این را نیز باید فعال نمود تا رشته به حرکت درآید. اکنون باید همزمان شیر شلنگ خروجی یا همان شیر مخزن باز شود و همزمان با آن پمپ کف کش روشن شود. خروجی شلنگ وان در تایم های مشخص ۵ ثانیه ای (اندازه گیری با تایمر) در بشکه های خالی قرار می گیرد. اکنون تست به پایان رسیده است و پمپ کف کش باید خاموش شود. گام یازدهم استپ کردن ران دستگاه اندازه گیری اختلاف فشار می باشد. اکنون باید آب درون بشکه ها را خالی کرد تا فقط کنده های حفاری باقی بمانند. گام بعدی شستن کنده ها و خشک کردن آن ها برای عملیات اندازه گیری آن ها و سپس گذاشتن در بسته های زیپ کیپ می باشد. و در آخرین گام باید خرده سنگ های باقی مانده در پلکسی را خالی کرده تا بتوان وزن کنده های باقی مانده را بدست آورد.

۳. نتایج و بحث

در این بخش، نمودار های بدست آمده از مطالعات آزمایشات تجربی صورت گرفته در آزمایشگاه حفاری تحلیل می شود. شکل ۴ مربوط تاثیر گردش رشته حفاری بر افت فشار می باشد.

قرار بگیرند، پایدارکننده حفاری با چرخش و ضربه خود کمک به جا به جایی بهتر کنده‌ها و در نتیجه تمیزکاری بهتر می‌کند. در نتیجه مکان پایدارکننده بر تمیزکاری موثر است. شکل ۷ نمایانگر تاثیر زاویه بر افت فشار است.



شکل ۷. نمودار افت فشار بر حسب زاویه با جا به جایی مکان پایدارکننده (طراحی آزمایش)

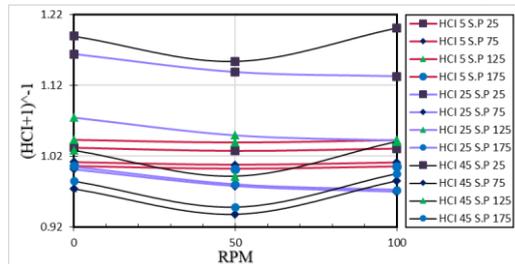
از تحلیل شکل ۷ به این صورت برداشت می‌شود که در حالت افقی و عمودی، افت فشار بیشتر از حالت زاویه ۴۵ درجه است. برای توضیحات زاویه می‌توان گفت: در تست های آزمایشگاهی زاویه عمودی ۹۰ و افقی ۰ در نظر گرفته شده اند. زوایای نزدیک به زاویه ۴۵ درجه، افت فشار کمتری داشته و در دو حالت ۰ و ۹۰ این مقدار به اوج خود می‌رسد. چرخش رشته حفاری در زاویه‌های مختلف می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر افت فشار در فضای آنالوس داشته باشد. در زاویه ۴۵ درجه، افت فشار معمولاً بیشتر است و این موضوع به چند عامل کلیدی بازمی‌گردد:

۱. ترکیب جریان‌های لمینار و توربولانس: در زاویه ۴۵ درجه، جریان سیال در فضای آنالوس به ترکیبی از جریان‌های لمینار و توربولانس تبدیل می‌شود. این تغییرات در نوع جریان می‌تواند موجب افت فشار بیشتری نسبت به زاویه‌های ۰ و ۱۰۰ درجه شود.

۲. افزایش اصطکاک: در زاویه‌های میانگین مانند ۴۵ درجه، سطح تماس بیشتری بین سیال و دیواره‌های چاه وجود دارد. این افزایش سطح تماس منجر به افزایش اصطکاک و در نتیجه افت فشار بیشتر می‌شود.

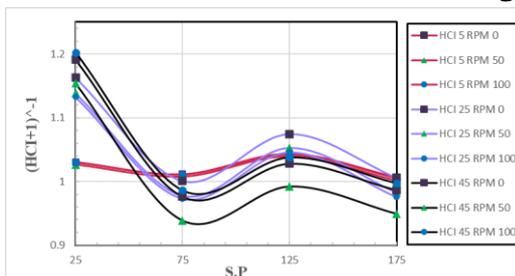
۳. حرکت کنده‌های حفاری: در زاویه‌های ۴۵ درجه، کنده‌های حفاری ممکن است به صورت ناهموارتر حرکت کنند و همین موضوع می‌تواند منجر به افت فشار بیشتری شود. در زاویه‌های عمودی (۰ درجه) یا تقریباً افقی (۱۰۰ درجه)، حرکت کنده‌ها ممکن است یکنواخت‌تر باشد.

کمتری به پایدارکننده در فواصل دورتر برخورد می‌کند. این امر برای همه نقاط درست تلقی می‌شود غیر از فاصله ۱۷۵ سانتی‌متری از سرمته که به دلیل قرار داشتن گیج اختلاف فشاری درست در بالای مکان پایدارکننده می‌باشد که حرکت پایدارکننده در حین چرخش موجب خطای آزمایشگاهی شده است. شکل ۵ نشان دهنده تاثیر گردش چرخش رشته حفاری بر تمیزکاری است.



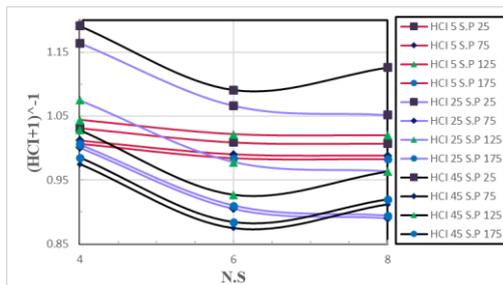
شکل ۵. نمودار تمیزکاری بر حسب گردش رشته حفاری با جا به جایی مکان پایدارکننده (طراحی آزمایش)

برای شکل ۵ می‌توان گفت که تاثیر چرخش رشته حفاری بر تمیزکاری تا حد معینی است. شاخصه تمیزکاری در نمودارهایی که محور عمودی آن پارامتر تمیزکاری می‌باشد به توان منفی ۱ است و به این معنی که هر چه نمودار به سمت پایین تر بیاید تمیزکاری بهتری را نشان می‌دهد. پس از شکل ۶ می‌توان نتیجه گرفت که تمیزکاری در چرخش های مختلف دارای نقطه بهینه است و از نقطه بهینه به بعد شاخصه تمیزکاری با چرخش رشته حفاری رابطه معکوس دارد. شکل ۶ تاثیر مکان پایدارکننده بر تمیزکاری را نمایش می‌دهند.



شکل ۶. نمودار تمیزکاری بر حسب مکان پایدارکننده با گردش های متفاوت رشته حفاری (طراحی آزمایش)

از نمودارهای حاصل از تست‌های در محیط آزمایشگاه به این صورت برداشت شد که رفتار به صورت نوسانی می‌باشد و هر گاه کنده‌ها پس از روشن شدن پمپ در نزدیکی پایدارکننده



شکل ۱۰. نمودار تمیزکاری بر حسب سایز نازل با جا به جایی مکان پایدارکننده(طراحی آزمایش)

از شکل‌های ۹ و ۱۰ برمی‌آید که هر چه نازل سایز بزرگتر باشد، افت فشار کمتر و تمیزکاری بهتر است. برای تحلیل نمودار از روابط مربوط به نیروی جت استفاده شده است.

در ابتدا رابطه قطر نازل بررسی و $d_n = 32 \sqrt{\frac{4 \times TFA}{3 \times \pi}}$ که در آن دیده می‌شود با افزایش قطر نازل، Total Flow Area (Flow Area) نیز افزایش می‌یابد.

$$TFA = (0.0096 \times Q) \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P_{bit}}} \quad \text{رابطه ۲:}$$

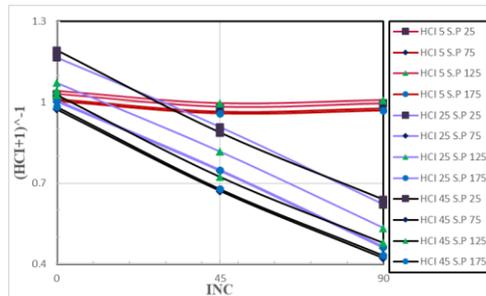
مشاهده می‌شود با افزایش Total Flow Area، افت فشار سرمته (ΔP_{bit}) کاهش می‌یابد. از رابطه $\Delta P_{bit} = \frac{m}{m+2} \Delta P_t$ برمی‌آید که با توجه به اینکه m یک عدد ثابت است، کاهش افت فشار سرمته موجب کاهش افت فشار ناشی از کل تجهیزاتی که در مسیر عبوری سیال قرار دارند می‌شود. در این فرمول‌ها d بر حسب in، TFA، بر حسب in^2 ، دانسیته بر حسب ppg و دبی بر حسب gpm است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارهای بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی برای بررسی مکان حضور پایدارکننده حفاری در نقاط مختلف رشته حفاری، زوایای انحراف، سایز کنده‌ها، چرخش رشته حفاری، نوع کنده‌ها و سایز نازل‌ها، نتایج زیر حاصل شد:

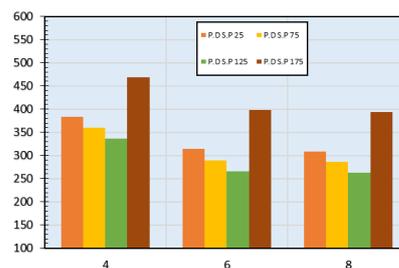
- ۱- با افزایش فاصله پایدارکننده از سرمته آزمایشگاهی، افت فشار کم می‌شود.
- ۲- در محیط آزمایشگاه، با چرخش بیشتر رشته حفاری، افت فشار کمتر خواهد شد. تا زمانی که چرخش باعث افزایش نیروی اصطکاک نشود و فقط به حرکت راحت تر کنده‌ها در مسیر چرخش شود، تمیزکاری بهبود خواهد یافت و حرکت بستر و تغییر ارتفاع آن مشاهده شد.
- ۳- در آزمایشگاه، با افزایش چگالی کنده‌ها، افت فشار کمی

۴. تنش برشی و نیروی جاذبه: در زاویه ۴۵ درجه، تعادل بین تنش برشی و نیروی جاذبه تغییر می‌کند که می‌تواند بر حرکت سیال و افت فشار تاثیر بگذارد.
شکل ۸ تاثیر زاویه بر تمیزکاری می‌باشد.



شکل ۸. نمودار تمیزکاری بر حسب زاویه با جا به جایی مکان پایدارکننده(طراحی آزمایش)

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که با تغییر زاویه از حالت افقی به حالت عمودی بهتر می‌شود (شاخصه تمیزکاری در محور عمودی نمودار به توان منفی ۱ است). اما با افزایش زمان تست از ۴۵ ثانیه به زمان‌های طولانی‌تر، تمیزکاری زاویه افقی بهتر از حالت ۴۵ درجه است. چون در آزمایشگاه محدودیت وجود دارد نمی‌توان میزان کنده‌ها را افزایش داد و لذا این میزان کنده در زمان‌های زودتر خالی می‌شوند. اما برای زاویه ۴۵ درجه به این صورت است که از یک جایی به بعد کنده‌ها صرفاً در جای خود سر می‌خورند و قادر به خروج از فضای دالیزی نخواهند بود. شکل‌های ۹ و ۱۰ تاثیر سایز نازل بر افت فشار و تمیزکاری را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نمودار افت فشار بر حسب سایز نازل با جا به جایی مکان پایدارکننده(طراحی آزمایش)

review. *Journal of petroleum science and engineering*, 186, 106748..
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106748>

[7] ASME Shale Shaker ASME Shale Shaker Committee. (2011). *Drilling fluids processing handbook*. Elsevier.

[8] مودنی، علیرضا؛ نبی، محمد. (۱۳۹۳) مهندسی حفاری. اصفهان: بامداد امید

[9] Hossain, M. E., & Al-Majed, A. A. (2015). *Fundamentals of sustainable drilling engineering*. John Wiley & Sons.

[10] Tang, L., Yao, H., & Wang, C. (2021). Development of remotely operated adjustable stabilizer to improve drilling efficiency. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95, 104174. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104174>

[11] Chen, Z. M., & Xiong, J. Y. (2010). Numerical Calculation for Carrying-cutting Lifting of Spiral Centralizer in Conventional Drilling. *Natural Gas Technology*, 4(5), 44-46.

[12] Dehvedar, M., Moarefvand, P., Kiyani, A. R., & Mansouri, A. R. (2019). Using an experimental drilling simulator to study operational parameters in drilled-cutting transport efficiency. *Journal of Mining and Environment*, 10(2), 417-428. <https://doi.org/10.22044/jme.2019.7665.1624>

[13] Di, Q., Qin, K., Chen, T., Liu, B., Li, S., Wang, W., ... & Zhang, H. (2021). An innovative method for studying the dynamic failure mechanism of box connection of stabilizer in large diameter wellbore of ultra-deep wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108822. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108822>

[14] Inglis, T. (2013). *Directional drilling* (Vol. 2). Springer Science & Business Media.

[15] Sun, X., Wang, K., Yan, T., Shao, S., & Jiao, J. (2014). Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4(3), 255-261. <https://doi.org/10.1007/s13202-014-0118-x>

[16] Abbas, A. K., Alsaba, M. T., & Al Dushaishi, M. F. (2022). Comprehensive experimental investigation of hole cleaning performance in

افزایش یافت و میزان ارتفاع بسترکنده ها نیز افزایش یافته است.

۴- در تست های آزمایشگاهی در زاویه های افقی و عمودی افت فشار بیشتر از حالت زاویه ۴۵ درجه است. تاثیر تمیزکاری عکس افت فشار می باشد. ارتفاع بستر کنده ها کمتر می شود.

۵- محل قرارگیری استابلایزر دارای موقعیت بهینه ای است که تغییر آن باعث کاهش راندمان پاک سازی چاه می شود. در این مطالعه، فاصله ۷۵ سانتی متری از مته به عنوان موقعیت بهینه تعیین شد.

۵. سپاس گذاری

بدینوسیله از جناب آقای محمدرضا صفری و جناب آقای محمد زرین پوش که کمک های بی دریغشان در آزمایشگاه حفاری قوتی برای انجام کارها بود، کمال تشکر و قدردانی بعمل می آید.

۶. مراجع

[1] Van dyke, K., Rotary Drilling, The Bit Unit 1 Lesson 2. International Association of Drilling Contractors, 1951.

[2] Hughes, B. (2006). Drilling fluids reference manual. *Houston, Texas*.

[3] Olawale, S. B., Longe, P. O., & Ofesi, S. F. (2021). Evaluating the effect of drill string rotation and change in drilling fluid viscosity on hole cleaning. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 11(7), 2981-2989. <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01209-y>

[4] Yeo, L., Feng, Y., Seibi, A., Temani, A., & Liu, N. (2021). Optimization of hole cleaning in horizontal and inclined wellbores: A study with computational fluid dynamics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108993. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108993>

[5] Hu, W., Zhang, J., Xu, B., & Zhu, H. (2024). Numerical simulation and experimental study of hole cleaning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 147, 105697.. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105697>

[6] Mahmoud, H., Hamza, A., Nasser, M. S., Hussein, I. A., Ahmed, R., & Karami, H. (2020). Hole cleaning and drilling fluid sweeps in horizontal and deviated wells: Comprehensive

horizontal wells including the effects of drill string eccentricity, pipe rotation, and cuttings size. *Journal of Energy Resources Technology*, 144(6), 063006.
<https://doi.org/10.1115/1.4052102>

