

مقاله پژوهشی

مطالعه اثر حضور پایدارکننده بر نحوه تمیزکاری فضای دالیزی در یک فلولوپ آزمایشگاهی و ساخت مدل شبیه‌سازی شده آن

علیرضا منصوری^۱؛ علیرضا کیانی^۲؛ محسن ده وار^۳؛ پرویز معارف وند^۴

۱. فارغ التحصیل؛ کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
۲. فارغ التحصیل؛ کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
۳. مربی؛ دکترای تخصصی؛ دانشکده‌ی مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
۴. استادیار؛ دکترای تخصصی؛ دانشکده معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2021.229874.1122

واژگان کلیدی	چکیده
پایدارکننده تمیز سازی حفاری دینامیک سیالات محاسباتی فلوئنت	هدف از تمیز سازی چاه، بهبود روند حمل‌کننده‌های حفاری به سطح در حین عملیات حفاری است. تمیز سازی ناکافی منجر به مسدود شدن چاه، گیر لوله‌های حفاری، هرز روی سیال حفاری، افزایش گشتاور و کشش و بریدن رشته حفاری می‌شود. همه این مشکلات باعث افزایش زمان‌های غیر تولیدی و در نتیجه منجر به افزایش زمان و هزینه‌های حفاری می‌شود. پارامترهای متعددی از جمله خواص سیال حفاری، خواص کنده‌های حفاری، آرایش مجموعه ته چاهی، آرایش نازل‌های مته حفاری، زاویه انحراف چاه، دبی جریان سیال حفاری و نرخ نفوذ مته حفاری بر تمیز سازی چاه اثرگذارند. در این مقاله تلاش شده جدا از نقش کلیدی پایدارکننده‌ها در زاویه سازی، زاویه اندازی و تثبیت آن، به بررسی آزمایشگاهی اثر حضور پایدارکننده حفاری در مکان‌های مختلف مجموعه ته چاهی و زوایای انحراف مختلف چاه بر تمیز سازی چاه با استفاده از شبیه‌ساز آزمایشگاهی جریان در حلقه‌ی بسته پرداخته شده است. در جهت تحقق این امر یک پایدارکننده با چهار تیغه مستقیم در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شد. تعدادی آزمایش با حضور پایدارکننده در دو آرایش نزدیک و دور از مته در زوایای انحراف متفاوت انجام شد و در نهایت تلاش شد تا با استفاده از داده‌های حاصله، مدلی شبیه‌ساز با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت ^۱ ساخته شود تا در آینده مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده از کارهای آزمایشگاهی، حضور پایدارکننده حفاری نقش بسیار زیادی در بهبود فرآیند حمل‌کننده و در نتیجه تمیز سازی مؤثر چاه در زوایای بحرانی ایفا می‌کند.

۱. پیش‌گفتار

پایدارکننده‌های حفاری در رشته حفاری با اهداف مختلفی استفاده می‌شوند. کاربرد این‌گونه وسایل در حفاری جهت‌دار است. از مهم‌ترین کاربردهای آن‌ها می‌توان به کنترل انحراف چاه (Richard & Carden, 2007)، جلوگیری از گیر کردن

لوله‌ها در چاه^۲ (Smith, 1982)، کاهش تنش‌های کمانشی^۳ و خمشی^۴ در لوله‌های وزنی (Richard & Carden, 2007)، امکان‌پذیر نمودن بالا بردن وزن روی سر مته و از میان برداشتن ناهمواری‌های چاه برای اطمینان از یکنواختی قطر قسمت حفاری شده، اشاره نمود. از مهم‌ترین کاربردهای

1 FLUENT
2 Differential Sticking
3 Buckling Stress
4 Bending Stress

است. برای این منظور بهتر است از لوله‌های وزنی شیاردار^۵ یا مارپیچ^۶ و یا پایدارکننده‌های حفاری^۷ استفاده شود (Pastusek, 2018) بنابراین پایدارکننده‌های حفاری سهم بسزایی در تراشیدن کیک گل ضخیم ایجادشده بر روی دیواره چاه و در نتیجه افزایش سرعت حفاری خواهند داشت (Egenti, 2014).

ویلی^۸ در سال ۱۹۶۵، به بررسی اثر مثبت پایدارکننده‌ها و آرایش حفظ زاویه بر عمر سرمته پرداخت (Wiley, 1965). براین^۹ و همکارانش در سال ۱۹۹۰، مطالعاتی در زمینه تأثیر مکان پایدارکننده بر زاویه سازی و زاویه اندازی در مته‌های الماسه و سه کاج انجام دادند (O'Bryan & Huston, 1990). در سال ۲۰۰۹ رادفور^{۱۰} و همکارانش مطالعاتی را در زمینه اثرات استفاده از پایدارکننده‌های نسل جدید قابل انبساط^{۱۱} بر روی سرعت حفاری ترتیب دادند. آن‌ها دریافتند، چاهی که توسط پایدارکننده قابل انبساط حفرشده بود، مقدار لرزش جانبی مته و رشته حفاری نسبت به چاه دیگر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته بود (Radford, Jen Wiley & kins & Li, 2009). در سال ۲۰۱۱ مک کورمیک^{۱۲} و همکارانش مطالعاتی در زمینه اثر استفاده از پایدارکننده‌های قابل تنظیم و تجهیزات کاهنده گشتاور و کشش^{۱۳} در یکی از میدان‌های اکوادور انجام دادند. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد حفاری در چاه‌های جهت‌دار توسط پایدارکننده‌های قابل تنظیم به دلیل کاهش زمان موردنیاز برای لغزش رشته^{۱۴} و افزایش زمان چرخش، بازدهی حفاری را افزایش می‌دهد (McCormick, Osorio, Andachi & Barth, 2011). در سال ۲۰۱۲ طاهری شکیب^{۱۵} و همکارانش مطالعاتی بر روی طراحی پایدارکننده نزدیک مته با استفاده از هیدرولیک بهینه با استفاده از داده‌های سازندهای میشان و آغاجاری انجام دادند (TaheriShakib, Jalalifar &

پایدارکننده‌ها، انحراف دهی به چاه حفاری از طریق ایفای نقش در آرایش درون‌چاهی است. در چاه‌های حفاری برای جهت‌دهی به چاه توسط آرایش درون‌چاهی، از ترکیب پایدارکننده‌ها و لوله‌های وزنی استفاده می‌شود. سه نوع رایج آرایش درون‌چاهی در هنگام استفاده از پایدارکننده‌ها در حفاری جهت‌دار شامل زاویه سازی که همان تمایل به افزایش انحراف از حالت عمود است، زاویه اندازی که تمایل به کاهش انحراف از حالت عمود است و حفظ زاویه که همان تمایل به حفظ زاویه است، هست (Xiaofeng, Tie, Wei & Yanze, 2013). در این تحقیق تلاش شده تا با توجه به اهمیت آرایش پایدارکننده‌ها، تأثیر قرار گرفتن یکی از این پایدارکننده‌ها بر عملیات تمیزکاری چاه دیده شود.

یکی از اساسی‌ترین مسائلی در حفاری چاه‌های نفت و گاز، تمیز سازی چاه در حال حفاری از خرده‌سنگ‌های تولیدشده است (Uddin, Choudhury & Ansari, 2016)، تمیز سازی نامناسب و ناکافی دهانه چاه یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های پیش رو در صنعت حفاری است (Dehvedar & Moarefvand, 2019). زاویه چاه در هنگام عملیات (Okrajni & Azar, 1986)، دبی جریان (Azar & Sanchez, 1997)، رئولوژی سیال حفاری (Duan, Miska, Yu, Takach, Ahmed & Zettner, 2009)، اندازه و شکل کنده‌های حفاری (Bilgesu, Mishra & Ameri, 2007)، نرخ نفوذ سرمته (Li & Walker, 2001)، سرعت چرخش رشته حفاری (Akshik, Behzad & Rajabi, 2015) و میزان نا مرکزیت رشته حفاری (GhasemiKafrudi & Hashemabadi, 2016) از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر کیفیت تمیزکاری چاه محسوب می‌شوند.

یکی از راه‌های جلوگیری از گیرکردن لوله‌ها ناشی از تشکیل کیک گل، به حداقل رساندن سطح تماس رشته حفاری با دیواره چاه از طریق یک طراحی مناسب برای رشته حفاری

⁵ Fluted Drill Collars

⁶ Spiraled Drill Collars

⁷ Drilling Stabilizers

⁸ Wiley

⁹ Bryan

¹⁰ Radford

¹¹ Expandable Stabilizer

¹² McCormick

¹³ Torque & Drag

¹⁴ Sliding

¹⁵ Taheri Shakib

انجام شد.

۲. تجهیزات و روش‌ها

۱.۲ رویکرد آزمایشگاهی

آب سیالی رایج در حفاری چاه‌های نفت و گاز است. بخش اعظم سازند آسماری می‌تواند توسط آب حفاری شود. در این آزمایش‌ها از آب به‌عنوان سیال حفاری استفاده شده است. در این پژوهش با توجه به شرایط آزمایشگاهی، در طراحی پایدارکننده عوامل مختلفی از جمله ابعاد پایدارکننده و تیغه‌ها، جنس پایدارکننده، تعداد تیغه‌ها، زاویه مخروطی تیغه‌ها، نوع و شکل تیغه‌ها در نظر گرفته شده است (شکل ۱-الف). با توجه به ابعاد دستگاه شبیه‌ساز فضای حلقوی حفاری از جمله طول و قطر لوله حفاری و پلکسی^{۲۴} دستگاه و محدودیت‌های موجود از جمله حساسیت و شکنندگی پلکسی و همچنین لزوم قابلیت جابجایی پایدارکننده در طول دستگاه و همچنین قطر کنده‌های مورد استفاده در آزمایش، فاصله سطح تیغه‌های پایدارکننده از پلکسی، مقدار نیم سانتی‌متر انتخاب شد. به دلیل نیاز به جابه‌جایی آسان پایدارکننده در طول لوله داخلی، فاصله‌ای بین سطح خارجی لوله حفاری و قطر داخلی پایدارکننده در نظر گرفته شد. در این دستگاه، رشته حفاری همانند حفاری یک چاه واقعی دارای چرخش بوده و اثر جت سیال خروجی توسط ۴ نازل با درجه انحراف از محور لوله در نظر گرفته شده است (Dehvedar, Moarefvand & Kiyani, 2019). دستگاه مورد استفاده دارای ریل‌هایی است که بررسی تغییر انحراف چاه از حالت عمودی با زاویه ۰ درجه تا حالت افقی با زاویه ۹۰ درجه را امکان‌پذیر می‌کند. با توجه به اینکه رایج‌ترین نوع پایدارکننده‌های حفاری در صنعت، دارای ۳ و یا ۴ تیغه بروی پایدارکننده هستند، در طراحی پایدارکننده موردنظر از ۴ تیغه استفاده شد. زاویه

(Fatehirad, 2012). در سال ۲۰۱۳ ژیانوفنگ^{۱۶} و همکارانش مطالعاتی در زمینه اثر شکل تیغه‌های پایدارکننده بر روی تمیز سازی چاه در چاه‌های عمودی صورت دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند عدم طراحی مناسب شکل تیغه‌ها باعث انتقال ناکافی کنده‌ها، جریان رو به عقب، خرد کردن مجدد کنده‌ها و تویی شدن^{۱۷} مته می‌شود که تمامی این موارد نرخ نفوذ مته را کاهش می‌دهند (Xiaofeng, Tie, Wei & Yanze, 2013). در سال ۲۰۱۶ اودین^{۱۸} و همکارانش مطالعاتی بر روی بسته شدن انتهای چاه در اثر انباشته شدن خرده‌های حفاری در حضور ترکیب متوالی مته و پایدارکننده با استفاده از شبیه‌سازی و محاسبات ریاضی جهت پیش‌بینی حرکت ذرات انجام دادند. افزایش سطح جریان باعث مستقیم شدن مسیر حرکت کنده‌شده و در نتیجه سرعت حرکت ذرات از اطراف پایدارکننده چهار تیغه‌ای سریع‌تر و راحت‌تر صورت می‌گیرد (Uddin, Choudhury & Ansari, May 2016). در سال ۲۰۱۸ پاستوسک و همکارانش مطالعاتی بر اساس تعیین مکان بهینه، قطر و طراحی اجزا پایدارکننده‌ها انجام دادند که در آن پارامترهایی چون زاویه مخروطی^{۱۹}، زاویه پیچش تیغه‌های پایدارکننده^{۲۰} و ناحیه گذرگاه^{۲۱} مورد توجه قرار گرفت (Pastusek, 2018).

هدف این پژوهش علاوه بر مطالعه آزمایشگاهی تأثیر زاویه چاه و مکان پایدارکننده، ساخت یک مدل شبیه‌سازی شده در فضای فلوئنت بر اساس داده‌های آزمایشگاهی است تا بتوان از آن در آینده در بررسی پارامترهای مؤثر بر تمیز سازی چاه استفاده نمود. جهت رسیدن به این هدف، پس از انجام تست‌های آزمایشگاهی در شرایط مذکور، مدل هندسی فضای حلقوی دستگاه شبیه‌ساز در فضای نرم‌افزاری گمبیت^{۲۲} ساخته شد و با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت^{۲۳} شرایط مرزی اعمال گردید. بعد از تعیین مش بهینه، با مقایسه نتیجه حاصل از تست آزمایشگاهی و شبیه‌سازی فضای دالیزی و حذف خطاهای آزمایشگاهی، اعتبارسنجی مدل

¹⁶ Xiaofeng

¹⁷ Bit balling

¹⁸ Uddin

¹⁹ Taper Angle

²⁰ Wrap Angle

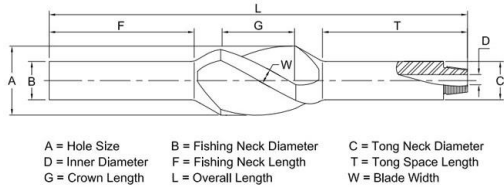
²¹ Bypass Area

²² Gambit

²³ FLUENT

²⁴ Plexy

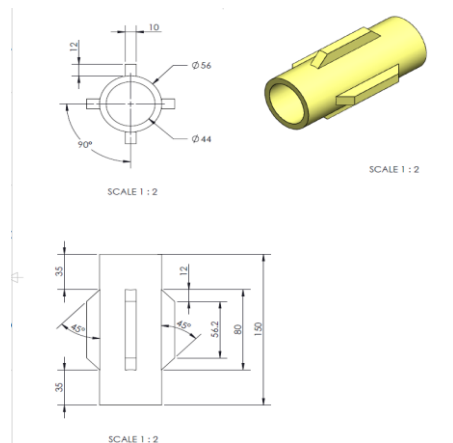
آن دستگاه را در زوایای بین صفر تا ۹۰ درجه تنظیم نموده و اثر زاویه انحراف چاه را در آزمایش‌ها مختلف بررسی نمود. شماتیک کلی دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است.



الف



ب



ج

شکل ۱. الف) ابعاد کلیدی در طراحی پایدار کننده‌ها (ب) پایدارکننده مورد استفاده در این مطالعه (ج) نقشه طراحی پایدارکننده ۴ تیغه‌ای در محیط نرم‌افزار *SolidWorks 2016*

مخروطی رایج تیغه‌ها در صنعت ۴۵ درجه است (*Pastusek, 2018*) به همین علت زاویه مخروطی پایدارکننده طراحی شده ۴۵ درجه در نظر گرفته شد. (شکل ۱-ب). ابعاد پایدارکننده طراحی شده در جدول شماره ۱ ذکر شده است. پس از تعیین ویژگی‌های پایدارکننده مورد نظر، مدل سه‌بعدی آن توسط نرم‌افزار *SolidWorks 2016* طراحی شد. در شکل ۱-ج طرح و نقشه سه‌بعدی پایدارکننده به همراه ابعاد استوانه و تیغه‌های آن قابل مشاهده است.

همچنین برای آن که پایدارکننده را بتوان در طول لوله داخلی به راحتی جابه‌جا کرد و در نقطه دلخواه بر روی لوله تثبیت کرد، تعدادی سوراخ رزوه شده بر روی استوانه پایدارکننده ایجاد شد تا با بستن پیچ‌های آلن، پایدارکننده بر روی لوله حفاری در نقطه دلخواه ثابت شود (شکل ۱-ب).

جدول ۱. ابعاد پایدارکننده طراحی شده

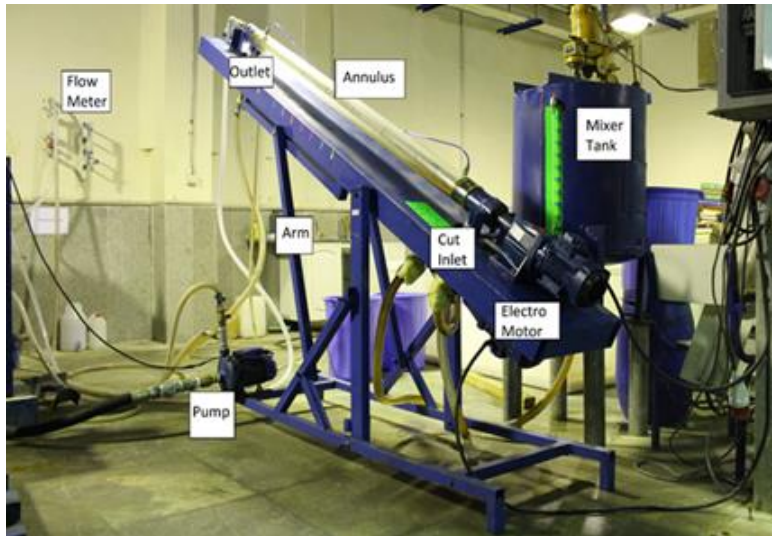
ابعاد	اندازه (میلی‌متر)
شعاع داخلی استوانه پایدارکننده	۲۲
شعاع خارجی استوانه پایدارکننده	۲۸
ضخامت تیغه‌های پایدارکننده	۱۲
ارتفاع استوانه پایدارکننده	۱۵
طول تیغه‌های پایدارکننده	۸

دستگاه شبیه‌ساز مورد استفاده در دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر دارای بخش‌های مختلفی شامل پمپ گریز از مرکز، الکتروموتور^{۲۵} محرک، الکتروموتور مکنده، مخزن کنده‌های حفاری به همراه همزن با دور بالا، شیرهای تخلیه هوا، دورسنج آزمایشگاهی و بخش اصلی فضای حلقوی^{۲۶} به همراه میز قابل تنظیم در زوایای مختلف دستگاه است. شکل ۲ تصویر دستگاه به همراه اجزاء مختلف آن را نشان می‌دهد.

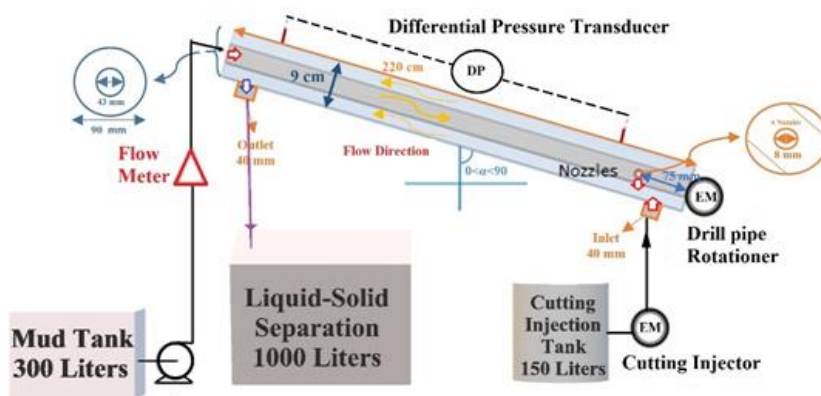
مته مورد استفاده در آزمایش‌ها، نمونه‌ای از مته‌های حفاری با چهار نازل به قطر ۸ میلی‌متر است. میز دستگاه دارای دو بازو با قابلیت حرکت در طول مسیر ریلی است که می‌توان از طریق

²⁵ Electro-motor

²⁶ Annulus



شکل ۲. دستگاه شبیه‌ساز فضای حلقوی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (Dehvedar, Moarefvand, Kiyani & Mansouri, 2019)



شکل ۳. شماتیک کلی دستگاه شبیه‌ساز دانشگاه صنعتی امیرکبیر (Dehvedar, Moarefvand & Kiyani, 2019)

۲۰۱۳ کنده‌های تا فاصله d (قطر پایدارکننده) از ته چاه از فضای حلقوی بالا می‌آمده و روی دیواره پایین چاه می‌نشینند (Xiaofeng, Tie, Wei & Yanze, 2013). در نتیجه مکان اولیه پایدارکننده حفاری برای شبیه‌سازی شرایط *Near Bit*، در فاصله‌ای معادل قطر پایدارکننده (۸ سانتی‌متر) از بالای مته انتخاب شد. در زاویه انحراف بحرانی

از آنجاکه تمامی تست‌ها در دما و فشار آزمایشگاهی انجام شده و اختلاف فشار در دو سرفضای دالیزی در تمامی تست‌ها، کمتر از هزار کیلو پاسکال بوده و فشار حاصله از پمپاژ سیال با پمپ سانتریفیوژی مورد استفاده پایین است، برای این‌گونه از تست‌ها، عنوان دما پایین و فشار پایین^{۲۷} استفاده می‌شود. با توجه به مطالعات انجام شده توسط ژیانوفنگ در سال

²⁷ Low Pressure-Low Temperature (LPLT)

انتخاب دوم قرار گرفت. این اندازه‌گیری با خط کش فولادی و نسبت به انتهای سرمته اندازه‌گیری شده است. در شکل ۵، مکان قرارگیری پایدارکننده در دو فاصله ۸ و ۹۵ سانتی‌متری نشان داده شده است.

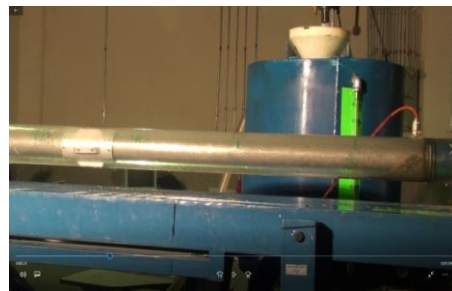
(۵۵ درجه) بستری از کنده‌ها در فاصله ۹۵ سانتی‌متری از انتهای مته در حلت عدم استفاده از پایدارکننده شکل گرفت. (شکل ۴) انتخاب مکان دوم برای قرارگیری پایدارکننده، مطالعه اثر حضور آن در زمان برابری نیروهای پیشران کنده و نیروهای مقاومت‌کننده در برابر حرکت آن بود به همین دلیل فاصله‌ی ۹۵ سانتی‌متری از سرمته مبنای



شکل ۴. شروع لغزش کنده‌ها به سمت انتهای فضای حلقوی در زاویه ۵۵ درجه و فاصله ۹۵ سانتی‌متری از انتهای سرمته



ب



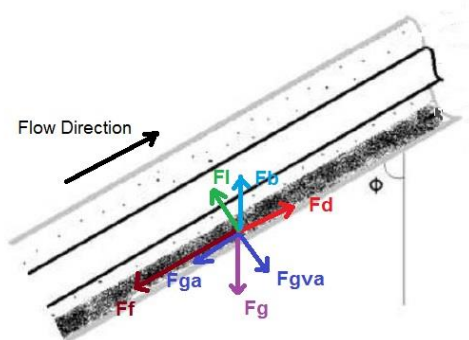
الف

شکل ۵. قرارگیری پایدارکننده در فاصله ۹۵ سانتی‌متری سرمته در حالت افقی (الف)، قرارگیری پایدارکننده در فاصله ۸ سانتی‌متری سرمته در زاویه ۵۵ درجه (ب)

داده شده است.

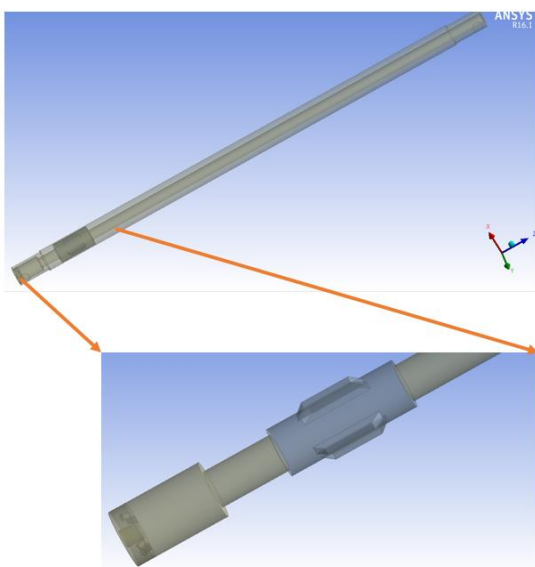
نیروهای پسا، شناوری و برآ از نیروهای کمک‌کننده به تمیز سازی چاه و نیروهای وزن متشکل از نیروهای خلاف جهت جریان و عمود بر جهت جریان و اصطکاک از جمله نیروهای مقاوم در برابر انتقال کنده‌ها به خروجی و تمیز سازی چاه به شمار می‌آیند.

نرخ جریان سیال توسط پمپ گریز از مرکز در آزمایش‌ها ۲۲/۸۴ گالن بر دقیقه است. همچنین برای انجام آزمایش‌ها از نازل‌های با اندازه ۸ میلی‌متر استفاده شده است. در تمامی این آزمایش‌ها از ۵۰۰ گرم کنده با اندازه مش ۱۲ تا ۲۰ که دارای قطری بین ۱ تا ۲/۲ میلی‌متر هستند، استفاده شده است. نیروهای وارد بر کنده‌های حفاری بالاترین نقش را در تمیزکاری فضای دالیزی به عهده‌دارند. در شکل ۶ جهت نیروهای اعمالی به کنده‌های حفاری موجود در سیال نشان



شکل ۶. نیروهای وارده به کنده‌های حفاری در طول فضای حلقوی. نیروهای پسا (Fd) و شناوری (Fb) در جهت جریان، نیروهای وزن (Fg) و اصطکاک (Ff) در خلاف جهت جریان، نیروی برآ (FI) از طرف سیال و در جهت عمود بر جریان به کنده، نیروی وزن خود به دونیروی خلاف جهت جریان (Fga) و نیروی عمود بر جهت جریان ($Fgva$)

۲ مشخصات مربوط به سه مش مورد استفاده جهت انتخاب مش بهینه نشان داده شده است.



شکل ۷. نمای طولی مدل هندسی دستگاه و نمایی از پایدارکننده و نازل‌های مته طراحی شده با گمبیت در محیط انسیس

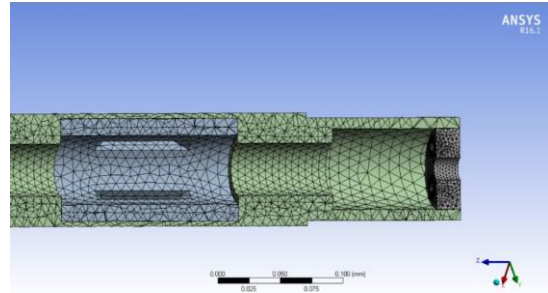
۲.۲ شبیه‌سازی در فضای فلوئنت

برای شبیه‌سازی جریان سیال و کنده‌ها در فضای حلقوی و بررسی رفتار جریانی سیال در اطراف پایدارکننده، در ابتدا مدل دستگاه در نرم‌افزار گمبیت^{۲۸} طراحی شد. مدل شبیه‌سازی دارای یک ورودی جریان در پایین فضای حلقوی، یک خروجی جریان در قسمت بالایی فضای حلقوی، استوانه بیرونی به عنوان دیواره فضای حلقوی، استوانه داخلی به عنوان رشته حفاری، مته به همراه ۴ نازل ۸ میلی‌متری تعبیه شده در انتهای آن و پایدارکننده چهار تیغه‌ای در فاصله ۸ سانتی‌متری از انتهای مته می‌باشد. در شکل ۷ هندسه مدل طراحی شده دستگاه توسط نرم‌افزار گمبیت در محیط انسیس^{۲۹} قابل مشاهده است. در شکل ۸ مدل هندسی شبکه‌بندی شده توسط مش‌های غیر ساختاری از طریق نرم‌افزار *Ansys Workbench 2016* نمایش داده شده است.

در این پژوهش به دلیل جریان گذرای سیال و همچنین اعمال حرکت چرخشی اطراف پایدارکننده و نازل‌ها و تأثیر حرکت این دو ناحیه بر نواحی اطراف، از روش مش لغزشی استفاده شده است. با توجه به پیچیدگی بالای مدل در مش زدن مدل از نرم‌افزار انسیس برای این امر استفاده شد. استقلال مش‌ها از طریق مقایسه نتیجه سه مش مختلف به دست آمد. در جدول

²⁸ Gambit
²⁹ ANSYS

جدول ۳. شرایط مرزی تعریف شده برای بخش های مختلف مدل	
نوع شرط مرزی	مرزهای تعریف شده
Velocity-Inlet	سطح مقطع انتهایی نازل ها
Pressure-Outlet	خروجی فضای حلقوی
Mass-Flow-Inlet	ورودی کنده ها به سیستم
Wall	دیواره فضای حلقوی و رشته داخلی



شکل ۸. مش غیر ساختاری در ناحیه پایدارکننده و نازل های سرمته

روش های گسسته سازی معادلات و الگوریتم حل توأم سرعت و فشار در این شبیه سازی ها، در جدول ۴ نشان داده شده است. جهت شروع فرآیند، با فرض حضور آب در تمام فضای دالیزی، مقدار ۵۰۰ گرم از کنده با مشخصات جدول ۵ در محل سرمته، جاگذاری شد و فرآیند تزریق سیال از طریق نازل ها شبیه سازی شد.

۲.۲ اعتبارسنجی و تعیین مش بهینه

یک مدل در صورتی که نتایج معتبری را ارائه نماید، می تواند برای مطالعات آتی مؤثر و مفید باشد. لذا برای انتخاب مش بهینه تستی را در حالت قائم و با فرض فاصله ۸ سانتی متری پایدارکننده و سرمته با سه مش با اندازه مختلف شبیه سازی شد. نتایج پیش بینی شده توسط سه مش با اندازه های ذکر شده در شکل ۱۰ مورد مقایسه قرار گرفت. همان گونه که در شکل ۱۰، نشان داده شده است، رفتار سه مش منتخب تقریباً به یک گونه بوده است و در نتیجه کوچک ترین آن ها یعنی مش A511، به عنوان معیار انتخاب شد. بعد از انتخاب مش بهینه، جهت اعتبارسنجی مدل، بین داده های تجربی و شبیه سازی شده، مقایسه ای انجام شد (شکل ۱۱).

جدول ۲. مشخصات مش های تولید شده برای بررسی استقلال مش ها جهت تعیین مش بهینه

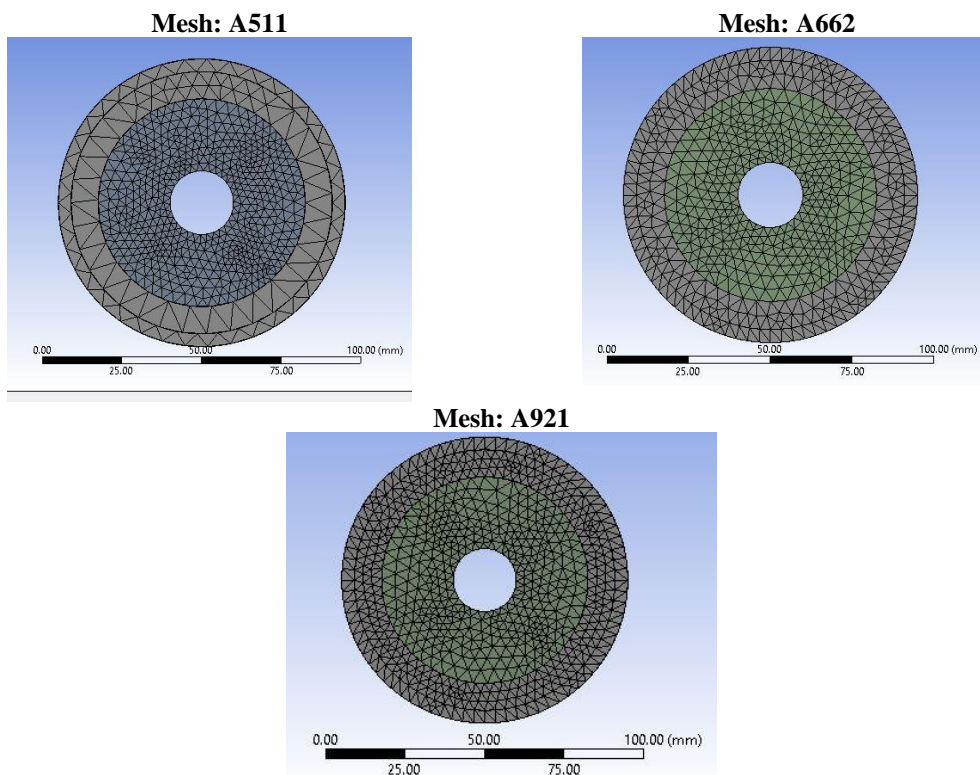
نام مش	Mesh Element Num	Max Aspect Ratio	Max Ortho Skew	Min Orthogonal Quality
A511	۵۱۱۸۷۵	۱۹/۸۷	۰/۷۷۱	۰/۱۵۴
A662	۶۶۲۶۶۶	۲۴/۱۰	۰/۸۱۱۰	۰/۱۲۵
A941	۹۴۱۳۲۹	۲۰/۴۰	۰/۸۱۳	۰/۱۵۰

سطح مقطع انتهایی سه مش مورد نظر در شکل ۹ نشان داده شده است.

از آنجا که در این پژوهش حرکت توده ای ذرات جامد در سیال مدنظر است، از رویکرد اوپلری-اوپلری برای مدل کردن جریان دو فاز پیوسته جامد-مایع استفاده شده است. برای مدل سازی فاز جامد از روش دانه ای^{۳۰} استفاده شده است. قطر متوسط کنده های کروی در مدل، ۱۰ میلی متر در نظر گرفته شد. در این گونه از مسائل، فاز جامد به صورت یک مایع با

ویسکوزیته ای بسیار بالا فرض می شود به گونه ای که سایر خواصش برابر با همان فاز جامد در نظر گرفته خواهد شد. در این شبیه سازی ها، دو ناحیه اطراف پایدارکننده و نازل ها با سرعت ۱۱۰ دور در دقیقه در حال چرخش در نظر گرفته شدند. دیواره فضای حلقوی بدون حرکت در نظر گرفته شد. در جدول ۳ شرایط مرزی بخش های مختلف مدل با توجه به داده های مسئله ارائه شده است.

³⁰ Granular



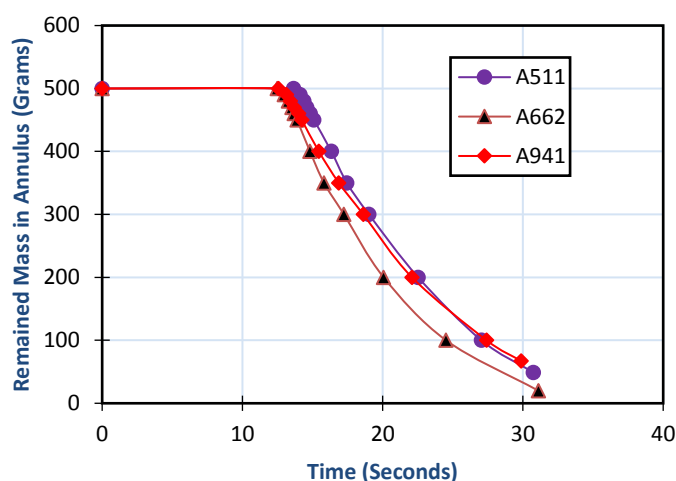
شکل ۹. انواع مش‌های مورد بررسی در نرم‌افزار ANSYS Work Bench

جدول ۴. روش‌ها گسسته سازی معادلات مختلف و الگوریتم حل توأم سرعت-فشار مورد استفاده در مدل

<i>Pressure-Velocity Coupling</i>	<i>Simple</i>	<i>Reference</i>
<i>Gradient</i>	<i>Last Squares Cell Based</i>	<i>(Han, Woo & Kim, 2016)</i>
<i>Momentum</i>	<i>First Order Upwind</i>	<i>(Vieira Neto, Martins, Ataide & Barrozo, 2012)</i>
<i>Volume Fraction</i>	<i>Quick</i>	
<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>Quick</i>	<i>(Xiaofeng, Tie, Wei & Yanze, 2013)</i>
<i>Turbulent Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>	
<i>Transient Formulation</i>	<i>First Order Implicit</i>	

جدول ۵. فرضیات روش Granular برای مدل‌سازی فاز جامد

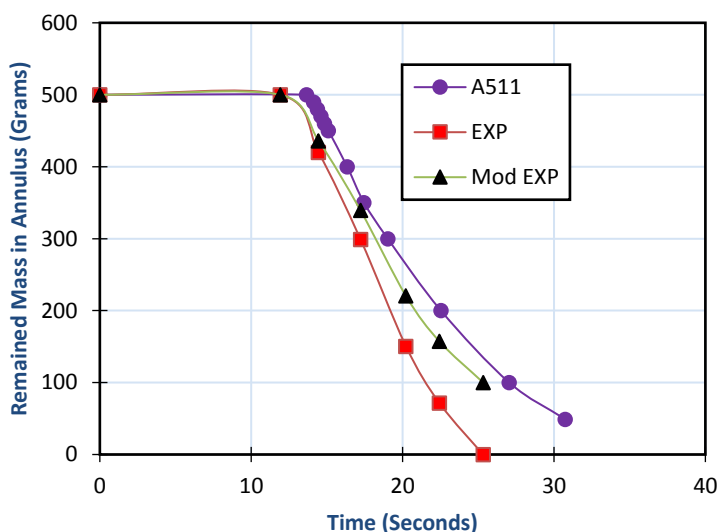
متغیرها	فرضیات	References
Type	Carbonate With 100 kg/kmol Molecular Weight	
Density	2800 kg/m ³	(Dehvedar, Moarefvand & Kiyani, 2019)
Mean Diameter(m)	0.001	
Granular Viscosity(kg/m-s)	Gidaspow	(Kamyab & Rasouli, 2016)
Granular Temperature (m ² s ²)	Algebraic Based on Phase Property	(Dehvedar, Moarefvand & Kiyani, 2019)
Solid Pressure (Paskal)	Lun et al	(Cornelissen et al, 2007)
Frictional Pressure	Based On KTGF	
Frictional Viscosity	Schaeffer	(Cornelissen et al, 2007)
Bulk Viscosity	Lun et al	
Angle Of Integral Friction(deg)	30	
Radial Distribution	Lun et al	(Cornelissen et al, 2007)
Packing Limit	0.63	(Huang, 2011)
Lift	Saffman-mei	(Dehvedar & Moarefvand, 2019)
Drag	Schiller-Neumann	(Riera, Zeppieri & Derjani-Bayeh, 2014)
Turbulent Dispersion	Lopez-De Bertodano	(Tripathy et al, 2017)
Restitution Coefficient	0.9	(Zhang et al, 2012)



شکل ۱۰. رفتار مش‌های کاندید جهت پیش‌بینی جرم باقیمانده در فضای دالیزی در طول زمان

شرایط مدل می توان علت خطا را در آن ها جستجو نمود. شکل کنده ها در مدل به صورت کروی است ولی در آزمایشگاه، به صورت ذرات لبه دار است. ضریب اصطکاک در مدل با لوله پلکسی آزمایشگاه متفاوت است. بخش دیگری از این خطا نیز در باقی ماندن مقداری از کنده ها در محل های اتصال دستگاه است که قابل چشم پوشی نیست اگر به فرض ۲۰ درصد کنده های خروجی را بنا به علل مذکور اندازه گیری نشود و این مقدار خطا به صورت اصلاح شده به داده های نمودار تجربی خود اضافه شود، نمودار داده های اصلاح شده به خوبی ترندی مشابه با اعداد مدل را ارائه خواهد نمود که نشان می دهد فرضیات اعمالی بر مدل تا اندازه ای درست انتخاب شده اند.

درصد تمیزکاری چاه، از اندازه گیری حجم کنده خروجی در بازه های معین زمانی، استحصال شده است. به این صورت که جرم خروجی به جرم اولیه قرار داده شده در داخل فللولوپ به عنوان درصد تمیزکاری چاه گزارش شده است. در نمودارهای موجود در این مقاله جرم باقیمانده در فضای دالیزی از طریق تفریق جرم خارج شده از فضای دالیزی از جرم اولیه قرار گرفته در آن حاصل شده اند. این میزان همان گونه که در نمودار بالا نشان داده شده بین داده های آزمایشگاه و داده های منتج شده از مدل خطا وجود دارد. علت خطای حاصله را می توان در موارد متعددی جویا شد. آنچه در ابتدای امر به ذهن می رسد غلط بودن فرضیات در نظر گرفته شده در مدل است که البته با توجه به پاره های از تفاوت های موجود بین شرایط آزمایشگاهی و



شکل ۱۱. مقایسه نتایج مش منتخب، داده های تجربی و داده های تصحیح شده

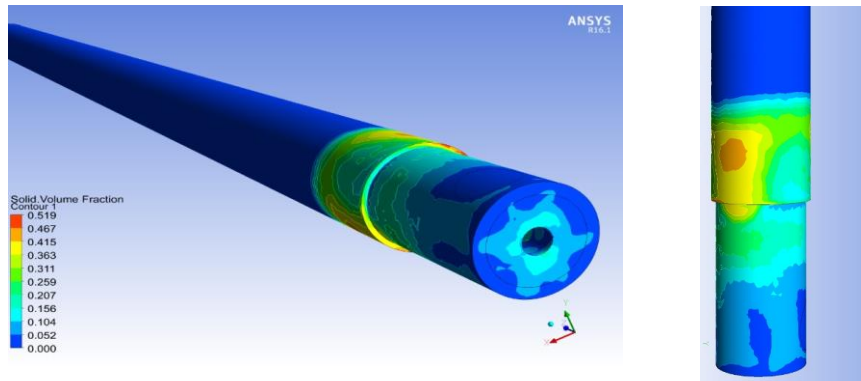
توسط جریان خروجی از نازل ها، کنده ها به سرعت به سمت خروجی حرکت می کنند. کنده ها در این زمان هنوز به پایدارکننده نرسیده اند. به دلیل چرخش نازل های سرمته حفاری و همچنین حضور پایدارکننده در مسیر جریان، کنده ها در فاصله بین سرمته و پایدارکننده در بخش هایی از فضای حلقوی تشکیل توده داده و به سمت خروجی حرکت می کنند. به دلیل ایجاد نیروی گریز از مرکز به دلیل چرخش سرمته، مقداری از کنده ها به سمت دیواره پرتاب شده و در این نواحی تجمع می یابند. در فاصله بین انتهای فضای حلقوی تا فاصله کمی بالاتر از

۳. بحث و نتیجه گیری

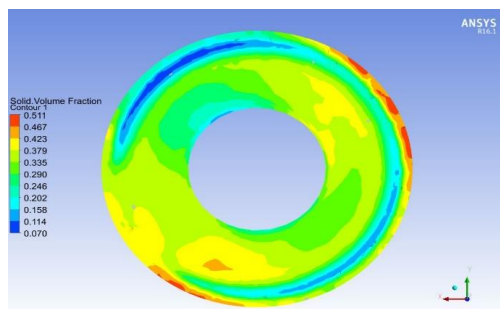
بحث به روی نتایج حاصل از شبیه سازی در فضای فلوئنت با چشم پوشی از خطای پیش بینی، با استخراج کانتورهای مختلف از مدل شبیه سازی شده، می توان رفتار جریان سیال و کنده های حفاری را در مدل تعریف شده مشاهده و تحلیل نمود. شکل ۱۲ کسر حجمی کنده های حفاری درون فضای حلقوی در زمان ۰/۲۲ ثانیه پس از شروع تزریق سیال را نشان می دهد. بنا به شکل ۱۲، در زمان های اولیه جریان، به دلیل آشفتنگی ایجاد شده

ایجاد شده که در نتیجه آن سرعت جریان سیال و کنده‌ها افزایش خواهد یافت. این امر سبب بهبود انتقال کنده‌ها توسط سیال به سمت خروجی خواهد شد. در شکل ۱۴ خطوط جریانی سیال در ۴ زمان معین بعد از شروع جریان نشان داده شده است.

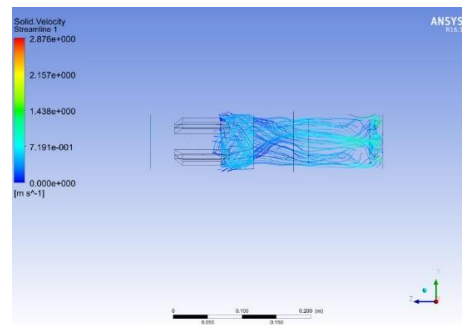
پایدارکننده، خطوط جریان به دلیل سیال آشفته خروجی از نازل‌ها و همچنین چرخش ناشی از پایدارکننده رفتاری غیرخطی و نامنظم از خود نشان می‌دهند؛ بنابراین در این ناحیه به‌ویژه در اطراف سرمته، سرعت حمل کنده‌ها نسبت به فواصل دورتر از انتهای چاه بیشتر خواهد بود. به دلیل چرخش و تلاطم ایجاد شده در توده کنده‌های تجمع یافته، آشفته‌گی مضاعفی



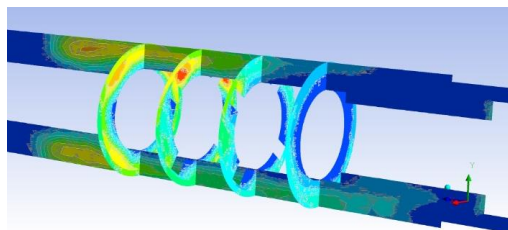
شکل ۱۲. کسر حجمی کنده‌های حفاری در فاصله بین سرمته و پایدارکننده در وضعیت *Near Bit* و در فضای حلقوی عمودی در زمان ۰/۲۲ ثانیه



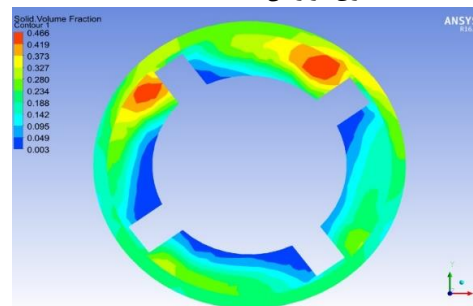
توزیع کسر حجمی کنده‌ها در اطراف رشته حفاری در زمان ۰/۲۲ ثانیه



خطوط جریان در فاصله بین انتهای چاه و پایدارکننده حفاری در زمان ۰/۲۲ ثانیه







کانتور کسر حجمی کنده‌ها در نواحی اطراف پایدارکننده و در ۴ سطح مقطع عرضی مختلف در زمان ۱ ثانیه



کسر حجمی کنده‌های حفاری در اطراف تیغه‌های پایدارکننده در زمان ۱ ثانیه

شکل ۱۳. خطوط جریان و کسر حجمی در ۰.۲۲ ثانیه و ۱ ثانیه پس از شروع تزریق سیال از طریق نازل‌ها

پروفایل خطوط جریانی سیال	زمان (بعد از شروع پمپاژ سیال)
	۰/۲۲ ثانیه
	۱ ثانیه
	۴/۳۵ ثانیه
	۲۲/۴۸ ثانیه

شکل ۱۴. خطوط جریانی سیال در زمان‌های مشخص بعد از شروع پمپاژ سیال حفاری

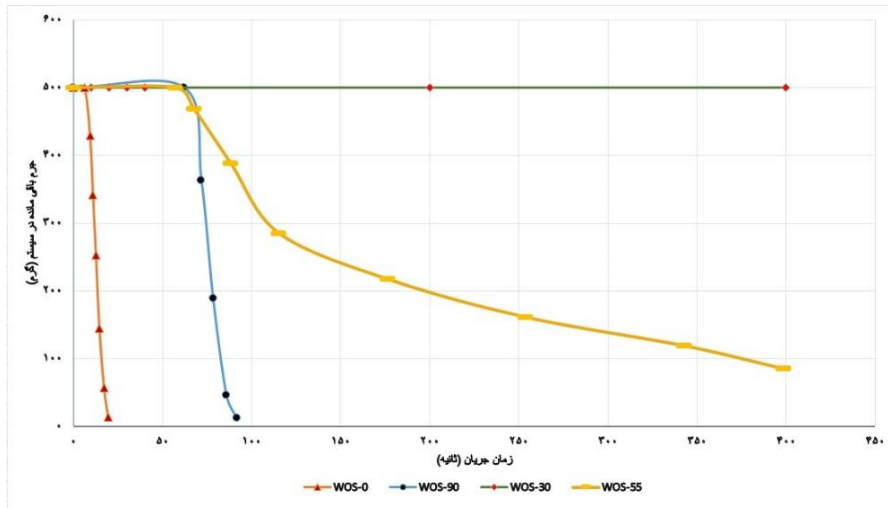
(پایدارکننده در فاصله ۸ سانتی متری از انتهای سرمته) در طول رشته و وضعیت *Far From Bit* (پایدارکننده در فاصله ۹۵ سانتی متری از انتهای سرمته) در چهار زاویه صفر، ۳۰، ۵۵ و ۹۰ درجه صورت پذیرفت. شکل‌های ۱۵ به بررسی تمیزکاری چاه در عدم حضور پایدارکننده پرداخته است. قبل از آن که پایدارکننده را در طول رشته حفاری نصب کنیم، ۴ تست تحت زوایای مذکور و در شرایط بدون حضور پایدارکننده انجام شد و مقدار جرم باقی مانده در بازه‌های زمانی مختلف اندازه‌گیری شد. در این تست‌ها، نرخ جریانی سیال ثابت و برابر ۲۲/۸۴ گالن بر دقیقه (حداکثر مقدار فراهم شده توسط پمپ موجود در آزمایشگاه)، دور چرخش رشته حفاری در تمام شرایط ثابت و برابر ۱۱۰ *rpm* و مقدار کنده‌های حفاری موجود در سیستم در تمامی زوایا ۵۰۰ گرم و دارای قطرهای مشابه در نظر گرفته شده است (شکل ۱۵).

چرخش و تلاطم ایجاد شده در توده کنده‌های تجمع یافته، آشفتگی مضاعفی ایجاد شده که در نتیجه آن سرعت جریان سیال و کنده‌ها افزایش خواهد یافت. این امر سبب بهبود انتقال کنده‌ها توسط سیال به سمت خروجی خواهد شد. زمانی که کنده‌ها به اطراف تیغه‌های پایدارکننده می‌رسند، بیشتر در فاصله بین تیغه‌ها و در جهت چرخش پایدارکننده تجمع یافته و با سرعت چرخشی پایدارکننده، به دور رشته حفاری شروع به چرخش می‌کنند. این امر سبب افزایش سرعت محوری کنده‌ها و در نتیجه بهبود تمیز سازی خواهد شد. خطوط جریان در فاصله نزدیک به پایدارکننده فشرده‌تر بوده و آشفتگی بیشتر است؛ بنابراین در این نواحی سرعت حرکت سیال بیشتر خواهد بود. با ادامه جریان کنده‌ها در طول رشته حفاری، به دلیل فاصله گرفتن جریان کنده‌ها از انتهای چاه و پایدارکننده، از سرعت جریان کاسته شده و تمایل کنده‌ها به سقوط روی دیواره چاه بیشتر می‌شود.

۴. ۱.۳ بحث به روی نتایج آزمایشگاهی

۱.۱.۳ تمیزکاری بدون حضور پایدارکننده

بررسی اثر زاویه انحراف چاه در سه حالت عدم حضور پایدارکننده در طول رشته حفاری، وضعیت *Near Bit*



شکل ۱۵. جرم باقی مانده در فضای دالیزی در هنگام عدم حضور پایدارکننده حفاری در طول رشته حفاری در زوایای انحراف منتخب

انباشته شده در لایه های نزدیک رشته حفاری و همچنین سرعت نسبی بالای کنده های حفاری و قدرت حمل کنده های بالای سیال و به دلیل آن که سرعت حد لازم برای جابه جایی کنده ها توسط نرخ جریان اعمالی سیال فراهم شده است، سیال بستر کنده ها را حرکت داده و به سمت خروجی هدایت می کند. به عبارت دیگر در حالت افقی فضای حلقوی، به دلیل آن که نیروهای هیدروپنماتیکی شامل نیروی برآ و نیروی پسا به سرعت و در نتیجه نرخ جریانی سیال وابسته اند، به عنوان محرک بستر کنده ها به سمت خروجی عمل کرده و باعث خروج تمامی کنده ها از فضای حلقوی می شوند. در شرایط چاه افقی، کنده ها با فاصله زمانی تقریباً ۵۰ ثانیه ای نسبت به حالت عمودی چاه، شروع به خروج از فضای حلقوی کرده و با شبیهی مشابه، تمامی کنده ها از سیستم خارج می شود.

در زاویه ۵۵ درجه مشاهده شد که بستر کنده ها، تشکیل شده و ارتفاع گرفتن این بستر، لایه های بالایی کنده ها با رشته حفاری در حال چرخش تماس یافته و از سطح کنده ها جدا می شود و توسط افزایش سرعت محوری، کنده ها شروع به خروج از فضای حلقوی می کنند. همچنین در این زاویه مشاهده شد که در فاصله ۹۵ سانتی متری از انتهای سرتمه این بستر کنده ها شروع به حرکت به سمت پایین فضای حلقوی می کنند. به عبارت دیگر در این زاویه، در فاصله های دور از انتهای سرتمه، به دلیل

در حالت کاملاً عمودی فضای حلقوی به دلیل غلبه نیروهای پسا و نیروی شناوری بر نیروی وزن کنده ها و همچنین مقدار بالای سرعت نسبی کنده های حفاری و قدرت حمل کنده های بالای سیال و همچنین کمک به حرکت محوری کنده ها توسط چرخش رشته حفاری، بهترین حالت برای تمیز سازی چاه در شرایطی که پایدارکننده حفاری بر روی رشته حفاری نصب نباشد به دست خواهد آمد. به علاوه در این وضعیت، کنده ها فرصت ایجاد بستر بر روی دیواره فضای حلقوی را نخواهند داشت؛ بنابراین در این وضعیت کنده ها با پراکندگی بیشتری در سیال حفاری شناور بوده و راحت تر به سمت خروجی حرکت می کنند. دلیلی که سبب می شود نیروهای شناوری و نیروی پسا بر نیروی وزن کنده ها غلبه کند قطر میانگین کم کنده ها است. از این نمودار می توان متوجه شد که مدت زمان بسیار کمی طول خواهد کشید که جبهه اولیه کنده ها به سمت خروجی حرکت کرده و از سیستم خارج شوند.

در فضای حلقوی افقی، تمامی کنده ها از سیستم خارج خواهد شد اما نسبت به حالت عمودی فضای حلقوی، سرعت جابه جایی کنده ها به سمت خروجی کمتر خواهد بود. در این وضعیت، نیروی وزن کنده ها باعث ایجاد تشکیل بستر کنده ها در قسمت پایینی دیواره فضای حلقوی می شود اما به دلیل چرخش رشته حفاری و کمک به جابه جایی کنده های

در حالت بدون حضور پایدارکننده در زوایای مختلف، بهترین تمیز سازی در زاویه عمودی فضای حلقوی و بدترین میزان تمیز سازی در زاویه ۳۰ درجه اتفاق خواهد افتاد. در زاویه ۳۰ درجه کنده‌ها از محیط خارج نشده و تمامی جرم ورودی به سیستم در فضای حلقوی باقی خواهند ماند. همچنین در زاویه ۵۵ درجه بستر کنده‌ها تشکیل شده و در این زاویه کنده‌ها شروع به لغزش به سمت پایین می‌کنند اما با گذشت زمان این بستر به سمت خروجی حرکت کرده و از سیستم خارج می‌شود اما باز هم مقداری کنده در انتهای آزمایش در فضای حلقوی به صورت بستری با ارتفاع کم باقی خواهد ماند.

۲.۱.۳ تمیزکاری در حضور پایدارکننده‌ی نزدیک به

سرمرته

در زاویه عمودی فضای حلقوی، علاوه بر ایجاد جریان آشفته در انتهای فضای حلقوی توسط جریان خروجی از نازل‌ها، قبل از آن که جریان به حالت آرام تبدیل شود، چرخش تیغه‌های پایدارکننده و برخورد آن‌ها با کنده‌ها باعث ایجاد تلاطم و آشفستگی مجدد در جریان می‌شود و یک نیروی محرکه مضاعفی به کنده‌ها در جهت محوری اعمال می‌کند. این نیروی محرکه مضاعف باعث هل دادن بیشتر کنده‌ها به سمت خروجی می‌شود و در نتیجه تمیز سازی چاه اندکی بهبود می‌یابد.

در زاویه انحراف ۳۰ درجه، حضور پایدارکننده حفاری در نزدیک سرمرته، اثر قلیل توجهی بر خروج کنده‌های حفاری و در نتیجه تمیز سازی چاه خواهد داشت. به دلیل آن که در این زاویه کنده‌های حفاری تشکیل بستر نمی‌دهند و به صورت توده‌ای در اطراف رشته حفاری به سمت بالا و پایین در حرکت‌اند، جریان متلاطم و آشفته ایجاد شده توسط چرخش تیغه پایدارکننده باعث می‌شود که سرعت حرکت جریان بالا رفته و در نتیجه به توده کنده‌های معلق در چاه کمک می‌کند تا به سمت خروجی حرکت کنند. با افزایش آشفستگی و در نتیجه افزایش سرعت جریان، نیروی پسا افزایش یافته و بر مؤلفه خلاف جهت جریان نیروی وزن (F_{ga}) غلبه می‌کند؛ بنابراین جریان سیال کنده‌ها را به خوبی هل داده و جبهه سیال، کنده‌ها را از محیط چاه خارج می‌کند.

در حالت افقی فضای حلقوی، به دلیل غلبه نیروی وزن کنده‌ها بر نیروی شناوری، بستر کنده‌ها در طول رشته حفاری و بر روی دیواره پایینی چاه تشکیل می‌شود. در بخش انتهایی فضای حلقوی به دلیل آشفستگی جریان، کنده‌ها به سرعت از

رسیدن جریان از حالت آشفته به جریان آرام و کاهش نیروی برآ و در نتیجه غلبه نیروی وزن کنده‌ها بر نیروی پسا، هم جهت با جریان و نیروی شناوری، بستر کنده‌ها تشکیل شده و شروع به حرکت به سمت پایین فضای حلقوی می‌کنند.

باید ذکر شود که در زاویه ۵۵ درجه، به دلیل کاهش سطح مقطع عبوری جریان سیال، مقداری از کنده‌ها توسط جریان سیال بر روی بستر کنده‌ها لغزیده و به سمت بالا حرکت می‌کنند اما در مقابل مقداری از کنده‌ها در زیر بستر به سمت پایین حرکت کرده و این روند بارها و بارها اتفاق می‌افتد؛ بنابراین در زاویه ۵۵ درجه مشاهده شد که پس از گذشتن مدت زمان ۳۹۸/۸ ثانیه، به مقدار ۸۴/۷۵ گرم از کنده‌ها درون فضای حلقوی باقی مانده و تشکیل یک بستر پایدار می‌دهند. همان گونه که از نمودار مربوط به زاویه ۵۵ درجه قابل مشاهده است، در ثانیه ۱۱۵، شیب نمودار شروع به کم شدن کرده و مقدار کنده‌های باقی مانده در سیستم به یک مقدار ثابت نزدیک می‌شود. به عبارت دیگر در این ثانیه، به دلیل فاصله گرفتن کنده‌ها از جریان آشفته حاصل از جت نازل‌ها، قابلیت حمل کنده‌های سیال کاهش یافته و زمان بسیار بیشتری برای انتقال کنده‌ها به خارج از محیط چاه نیاز است.

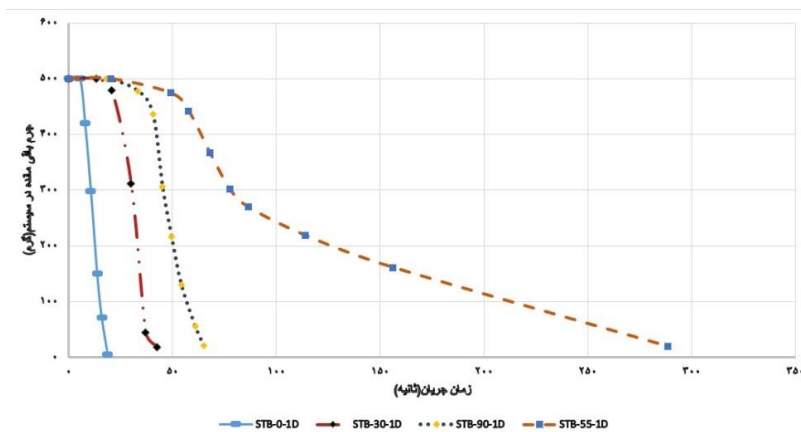
بر اساس نمودار به دست آمده، زاویه انحراف ۳۰ درجه بدترین وضعیت تمیز سازی چاه را به همراه خواهد داشت. در این زاویه مشاهده می‌شود که توده‌ای از کنده‌ها حول رشته حفاری تشکیل می‌شود که دلیل آن غلبه نیروهای شناوری و برآ بر مؤلفه عمودی نیروی وزن کنده‌ها است. به عبارت دیگر در این زاویه به دلیل آشفستگی جریان، نیروی برآ زیاد بوده و از تشکیل بستر کنده‌ها جلوگیری می‌کند و در نتیجه کنده‌ها در اطراف رشته حفاری به طور پیوسته می‌چرخند. همچنین در فاصله ۸۰ تا ۱۷۰ سانتی متری از انتهای سرمرته، به دلیل آن که نیروی پسا، هم جهت با جریان با مؤلفه خلاف جهت جریان نیروی وزن کنده‌ها برابر می‌شود، کنده‌ها به صورت متناوب به سمت بالا و پایین فضای حلقوی حرکت می‌کنند و در نتیجه کنده‌ها در این فاصله به دام افتاده و هیچ کنده‌ای از سیستم خارج نمی‌شود. حتی پس از گذشت مدت زمان زیاد، کنده‌ها قادر به حرکت به سمت خروجی نبوده و تمامی جرم ورودی به فضای حلقوی در سیستم باقی می‌ماند.

بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده

در زاویه ۵۵ درجه، بستر کنده‌ها پس از حرکت توسط جریان آشفته ایجادشده توسط نازل‌ها، از پایدارکننده حفاری عبور کرده و به سمت خروجی حرکت می‌کند. در لحظه رسیدن بستر کنده‌ها به پایدارکننده، در اثر چرخش تیغه‌ها، بستر کنده‌ها از بین رفته و تا فاصله کمی پس از پایدارکننده به حالت نیمه پراکنده در اطراف رشته حفاری به گردش درمی‌آید. پس‌ازاین که فاصله بستر کنده‌ها از پایدارکننده بیشتر شد، در فاصله ۱۱۵ سانتی‌متری از انتهای چاه، بستر کنده‌ها مجدداً ایجادشده و پس از گذشت زمانی اندک، این بستر پایدار خواهد شد. در نتیجه جبهه سیال آشفته ایجادشده توسط پایدارکننده اثربخشی لازم را برای حرکت بستر ایجادشده نخواهد داشت. در نتیجه از سرعت جابه‌جایی کنده‌ها کاسته شده اما در نهایت پس از گذشت مدت‌زمان بیشتری نسبت به سه حالت قبل (زاویه انحراف ۳۰ درجه، حالت افقی و حالت عمودی چاه)، تمامی کنده‌ها از فضای حلقوی خارج خواهند شد. (شکل ۱۶) با قرارگیری پایدارکننده در نزدیکی سرمته، تمامی کنده‌ها در تمامی زوایای منتخب خارج شدند. می‌توان نتیجه گرفت حضور پایدارکننده حفاری در نزدیک سرمته اثر مثبتی بر روی انتقال کنده‌ها و در نتیجه تمیز سازی چاه خواهد داشت. این بهبودی در زاویه ۳۰ درجه مشهودتر بود.

انتهای چاه فاصله گرفته و بلافاصله توسط پایدارکننده حفاری یک حرکت محوری را طی کرده و سپس توسط یک جبهه سیال به سمت خروجی حرکت می‌کند. به محض این که کنده‌ها با تیغه‌های پایدارکننده برخورد می‌کنند آشفته‌گی جریان بیشتر شده و حرکت تیغه‌ها، بستر کنده‌ها را پراکنده کرده و در نتیجه افزایش سرعت سیال، نیروی پسا افزایش یافته و باعث بهبود حرکت بستر کنده‌ها در طول مسیر چاه خواهد شد. کنده‌های حفاری پس از گذشت مدت‌زمان بیشتری نسبت به زوایای ۳۰ درجه و حالت چاه قائم به خروجی رسیده و تماماً از سیستم خارج می‌شوند. هر چه بستر کنده‌ها از پایدارکننده فاصله می‌گیرد، پایداری آن بیشتر شده و زمان بیشتری طول می‌کشد تا یک مسیر معین را نسبت به زمانی که در نزدیکی پایدارکننده قرار دارد طی کند؛ بنابراین شیب نمودار حاصل در زمان‌هایی که بستر از پایدارکننده فاصله گرفته لندگی کاهش یافته تا در نهایت تمامی کنده‌ها از سیستم خارج شوند.

تمیز سازی چاه افقی نسبت به چاه با زاویه انحراف ۳۰ درجه در حالتی که پایدارکننده حفاری در نزدیکی سرمته نصب شده باشد، دشوارتر صورت می‌گیرد. دلیل این امر نیز آن است که در زاویه ۳۰ درجه کنده‌ها، به همان دلایل گفته‌شده در قسمت‌های قبل به حلت معلق دور رشته حفاری در حال چرخش‌اند. در حالی که در حالت افقی بستر کنده‌ها تشکیل شده و در نتیجه جابه‌جایی و انتقال کنده‌ها را دشوارتر می‌کند.



شکل ۱۶. جرم باقی‌مانده در فضای دالیزی در حالت پایدارکننده نزدیک به سرمته در زوایای انحراف منتخب

تقریباً زمان رسیدن اولین کنده‌ها به خروجی دستگاه در زوایای مختلف یکسان است (شکل ۱۷). پس‌از آن که بستر کنده‌ها به پایدارکننده حفاری می‌رسد، در اثر چرخش تیغه‌ها اندکی

۳.۱.۳ تمیزکاری در حالت پایدارکننده دور از سرمته

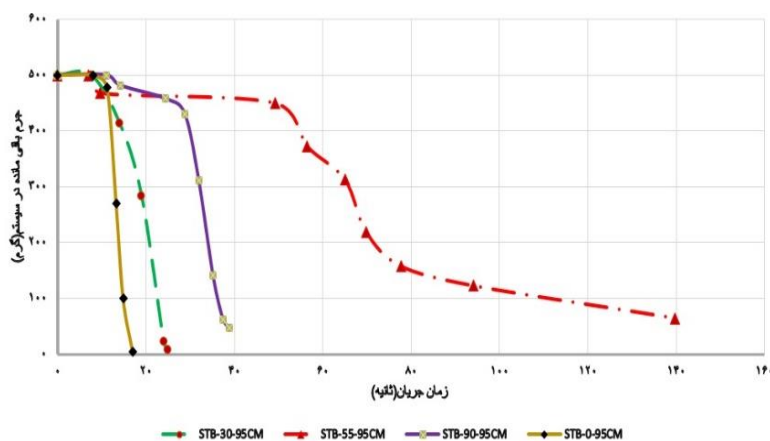
به سرعت به سمت خروجی حرکت کرده و از محیط چاه خارج می‌شوند. این رفتار توسط دو ناحیه با شیب قائم در نمودار خود را نشان می‌دهد. پس از تشکیل بستر جدید کنده‌ها تا یک مدت زمان مشخصی، مقدار جرم خروجی کنده‌ها تقریباً صفر است. در نهایت پس از آن که ارتفاع بستر کنده‌ها به مقدار زیادی کاهش یافت، بستر کنده‌های باقی‌مانده به آرامی به سمت خروجی حرکت می‌کند. در نتیجه شیب نمودار کاهش یافته و بازه زمانی لازم افزایش می‌یابد. مقدار کمی از کنده‌ها در طول آزمایش در زیر پایدارکننده بستر قدیمی را حفظ کرده و از سیستم خارج نخواهد شد به همین دلیل در نمودار مربوط به زاویه ۵۵ درجه، مقدار جرم باقی‌مانده در سیستم بیشتر از سایر زوایا خواهد بود.

همان‌گونه که در شکل ۱۹ نشان داده شده، قرارگیری پایدارکننده در دو فاصله مذکور، زمان‌هایی متفاوت را موجب خواهد شد. به‌علاوه زاویه قائم در سایر موارد، فاصله ۹۵ سانتی‌متری بهترین نتایج را در زمان تمیزکاری ارائه داده است. حضور پایدارکننده در حالت عمودی از شدت عمل نیروی برآ خواهد کاست و با اعمال نیروی گریز از مرکز و هدایت کنده‌ها به سمت دیواره، عملاً موجب افزایش زمان تمیزکاری خواهد شد. همان‌گونه که دیده می‌شود در هر دو حالت شکل منحنی‌ها به هم شباهت داشته و تنها تفاوت آن‌ها، در کشیدگی در طول زمان بوده است.

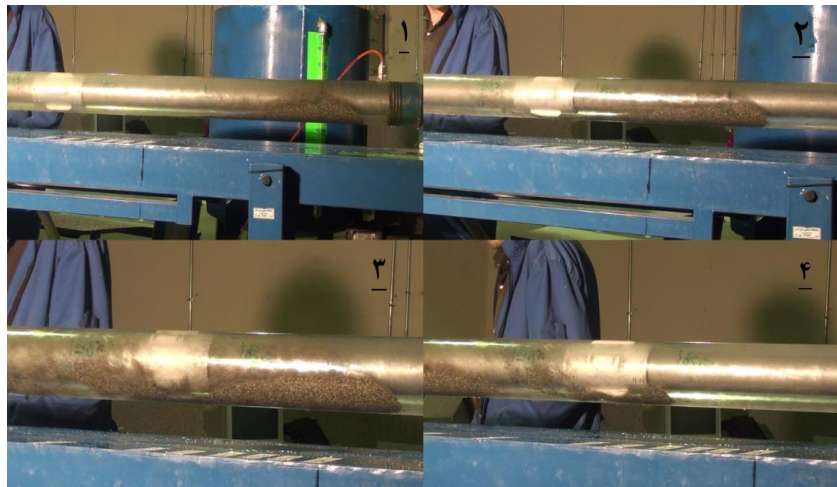
آشفته‌گی ایجاد می‌شود. در زاویه ۳۰ درجه، پس از آن که جبهه توده کنده‌ها به پایدارکننده می‌رسد، با توجه به آشفته‌گی ایجادشده توسط چرخش تیغه‌ها، نیروی پس‌آی هم‌جهت با جریان تقویت‌شده و از مقدار نیروی وزن پیشی می‌گیرد. این امر سبب هل دادن جبهه کنده‌ها توسط جریان آشفته ایجادشده به سمت خروجی کنده‌ها می‌شود. در این زاویه همانند حالت عمودی چاه، بستری از کنده‌ها تشکیل نمی‌شود بنابراین تمامی توده کنده به‌صورت پیوسته از پایدارکننده عبور کرده و از سیستم خارج می‌شوند.

در زاویه ۹۰ درجه، کنده‌ها در ابتدای مسیر، تحت تأثیر آشفته‌گی ایجادشده توسط نازل‌ها قرار گرفته و تا فاصله کمی بالاتر از سرتمه (۹ سانتی‌متری) با سرعت زیادی منتقل می‌شوند ولی بعد از آن، بستر کنده‌ها روی دیواره پایینی فضای حلقوی تشکیل می‌شود. برخورد توده کنده با تیغه‌ها موجب آشفته‌گی شده و با افزایش سرعت محوری بر سرعت آن‌ها به سمت خروج افزوده می‌شود (شکل ۱۸).

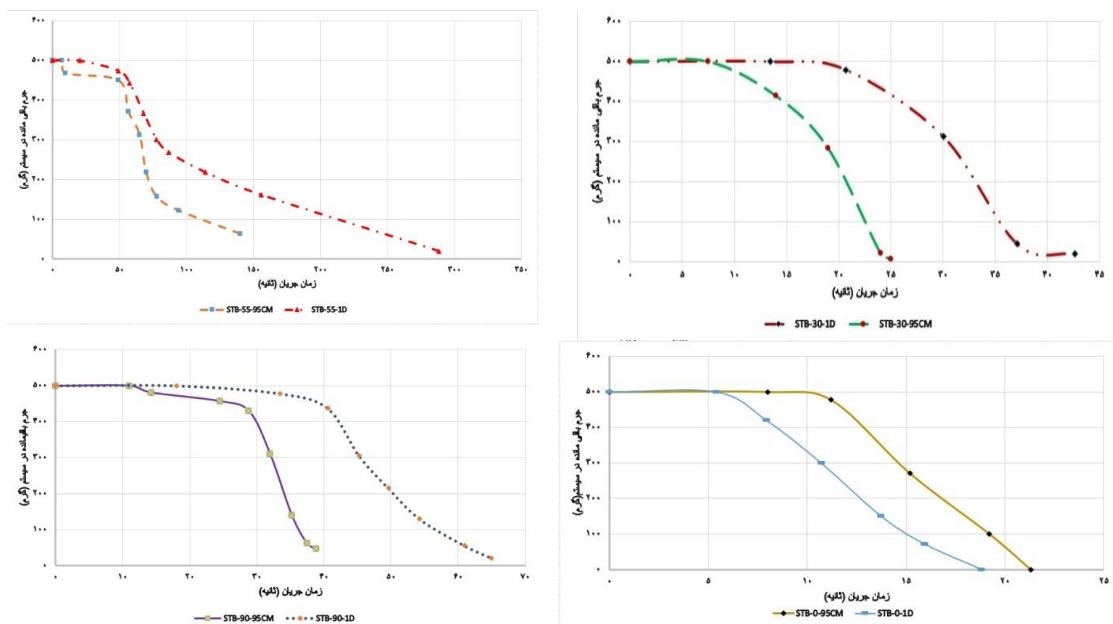
در زاویه ۵۵ درجه، کنده‌ها در فضای حلقوی نسبت به زوایای دیگر رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در این زاویه همانند زاویه ۹۰ درجه، بستر کنده‌ها در قسمت پایینی دیواره چاه تشکیل می‌شود. به دلیل حرکت رو به پایین بستر جدید کنده‌ها، به مرور زمان ارتفاع بستر در قسمت عقبی بستر افزایش و کنده‌های موجود در بالای بستر با رشته حفاری تماس یافته و در نتیجه به دلیل افزایش نیروی برآ از سطح بستر جدا می‌شوند. این کنده‌ها توسط آشفته‌گی ناشی از پایدارکننده



شکل ۱۷. جرم باقی‌مانده در فضای دالیزی در حالت پایدارکننده دور از سرتمه در زوایای انحراف منتخب



شکل ۱۸. نحوه حرکت توده کنده‌ها در حالت پایدارکننده دور از سرمته در زمان‌های ۳، ۱۱، ۱۵ و ۲۱ ثانیه در زاویه ۹۰ درجه



شکل ۱۹. مقایسه‌ای بین نتایج خروج کنده در دو فاصله ID یعنی ۹ سانتی‌متری سرمته با ۹۵ سانتی‌متری سرمته در زوایای مختلف

بررسی شود. بعد از انجام تست‌های آزمایشگاهی و انجام مراحل ساخت مدل شبیه‌ساز نتایج ذیل حاصل شد:

- بامطالعه خطوط جریانی در مدل شبیه‌سازی شده، نقش پایدارکننده‌ها در تشویش جریان به‌خوبی دیده شد.

۴. نتایج

هرچند وظیفه اصلی پایدارکننده‌ها را باید در مباحث زاویه سازی، حفظ زاویه و زاویه اندازی جستجو نمود ولی در این مقاله تلاش شد تا نقش پایدارکننده در تمیزکاری فضای دالیزی

- حضور پایدارکننده می تواند تمیزکاری چاه را در تمام زوایا به خصوص در زوایای بحرانی بهبود دهد و مشکلات جانبی ناشی از تجمع کنده ها را کاهش دهد.
- با تغییر محل پایدارکننده زمان تمیزکاری چاه تغییر می کند با قرارگیری پایدارکننده در فاصله مناسب از سر مته بهترین زمان تمیزکاری در زوایای مشکل آفرین و بحرانی حاصل خواهد شد.

۵. مراجع

- Akhshik, S. Behzad, M. & Rajabi, M. (2015). CFD–DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 127, 229-244.
- Azar, J. J. & Sanchez, R. A. (1997, January). Important issues in cuttings transport for drilling directional wells. In *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.
- Bilgesu, H. I. Mishra, N. & Ameri, S. (2007, January). Understanding the effect of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics. In *Eastern Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers.
- Cornelissen, J. T. Taghipour, F. Escudié, R. Ellis, N. & Grace, J. R. (2007). CFD modelling of a liquid–solid fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 62(22), 6334-6348.
- Dehvedar, M. & Moarefvand, P. (2019). Detecting and drilling in critical inclination window in slant wells by means of a two phase liquid-solid CFD model and experimental study. *Kuwait Journal of Science*, 46(2).
- Dehvedar, M. Moarefvand, P. & Kiyani, A. R. (2019). A Liquid-Solid Two-phase Flow Computational Fluid Dynamic Modelling of the Operational Characteristics Effects on the Cleaning Time of a Circulating Flow Loop. *South African Journal of Chemistry*, 72, 67-79.
- 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.
- Egenti, N. B. (2014, August). Understanding drill-cuttings transportation in deviated and horizontal wells. In *SPE Nigeria annual international conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- GhasemiKafrudi, E. & Hashemabadi, S. H. (2016). Numerical study on cuttings transport in vertical wells with eccentric drillpipe. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 140, 85-96.
- 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.
- Han, S. M. Woo, N. S. & Kim, Y. J. (2016). A Study of the Particle Transport in the Non-Newtonian Fluid with Inclined Annulus. *Asia-pacific Journal of Modeling and Simulation for Mechanical System Design and Analysis*, 1(1), 23-28.
- Huang, X. (2011). CFD modeling of liquid–solid fluidization: Effect of drag correlation and added mass force. *Particuology*, 9(4), 441-445.

- Inglis, T. (2013). Directional drilling (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- Kamyab, M. & Rasouli, V. (2016). Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 29, 284-302.
- Li, J. & Walker, S. (2001). Sensitivity analysis of hole cleaning parameters in directional wells. *SPE Journal*, 6(04), 356-363.
- McCormick, J. E. Osorio, G. Andachi, J. H. & Barth, M. E. (2011, January). Adjustable gauge stabilizer and torque reduction tools reduce overall drilling times by 20%: a case study. In *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference*. Society of Petroleum Engineers. O'Bryan, P. L. & Huston, C. W. (1990, January). A study of the effects of bit gauge length and stabilizer placement on the build and drop tendencies of PDC bits. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Okrajni, S. & Azar, J. J. (1986). The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1(04), 297-308.
- Pastusek, P. E. (2018, March). Stabilizer Selection Based on Physics and Lessons Learned. In *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Radford, S. R. Jenkins, M. A. & Li, T. (2009, January). Novel concentric expandable stabilizer results in increased penetration rates and drilling efficiency with reduced vibration. In *SPE/IADC drilling conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Richard S. Carden, R. D. (2007). *Horizontal and Directional Drilling*. Tulsa, Oklahoma: Petroskills, LLC. AN OGCI Company.
- Riera, J. Zeppieri, S. & Derjani-Bayeh, S. (2014). Hydrodynamic study of a multiphase spouted column. *Fuel*, 138, 183-192.
- Smith. (1982). *Drillind Assembly Handbook*. Houston, Texas: DrilCo.
- TaheriShakib, J. Jalalifar, H. & Fatehirad, M. (2012). Design of Continuous Gauge Near-Bit Stabilizer, Using Optimized Hydraulics and Gauge Geometry in Mishan and Aghajari Formation. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 46(1), 31-39.
- Tri-Wave Drilling Tools Products- Integral Spiral Blade Stabilizer-
<http://www.triwaveusa.com/products6.html>
- Tripathy, A. Bagchi, S. Biswal, S. K. & Meikap, B. C. (2017). Study of particle hydrodynamics and misplacement in liquid–solid fluidized bed separator. *Chemical engineering research and design*, 117, 520-532.
- Uddin, H. Choudhury, N. R. & Ansari, U. (2016, May). A Computational Study of Packoff Using a Combined Drill Bit Stabilizer Particle Tracking Simulation. In *SPE Western Regional Meeting*. Society of Petroleum Engineers.
- Vieira Neto, J. L. Martins, A. L. Ataide, C. H. & Barrozo, M. A. (2012). Non-Newtonian Flows in Annuli with Variable Eccentric Motion of the Inner Tube. *Chemical engineering & technology*, 35(11), 1981-1988.
- Wiley, C. (1965, January). The Use of Near-bit Stabilizer-sub Assemblies for the Control of Hole Deviation. In *Drilling and Production Practice*. American Petroleum Institute.

Xiaofeng, S. Tie, Y. Wei, L. & Yanze, W. (2013). Study on Cuttings Transport Efficiency Affected by Stabilizer's Blade Shape in Vertical Wells. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 6(1).

Zhang, K. Wu, G. Brandani, S. Chen, H. & Yang, Y. (2012). CFD simulation of dynamic characteristics in liquid–solid fluidized beds. *Powder technology*, 227, 104-110.