

مروری بر پارامترهای اثر گذار در مطالعات تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی حمل کننده‌های حفاری در فضای دالیزی چاه

محسن ده‌ودار*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر • پرویز معارف‌وند، دانشگاه صنعتی امیرکبیر • محمد فضالی زاده، دانشگاه تربیت مدرس • مصطفی مروجی کشاورز، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

تقریباً بیست و پنج درصد زمان‌های انتظار ناخواسته در محل دکل‌های حفاری به دلیل مباحث تمیزکاری چاه است. با توجه به اهمیت این موضوع و محدودیت‌های موجود در محل چاه، در ایجاد انواع مشکلات عملیاتی، دستگاه‌های شبیه‌ساز فضای دالیزی در فضاهای دانشگاهی، رشد پیدا نمودند که توانایی مطالعه بر روی پارامترهای مؤثر بر حفاری، از قبیل پارامترهای مرتبط با فضای دالیزی، سیال حفاری، خواص کنده‌ها، خصوصیات سرمته، فشار و دما را برای پژوهشگران فراهم می‌آورند. پژوهشگران تاثیر این پارامترها بر میزان ارتفاع بستر، غلظت کنده‌ها در فضای دالیزی، میزان خروج کنده‌ها از دستگاه و یا حتی تغییرات افت فشار ایجاد شده مورد بررسی و در نهایت در قالب یک رابطه تجربی آن را ارائه نمودند. با رشد شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، مطالعات به سمت مقایسه نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی‌های دینامیک سیالات محاسباتی پیش رفت. فضای تست آزمایشگاه در نرم‌افزار کمیت بعد از رسم شدن و مشخص شدن شرایط مرزی، مشخص شده و در یک سیستم کامپیوتری مناسب آماده شبیه‌سازی خواهد شد. نوع گسسته‌سازی معادلات، تایم‌استپ و نحوه کوپل فشار-سرعت در معادلات مومنتوم و پیوستگی از دیگر موضوعات کار در این زمینه است. راهکارهای اوپلری-اوپلری و یا اوپلری لاگرانژی دو دیدگاه مهم در بررسی جریان‌های چندفازی هستند که در هر کدام فرضیاتی را باید اعمال نمود. در مطالعات حمل‌کننده در جریان‌های مایع-جامد، از نظریه سینتیک گازها برای جریان‌های دانه‌ای استفاده می‌شود که پارامترهای متعددی را شامل می‌گردد از قبیل دمای دانه‌ای، تانسورهای تنش کرنش برای فازهای جامد و مایع، فشار جامد، ویسکوزیته برشی جامد، تابع توزیع شعاعی، جرم مجازی و ضریب نفوذ دانه‌ای. در نهایت جهت اعتبارسنجی مدل و استقلال از کارهای تجربی، می‌باید نتایج ارائه شده توسط مدل با نتایج تجربی مقایسه شوند.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۳/۱۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۴/۲۸

واژگان کلیدی:

پارامترهای حفاری، فلو لوپ حفاری، دینامیک سیالات محاسباتی، حمل‌کننده، تمیزکاری چاه

مقدمه

را ایجاد خواهد نمود مانند ایجاد گشتاور اضافه، گیر مکانیکی، هرزروی، مشکلات در سیمان کاری، چاه‌پیمایی و کنترل چاه [۳-۴]. در ابتدا و از اوایل دهه چهل میلادی قرن بیستم مطالعات تجربی در زمینه حمل‌کننده‌های حفاری آغاز شد [۶]. از آنجایی که مطالعه پارامترهای اثر گذار بر حمل‌کننده‌ها در محل چاه امری خطرناک و هزینه‌بر بودند، مطالعات سرچاهی مباحث مرتبط با تمیزکاری چاه بسیار محدود بوده است و همین امر موجب شده که دستگاه‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی حمل‌کننده‌های حفاری در سرتاسر دنیا ساخته شوند و روز به روز بر تعداد آنها افزوده شود. لوپ‌های حفاری بسته به شرایط متفاوتی که در عملیات وجود دارد، ساخته می‌شوند [۷]. با این اتفاق عملاً دستگاه‌های آزمایشگاهی و بررسی پارامترهای تجربی در رأس امور قرار گرفتند. با رشد تجهیزات آزمایشگاهی، کم‌کم دستگاه‌های ابزار دقیق جای وسایل اندازه‌گیری سنتی را گرفتند و اندازه‌گیری میزان دبی

حمل‌کننده‌های حفاری به‌عنوان یکی از دغدغه‌های مهندسان نفت، سال‌هاست که به‌عنوان یکی از موضوعاتی است که مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته است. عملیات حفاری هزینه‌محور است و بسیاری از پارامترها به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر آن اثر گذار هستند. یک مطالعه که توسط شرکت آماکو صورت گرفته نشان می‌دهد که ۷۰ درصد از زمان‌های انتظاری که به‌صورت ناخواسته رخ می‌دهند به‌دلیل گیر لوله‌هاست و یک سوم از این گیرها به مشکلات تمیزکاری چاه^۱ بر می‌گردد [۱]. تمیزکاری چاه یعنی حذف کنده‌هایی^۲ که توسط سرمته حفاری شده‌اند از داخل فضای دالیزی و انتقالشان به سطح. این موضوع در چاه‌های زاویه‌دار و افقی یکی از دغدغه‌های اصلی به‌شمار می‌رود که به روی هزینه‌ها و کیفیت عملیات تأثیر به‌سزایی دارد. می‌توان گفت کلیدی‌ترین موضوع تکنولوژیکی در حفاری چاه‌های افقی، مباحث مرتبط با تمیزکاری چاه می‌باشد [۲]. عدم تمیزکاری چاه مشکلات متعددی

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (dehvedar@aut.ac.ir)

غلظت کنده‌های باقی مانده در آنالوس و یا ارتفاع متوسط و یا متغیر بستر سیال [۲-۲۱] و همچنین تغییرات افت فشار در طول می باشد که اکثراً به صورت ارائه یک رابطه صورت پذیرفته است. در تعدادی از این مطالعات با بهره گیری از تکنیک اعداد بدون بُعد برای افت فشار و حجم کنده‌ها روابط خاصی ارائه شده است [۲۴-۲۰-۲۱]. در تعدادی دیگر با استفاده از تکنیک‌های PIV [۸-۹] و توموگرافی و همچنین کاربرد اشعه گاما [۱۱] نحوه تغییرات غلظت در طول دستگاه، اندازه گیری شده است.

پارامترهای موثر در این دستگاه، می توانند بسیار متنوع باشند. با مطالعه کارهای انجام شده در زمینه تمیز کاری چاه، پارامترهای کلیدی اثرگذار بر آن در پنج دسته قرار خواهند گرفت که در جدول ۱- نشان داده شده‌اند.

۲- پارامترهای اثرگذار بر دینامیک سیالات محاسباتی

پارامترهای اثرگذار در حوزه دینامیک سیالات محاسباتی حمل کنده های حفاری در فضای دالیزی در مطالعات زیادی توسط محققان مورد توجه قرار گرفته است. تحقیق جامعی بر کارهایی که توسط محققان به روی محیط های گازی انجام داده اند انجام شده است و در آن چالش های شبیه سازی CFD چاه های انحرافی دریایی مورد بررسی قرار گرفته است.

از آنجا که مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی در حوزه حمل کنده های حفاری در مقایسه با مطالعاتی که مهندسان شیمی به روی محیط های مشابه با آنالوس انجام داده اند کم است، سعی شده تمام محیط هایی که در این رشته شبیه به فضای دالیزی بوده اند نیز مورد مطالعه قرار گیرند. از جمله مهمترین این محیط ها که با نام کلی بسترهای سیال مطرح است در مطالعات زیادی مورد توجه قرار گرفته است [۵-۲۱-۲۲-۳۰-۳۱-۳۲-۳۳-۳۴] و البته دو نوع دیگر به صورت خاص در این گونه موارد مطرح می شوند به نام اسپوند بدها [۸-۳۵] و رایزرها [۳۶].

در جریان مایع-جامد، مایع، گاهی به صورت سیال نیوتنی و یا آب است [۲۴-۲۴-۲۶] و گاهی به صورت سیال پایه روغنی [۹-۲۷] و گاهی به صورت کلی و تحت عنوان سیال غیر نیوتنی [۲۲]. تغییرات دبی جریان عاملی بوده است که جهت ایجاد رژیم های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴-۲۵-۲۶]. جریان سیال در تعدادی از این مطالعات به صورت پایدار و توسعه یافته بوده است [۹-۲۴-۳۲]، گاهی به صورت آشفته [۳۷-۳۸] و گاهی به صورت گذرا تعریف شده است [۳].

بسترهای سیال مورد استفاده در دستگاه های فوق اکثراً برای محیط های حاوی گاز-جامد هستند [۵-۲۹-۳۰-۳۶] و مطالعات جامد-مایع سهم کمی را در بین آنها دارند [۲-۴-۱۱-۲۴-۲۲-۲۶-۲۹-۳۱-۳۲-۳۴-۳۹-۴۰] در بعضی هم چندین جامد در یک فاز پیوسته مورد مطالعه قرار گرفته اند [۳۶].

هر یک از فازها، اختلاف فشار و سایر پارامترها با دقت بیشتری انجام شد [۸-۹-۱۱]. هنوز تا این زمان یک قانون بین المللی برای طراحی دستگاه های فللولوپ وجود ندارد [۷]. پارامترهای متعددی در این گونه دستگاه ها قابل کنترل می باشند مانند زاویه چاه، دبی سیال، خواص کنده ها، خواص سیال حفاری، نرخ نفوذ حفاری، سرعت چرخش رشته حفاری و حتی بررسی اثر زمان [۷-۱۱-۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶-۱۷-۱۸].

با شروع قرن بیست و یکم و پیشرفت های حاصله در تجهیزات کامپیوتری، رفته رفته نرم افزارهای شبیه سازی رشد نمودند، انواع کاربردهایشان در مسائل مهندسی توسعه یافت و پژوهشگران به مقایسه بین نتایج تجربی گذشته با نتایج شبیه سازی شده خود مشغول شدند. حال با گذشت بیش از یک دهه از این گونه فعالیت ها، مطالعات شبیه سازی به عملیات صنعتی نزدیک شده و در آینده ای نه چندان دور، با پیشرفت سیستم های کامپیوتری موجود، عملیات مختلفی که در سرچاه انجام می شود به راحتی قابل شبیه سازی بوده و زمانی فرا خواهد رسید که به کمک شبیه سازها، قبل از رسیدن به عمق مورد نظرمان، از مشکلات احتمالی پیش روی به خوبی مطلع خواهیم شد. راهکارهای اصلاحی خود را می توانیم بدون کمترین خسارتی تست نموده و بهترین تصمیم را در واقعیت اعمال نماییم. یکی از این ابزارها، دینامیک سیالات محاسباتی^۲ است که سعی شده است پس از بررسی تجربی پارامترهای اثرگذار بر حمل کنده ها، به بررسی پارامترها و مفاهیم کلیدی مطرح در دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته شود و تمام آنچه یک حفار برای شبیه سازی فضای دالیزی به آن نیاز دارد در قالب مرور مطالعات محققان گذشته صورت پذیرد. در انتها به بررسی تعدادی از روابط ارائه شده به کمک این دو دسته از مطالعات یعنی تجربی و شبیه سازی، پرداخته شده است.

۱- پارامترهای اثرگذار بر مطالعات تجربی

ابزار اصلی در مطالعات آزمایشگاهی مخصوص مهندسان نفت وسیله ای خاص به نام لوپ های حفاری است که به وسیله آن به راحتی می توان پارامترهای موثر بر حمل کنده های حفاری را تغییر داد و اثر آنها را به روی تمیز کاری چاه مشاهده نمود [۲-۱۹-۲۰]. کلیدی ترین عامل در طراحی فللولوپ ها حداکثر فشار عملیاتی آنهاست که حداقل نیمی از دستگاه های موجود در دنیا این محدودیت را دارند. بر این اساس فللولوپ ها به دو دسته کم فشار و پرفشار تقسیم می شوند. در فللولوپ های^۴ کم فشار، جنس فضای دالیزی از جنس پلی نیل کلراید است (پی وی سی) و در پرفشارها این جنس از کربن استنلس استیل می باشد. هر چند محدودیت های دیگری نیز وجود دارد مانند حداکثر طول دستگاه، حداکثر قطر فضای دالیزی و بازه تغییرات برای زاویه [۷].

آنچه به عنوان خروجی این گونه تست ها مطرح می شود، اصولاً



پارامتر اصلی	زیر پارامترها	توضیحات در امر تمیز کاری چاه	منبع
فضای دالیزی	زاویه چاه	زاویه چاه بر تمیز کاری چاه اثر بسیار قوی دارد. در زوایای بین ۰ تا ۱۰ درجه، به دلیل اثر سرعت، میزان تمرکز کنده‌ها، کم خواهد بود. بعد از زاویه ۳۰ تا ۳۵ درجه تشکیل بستر کنده‌ها را شاهد خواهیم بود. در بین زوایای ۳۵ تا ۵۵ درجه، اگر پمپ‌ها خاموش شوند، لغزش رو به پایین بستر شکل گرفته را شاهد خواهیم بود. در بین زوایای چاه، بازه بین ۴۰ تا ۶۰ درجه به عنوان بدترین بازه برای تمیز کاری چاه مشخص شد. ارتفاع بستر در بین زوایای ۶۵ تا ۷۰ بزرگ‌تر خواهد بود. در بین زوایای ۷۰ تا ۹۰ درجه، اثر زاویه کم خواهد بود. باید توجه داشت که در تمامی این زوایا یعنی از ۰ به سمت ۹۰ درجه، نیاز به تجهیزات هیدرلیکی برای تمیز کاری مناسب چاه، افزایش می‌یابد.	[۲-۴-۸-۱۳-۱۴-۱۵-۱۸-۲۴-۲۰-۲۱-۲۲-۲۳-۲۴-۲۵-۲۶]
	نامرکزی	میزان نامرکزی رشته در چاه بر تمیز کاری چاه اثری منفی دارد اما اگر رشته حفاری با بستر کنده‌ها تماس داشته باشد، اثر مثبتی را خواهد داشت.	[۲-۱۳-۱۴-۱۵-۲۲-۲۳-۲۵-۲۶-۲۷]
	سطح مقطع دالیزی	سطح مقطع دالیزی اثر منفی بر تمیز کاری چاه دارد. هر چند در بعضی از مطالعات اثر این اندازه را کم و آن را قابل اغماض دانسته‌اند. بهتر است در چاه‌های جهت دار، حتی الامکان از لوله‌های حفاری با قطر بزرگ‌تر استفاده شود. سطح مقاطع کوچک‌تر، حداقل سرعت لازم برای تمیز کاری چاه را کاهش خواهد داد.	[۱۳-۱۴]
چرخش رشته حفاری	چرخش رشته حفاری	سرعت چرخش رشته حفاری اثر مثبتی بر بهبود انتقال کنده‌ها دارد و این اثر به قدری شاخص است که نمی‌توان از آن صرف‌نظر کرد. به همین دلیل است که از تجهیزات سنتی دوران در حفر چاه‌های افقی برای چرخش رشته استفاده می‌شود. چرخش رشته حفاری، می‌تواند از بزرگ شدن بستر کنده‌ها جلوگیری نماید و در نتیجه تمیز کاری را بهتر خواهد کرد. بالا بردن دبی سیال برای تمیز کاری بهتر، احتمال شکسته شدن سازند را بالا خواهد برد در حالی که برای رسیدن به این هدف، استفاده از چرخش رشته حفاری می‌تواند جایگزین بالا بردن دبی سیال شود، البته در صورتی که امکان‌پذیر باشد. همچنین چرخش رشته حفاری افت فشار در داخل فضای دالیزی را کاهش خواهد داد. اثر دینامیکی رشته حفاری، نقش موثری را در تمیز کاری چاه بازی خواهد کرد. این اثر زمانی کارا خواهد بود که این چرخش رشته باعث ایجاد جریان آشفته در فضای آنالوس شود. چرخش رشته حفاری در چاه‌های جهت‌دار نسبت به چاه‌های عمودی موثرتر است. برای چاه‌های افقی با زاویه ۹۰ درجه، یک دبی پایین با سرعت چرخش بالا و ویسکوزیته بالا، کنده‌های کوچک تر را راحت‌تر به سطح منتقل خواهد کرد. افزایش چرخش رشته حفاری عموماً حمل کنده‌ها را در سرعت‌های پایین بهتر می‌کند در حالی که سرعت‌های بالا تقریباً اثر چرخش رشته حفاری قابل‌اغماض خواهد بود. در سازندهای ناپایدار مانند ماسه‌سنگ‌ها، باید از دورهای بالای رشته حفاری اجتناب نمود چراکه این کار موجب از دست رفتن قسمتی از سازندهای اطراف دهانه چاه خواهد شد. همچنین دورهای بالا، باعث بالا رفتن لرزش‌های رشته حفار خواهد شد که این امر موجب آسیب رسیدن به قطعات الکتریکی BHA خواهد شد.	[۱۱-۱۲-۱۳-۱۵-۱۷-۱۸]
		در فضاهای دالیزی کوچک، اثر چرخش رشته حفاری به مراتب بالا خواهد بود. مخصوصاً زمانی که از سیالات ویسکوز استفاده شود. با چرخش رشته حجم کنده‌ها در فضای دالیزی کاهش می‌یابد و این چرخش، ذرات ریزتر را بهتر از ذرات درشت منتقل خواهد کرد. تمیز کاری ذرات ریز در مقایسه با ذرات درشت با چرخش رشته حفاری دو برابر خواهد شد. در غیاب چرخش رشته حفاری، سیالات با ویسکوزیته کم موثرترند و استفاده از پیل‌های ویسکوز و یا وزنی، تأثیر زیادی بر فرایند حذف بستر کنده‌ها نخواهد داشت. بعد از توقف حفاری، چرخش رشته حفاری به حذف بستر کنده‌های باقی‌مانده کمک خواهد کرد.	[۱۳-۱۴-۱۷-۱۸]
سیال حفاری	رئولوژی	تأثیر خواص رئولوژیکی گل بر حمل کنده‌ها پیچیده اما بسیار مهم است. در تعدادی از مطالعات برای آن اثری مثبت، در تعدادی دیگر اثری منفی و در برخی اثر میانه برای آن ذکر کرده‌اند. البته در این موضوع به رفتار تیکسوتراپی سیال هم باید توجه داشت. افزایش نسبت نقطه تسلیم به ویسکوزیته پلاستیک، ظرفیت حمل کنده حفاری را در فضاهای دالیزی هم مرکز افزایش می‌دهد. افزایش ویسکوزیته ظاهری، تولید پوینت و خاصیت ژله‌ای اولیه، ظرفیت حمل کنده‌های حفاری در سرعت‌های کم تا متوسط فضاهای دالیزی هم‌مرکز را افزایش می‌دهد. سیالات نیوتنی در مقایسه با سیالات دیگری که ویسکوزیته ظاهری برابری دارند حمل کنده‌ها را بهتر انجام می‌دهند. هر چه n بیشتر باشد نیروی برآ یا لیفت بزرگ‌تر خواهد بود و هر چه k بیشتر باشد، کنده‌ها مدت‌زمان بیشتری را می‌توانند به صورت معلق در سیال حضور داشته باشند. در پاره‌ای از مطالعات سیالات با ویسکوزیته بالا تمیز کاری بهتری را نسبت به ویسکوزیته کم خواهند داشت. در جریان‌های آشفته سیالاتی با ویسکوزیته پایین نسبت به سیالات با ویسکوزیته بالا در جریان‌های آرام، بسیار موثرتر خواهند بود.	[۱۱-۱۳-۱۴-۱۶]



منبع	توضیحات در امر تمیز کاری چاه	زیر پارامترها	
[۱۳-۱۴-۱۵]	در مورد کنده‌های درشت در مقایسه با ذره‌های کوچک، رئولوژی سیال خیلی تاثیر گذار نیست و با حداکثر اثر میانه‌ای را بازی خواهد کرد. در صورتی که دبی جریان ثابت باشد سیالاتی با ویسکوزیته پایین حمل کنده‌ها را بهتر از سیالاتی با ویسکوزیته بالا انجام می‌دهند. این در حالی است که در مطالعه دیگر گفته شده است که در صورتی که کنده‌ها به صورت ذرات ریز وجود داشته باشند، افزایش ویسکوزیته، تمیز کاری آنها را بهتر خواهد کرد. در چاه‌های عمودی و جهت‌دار با استفاده از سیالاتی با ویسکوزیته پایین، ذرات ریزتر بهتر حمل می‌شوند.	رئولوژی	
[۱۴-۱۷]	نوع سیال حفاری اثری کم تا متوسط را بر حمل کنده‌های حفاری خواهد داشت. لغزش بستر کنده‌های شکل گرفته در بین زوایای ۴۰ تا ۶۰ درجه در سیالات پایه روغنی بیشتر از سیالات پایه آبی خواهد بود ولی در کل اگر این دو سیستم سیال، خواص رئولوژیکی یکسانی را داشته باشند، تمیز کاری یکسانی را نیز خواهند داشت. پیل‌های حفاری پایه آبی بیشترین اثر را در رفع کنده‌ها در داخل چاه و کاهش ارتفاع بسترشان به عهده خواهند داشت و در ارتباط با پیل‌های پایه آبی، افزایش دبی سیال به صورت شاخص بر روی ارتفاع بستر کنده‌ها اثر خواهد گذاشت. در عین حال افزایش دبی سیال، اثر شاخصی را برای کاهش ارتفاع بستر کنده‌ها در سیالات با دانسیته بالا-ویسکوزیته بالا و یا سیالاتی با ویسکوزیته بالا ولی دانسیته معمولی نخواهد داشت.	نوع	
[۱۱-۱۳-۱۴-۱۵]	دانسیته سیال حفاری که معمولاً آن را تحت عنوان وزن گل می‌شناسند اثر مثبت کمی را در بحث تمیز کاری چاه دارد. با افزایش وزن گل، سرعت آن کاهش یافته و در نتیجه در وزن گل‌های بیشتر، تمیز کاری چاه بهبود خواهد یافت. اثر وزن گل می‌تواند در حضور و حتی بدون حضور چرخش رشته حفاری شاخص باشد.	دانسیته	
[۲۴]	سرعت و دبی سیال بر حمل کنده‌ها موثر است. دبی‌های بالای سیال سرعت حذف بستر کنده‌ها را افزایش می‌دهد.		سیال حفاری
[۱۳]	در چاه‌های افقی، سیالاتی با خواص رئولوژیکی پایین، به دبی‌های کمتری جهت حمل کنده‌ها احتیاج دارند.		
[۲۴]	محدودیت افزایش دبی به دلیل شسته شدن دیواره چاه و محدودیت‌های موتورهای درون‌چاهی	دبی و سرعت	
[۱۲]	افزایش دبی ضخامت لایه ویسکوز زیرین را کاهش خواهد داد.		
[۱۵]	به طور کلی افزایش دبی تمیز کاری چاه را بهبود خواهد داد ولی برای ذرات ریزتر می‌بایست به دلیل نیروی درگ کمتر از دبی‌های بالا جهت حمل کنده بهره گرفت.		
[۱۵-۱۳]	جریان آرام در زوایای بین ۰ تا ۴۵ درجه بیشتر موثر خواهد بود. در جریان آرام، سیالاتی با نسبت بالای تولید پوینت به ویسکوزیته پلاستیک تمیز کاری بهتری را ایجاد خواهند کرد. اثر تولید سیالات حفاری در زوایای بین ۰ تا ۴۵ درجه شاخص خواهد بود. نوع جریان یعنی آرام یا آشفته بودن اثر یکسانی را بر حمل کنده‌ها در زوایای میانه یعنی ۴۵ تا ۵۵ درجه، دارند. در جریان آشفته به قدرت بیشتری از پمپ‌ها احتیاج داریم. زبری رشته حفاری موجب آشفته‌گی جریان خواهد شد. در زوایای بین ۵۵ تا ۹۰ درجه، جریان آشفته موثر خواهد بود. در زوایای بین ۵۵ تا ۹۰ درجه، اثر تولید کاهش یافته تا آنکه ناچیز خواهد شد. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که با زیاد شدن آشفته‌گی جریان، ضخامت بستر کنده‌ها کمتر خواهد بود. با استفاده از سیالاتی با ویسکوزیته کمتر میزان آشفته‌گی جریان بیشتر خواهد شد.	رژیم جریان	
[۱۳]	شدت اثر سایز کنده‌های حفاری بر نیروهای کشش سطحی		
[۱۱-۱۵]	تاثیر نیروهای بین ذره‌ای بر سختی حمل کنده‌های ریزتر		
[۱۵-۱۸]	راحتی انتقال ذرات ریزتر با استفاده از محلول‌های حاوی پلی‌آنیونیک سلولز		
[۱۵]	نگرانی همده از انتقال کنده‌های ریز ناشی از استفاده از سرمته‌های الماسه و یا لوله مغزه	سایز	کنده‌های حفاری
[۱۵]	راحتی حذف کنده‌های با سایز متوسط		
[۱۳-۱۴]	سختی حذف ذرات ریزتر		

منبع	توضیحات در امر تمیز کاری چاه	زیر پارامترها	
[۱۶]	نقش موثر در شرایط استاتیک و داینامیک	شکل	کنده‌های حفاری
[۱۳]	شکل کنده‌ها بیشتر به نوع سازند وابسته است. در سازندهای سخت معمولاً اندازه‌های بزرگی دارند.		
[۱۳]	در سازندهای نرم از دبی‌های بالا، سرعت نفوذ بالا، سرعت چرخش بالا، ویسکوزیته پلاستیک بالا، ثیلدپوینت بالا و کلاسیالی با ویسکوزیته پایین جهت تمیز کاری استفاده شود و برای سازندهای سخت همه پارامترها برعکس عمل شوند.	نوع سازند	
[۱۳-۱۴-۲۰-۲۸]	اثری منفی به همراه نیاز به تجهیزات هیدرولیکی بیشتر جهت بهبود تمیز کاری نرخ‌های نفوذ بالاتر، یعنی نیاز به سرعت‌های بالاتر جهت انتقال	نرخ نفوذ	
[۱۲-۱۳-۱۴-۱۵-۱۶]	سرعت عملیات، میزان زمان استفاده از یک سرتمه، میزان کنترل‌پذیری، توانایی حفاری، هماهنگی با دیگر وسایل درون‌چاهی، موجود بودن، قیمت مناسب، قابلیت تعمیر و استفاده مجدد، قابل اعتماد بودن، وزن روی سرتمه	پارامترهای عملیاتی	سرتمه
	اندازه کاترهای مورد استفاده، زاویه کاج‌ها با محور افقی، میزان انحراف محور مرکزی کاج‌ها با هم، اندازه و زاویه جت سرتمه	پارامترهای داخلی	
	الماس طبیعی، الماس مصنوعی، تیغه فولادی، دکمه‌ای	نوع	
[۱۳]	هرچند اثر فشار و دما بر دانسیته سیالات پایه آبی معمولاً پایین است.		فشار و دما
[۱۱-۱۶]	به دلیل اثرگذاری دما بر خواص رئولوژیکی سیال و تاثیر بر نیروهای درگ و ویسکوز، اثر آن به صورت مشهود خواهد بود.		

اولین قدم در انجام شبیه‌سازی، ساخت محیط در یک نرم‌افزار است. در نرم‌افزار گمبیت، علاوه بر طراحی محیط، امکان زدن انواع مش و تعریف لایه‌های مرزی وجود دارد و همچنین تعریف شرایط مرزی به راحتی انجام می‌شود [۹-۲۰]. نحوه اعمال شرایط مرزی در مطالعات دینامیک سیالات محاسباتی نقشی اساسی دارد. سه مکان مهم جهت تعریف شرایط مرزی، ورودی‌ها، خروجی‌ها و دیواره‌های محیط می‌باشد. تعیین نوع ورودی سیال که آیا به صورت سیالی با سرعت یکنواخت باشد [۳۴] و یا غیریکنواخت [۳۳] و یا اصلاً به صورت کلی سرعتی معین در ورودی قرار گیرد [۲۰-۲۸] و یا این که خروجی سیال از محیط به چه صورت باشد [۲۰-۲۸-۳۴] همه از مواردی است که مورد توجه محققان بوده است. رشته حفاری در این نوع مطالعات می‌تواند دارای چرخش باشد [۲۴-۲۵-۲۸-۲۹-۳۸] و یا اینکه مانند عملیاتی چون لوله مغزه دارای چرخش نباشد [۲۴]. در بعضی موارد با فرض هم‌مرکزی با فضای دالیزی مسئله حل می‌شود [۲-۲۵-۲۷-۳۸] و در بعضی دیگر، رشته حفاری و فضای دالیزی نسبت به هم، ناهم‌مرکزند [۲۲-۲۳-۲۶-۳۸].

در مطالعات مربوط به دیواره، عموماً برای آب و سیالات در شرایط مرزی شرط عدم لغزش [۲۰-۳۱-۳۴] و برای ذرات جامد عموماً شروط عدم لغزش و یا لغزش جزئی فرض می‌شود [۲۲]. بعد از آماده‌سازی و گرفتن خروجی از نرم‌افزار گمبیت، اولین چیزی که دغدغه محققان بوده است، کار با یک سیستم با مشخصات خاص

است. هرچه قدرت سیستم کامپیوتری بیشتر باشد، سرعت محاسبات بالاتر بوده و وقت کمتری از محقق خواهد گرفت. [۹-۲۴] بعد از انتخاب سیستم، نوبت به ماژول انتخابی می‌رسد. مثلاً در نرم‌افزار ANSYS، در اکثر مطالعات انجام شده در بحث حمل‌کننده‌ها از ماژول CFX یا فلوئنت [۲۰-۲۲] استفاده شده است ولی شرایط به گونه‌ای است که عموماً نامی از ماژول مورد استفاده، برده نمی‌شود. آنچه ما به روی آن متمرکز خواهیم شد نرم‌افزار فلوئنت خواهد بود. اکثر مطالعات به صورت سه‌بعدی انجام شده است هر چند در پاره‌ای از موارد، مطالعات دو بعدی نیز صورت گرفته است. جهت حل این گونه مسائل، دو گزینه حل سریالی و موازی نیز می‌تواند مورد توجه محققان قرار گیرد. در حل معادلات مربوط به شبیه‌سازی، معادلات اساسی مونتوم و پیوستگی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. نحوه کوپل معادلات فشار و سرعت [۹-۲۷-۳۲]، نوع گسسته‌سازی معادلات [۲۷] و همچنین بازه‌هایی که به عنوان تایم‌استپ مشخص می‌شوند نیز مورد بررسی قرار گرفته است. [۳۲]

به‌طور کلی دو راهکار برای برخورد با جریان چندفازی وجود دارد. راهکار اولری-اولری و راهکار اولری-لاگرانژی. در راهکار اولری-اولری، رفتار فازها توسط یک ناظر که در مبدأ مختصات قرار دارد مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این روش، فازهای مختلف به عنوان محیط پیوسته‌ای در هم نفوذکننده در نظر گرفته می‌شود و برای هریک از این فازها معادلات

است. هرچه قدرت سیستم کامپیوتری بیشتر باشد، سرعت محاسبات بالاتر بوده و وقت کمتری از محقق خواهد گرفت. [۹-۲۴] بعد از انتخاب سیستم، نوبت به ماژول انتخابی می‌رسد. مثلاً در نرم‌افزار ANSYS، در اکثر مطالعات انجام شده در بحث حمل‌کننده‌ها از ماژول CFX یا فلوئنت [۲۰-۲۲] استفاده شده است ولی شرایط به گونه‌ای است که عموماً نامی از ماژول مورد استفاده، برده نمی‌شود. آنچه ما به روی آن متمرکز خواهیم شد نرم‌افزار فلوئنت خواهد بود. اکثر مطالعات به صورت سه‌بعدی انجام شده است هر چند در پاره‌ای از موارد، مطالعات دو بعدی نیز صورت گرفته است. جهت حل این گونه مسائل، دو گزینه حل سریالی و موازی نیز می‌تواند مورد توجه محققان قرار گیرد. در حل معادلات مربوط به شبیه‌سازی، معادلات اساسی مونتوم و پیوستگی از اهمیت خاصی برخوردار هستند. نحوه کوپل معادلات فشار و سرعت [۹-۲۷-۳۲]، نوع گسسته‌سازی معادلات [۲۷] و همچنین بازه‌هایی که به عنوان تایم‌استپ مشخص می‌شوند نیز مورد بررسی قرار گرفته است. [۳۲]

به‌طور کلی دو راهکار برای برخورد با جریان چندفازی وجود دارد. راهکار اولری-اولری و راهکار اولری-لاگرانژی. در راهکار اولری-اولری، رفتار فازها توسط یک ناظر که در مبدأ مختصات قرار دارد مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این روش، فازهای مختلف به عنوان محیط پیوسته‌ای در هم نفوذکننده در نظر گرفته می‌شود و برای هریک از این فازها معادلات

میان حرکت تصادفی ذرات ناشی از برخوردهای ذره - ذره و حرکت حرارتی مولکول‌ها در یک گاز و در نظر گرفتن غیرالاستیک بودن فاز دانه‌ای به دست می‌آید و همانند یک گاز، شدت نوسانات ذره، تعیین کننده‌ی تنش، ویسکوزیته و فشار جامد است. انرژی جنبشی همراه با نوسانات سرعت ذره با یک ترم شبه‌دمایی (Pseudothermal) یا دمای دانه‌ای، نشان داده می‌شود که متناسب با مربع متوسط حرکت تصادفی ذرات است. البته این نظریه نیز منتقدان خاص خود را دارد [۳۴].

از جمله نیروهای موثر در معادله مومنتوم، نیروی برآ [۲۱-۳۸-۳۹]، جرم مجازی [۲۴-۳۴] و نیروهای خارجی وارد بر بدنه می‌باشد [۵۸]. در بحث تبادلات بین فازی در حمل‌کننده‌های حفاری، دو نوع ضریب تبادل مایع-جامد و جامد-جامد مورد توجه قرار خواهد گرفت. ضریب تبادل جامد-مایع، به نوعی با ضریب اصطکاک، دانسیته ذره و کسر حجمی جامد رابطه مستقیم و با زمان آسایش نسبت عکس دارد. زمان آسایش نیز با دانسیته ذره و توان دو قطر آن نسبت مستقیم و به ویسکوزیته سیال نسبت عکس دارد.

ضریب تبادل جامد-جامد به ضریب ارتجاعی e_{is} [۳۱-۳۳]، ضریب اصطکاک میان ذرات جامد $C_{fr,ls}$ ، کسرهای حجمی جامد و مایع، دانسیته جامد و مایع، قطر ذرات جامد $d_{s,dl}$ ، ضریب توزیع شعاعی $g_{o,ls}$ [۳۱-۴۲] و اختلاف سرعت دو فاز وابسته است. تقریباً تمامی تعاریف ضریب اصطکاک [۲۸] دارای ترمی به نام ضریب دراگ هستند [۶-۳۲-۳۴-۳۶]، که این ضریب بر مبنای عدد رینولدز تعریف می‌شود [۴۱].

برای جریان‌های چندفازی، اثر نیروی برآ بر فاز دوم عمل خواهد نمود. عملکرد اصلی این نیرو از طریق گرادیان سرعت فاز اول خواهد بود. نیروهای برآ برای ذرات درشت‌تر بیشتر خواهد بود ولی از آنجا که در فلوننت قطر ذرات را خیلی کمتر از فاصله ذرات در نظر می‌گیرند، اثر این نیرو، برای بسترهای متراکم و یا خیلی ریز قابل اغماض است [۸-۳۱-۴۱]. مگر اینکه قابل توجه باشد [۵۸]. در پاره‌ای دیگر آن را عددی ثابت و حتی کوچک فرض نموده‌اند. این نیرو به طرف راست معادله مومنتوم اضافه خواهد شد. ضریب برآ از چندین مدل مختلف مانند موراگا، سافمن-می، لیجندری-مگناودت و تومیاما به دست خواهد آمد. [۴۳]

دمای دانه‌ای فاز جامد λ_m متناسب با انرژی جنبشی حرکت تصادفی ذرات است که در توزیع سرعت ماکسولی برای ذرات، وارد مدل می‌شود و در روابط فشار جامد و ویسکوزیته ظاهر می‌گردد. فشار جامد از یک ترم جنبشی و یک ترم ناشی از برخورد ذرات تشکیل شده است. این فشار به دمای دانه‌ای، تابع توزیع شعاعی [۳۲-۳۴]، ضریب ارتجاعی برخورد ذرات، کسر حجمی ذرات جامد و دانسیته آنها وابسته است. دمای دانه‌ای متناسب با انرژی سینتیک نوسانات حرکت ذره است و نوعی

نویراستوکس به صورت جداگانه حل می‌شود. در راهکار اولری-لاگرانژی، بر روی هر ذره ناظری متحرک وجود دارد که حرکت ذره را تحلیل می‌کند. در این روش، معادلات نویراستوکس در فاز پیوسته و معادلات نیوتنی در فاز گسسته جهت مسیریابی ذره، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴۱]. در دیدگاه لاگرانژی، از طریق ردگیری حرکت ذره بر اساس برآیند نیروهای وارده بر آن عمل خواهیم نمود [۴۰-۵].

در دیدگاه اولر-اولر فازهای مختلف به صورت ریاضی به عنوان محیط پیوسته در هم نفوذکننده در نظر گرفته می‌شوند. چون حجم یک فاز نمی‌تواند توسط فازهای دیگر اشغال شود، مفهوم کسر حجمی وارد معادلات می‌شود. معادلات بقاء توسط روابط کمکی که از فرمول‌های تجربی به دست آمده‌اند یا در حالت جریان دانه‌ای با به کارگیری تئوری سینتیک گازها، حل می‌شوند [۵۸]. مدل مخلوط [۹-۲۳]، مدل حجم سیال و نگاه اولری-اولری [۲۴-۲۷-۳۱-۳۶-۴۰] سه حالت اصلی در دیدگاه اولری-اولری محسوب می‌شوند.

با مشاهده تست‌های آزمایشگاهی و مطالعات گذشته در می‌یابیم که در فضای لوپ‌های حفاری، حرکت جامد-مایع در حالت عمودی به صورت مخلوط و در بقیه موارد به نگاه اولری-اولری بسیار نزدیک است.

مدل مخلوط برای دو فاز یا بیشتر طراحی شده است. فازها به عنوان یک محیط پیوسته در هم نفوذکننده در نظر گرفته شده و معادلات مومنتوم برای مخلوط حل و از سرعت‌های نسبی جهت تشریح فازهای پراکنده استفاده می‌شود. جهت مدل کردن جریان‌های چندفازی یکنواخت، می‌توان سرعت نسبی فازهای پراکنده را در نظر نگرفت [۵۸]. در این مدل ویسکوزیته مخلوط را باید مورد توجه قرار دهیم [۹]. مدل اولر-اولر پیچیده‌ترین مدل چندفازی نرم‌افزار است. در این مدل معادلات مومنتوم و پیوستگی را برای هر فاز حل می‌کنند. این حالت برای بررسی زوایای بین صفر تا نود و همچنین حالت افقی کاربرد دارد. معادلات مورد استفاده در موضوع حمل‌کننده‌های حفاری به نوعی جریان مایع-جامد محسوب می‌شوند و جهت حل آنها از تئوری سینتیک گازها برای جریان‌های دانه‌ای بهره‌برداری می‌شود.

معادلات پیوستگی و مومنتوم را تحت عنوان معادلات اساسی می‌شناسند و بقیه معادلات به نحوی کمک‌کننده‌ی حل این دو معادله محسوب می‌شوند. در حل معادله پیوستگی باید مجموع کسر حجمی‌ها برابر یک باشد. معادله مومنتوم به پارامترهای متعددی وابسته است [۵۸]. باید توجه داشت که برای شبیه‌سازی حرکت ذرات جامد توسط سیال (گاز یا مایع) بنا به فرضیات تئوری سینتیک گازها [۲۹-۳۰-۳۳-۴۲]، معادله‌ی مومنتوم تغییرات اندکی می‌یابد. با این شرایط، تنش فاز جامد با ایجاد تشابه

ضریب تصحیح است که برخورد میان ذرات سنگین را در فاز دنس تصحیح می کند و این فرمول یک فاصله بدون بعد بین ذرات کروی است.

برای جریان های چند فازی، اثر نیروی جرم مجازی، وقتی به وجود می آید که فاز ثانویه نسبت به فاز اولیه شتاب داشته باشد. اینرسی جرم فاز اولیه در اثر ذرات شتاب دار به صورت نیروی جرم مجازی روی ذره اعمال می شود. اثر جرم مجازی وقتی مهم است که دانسیته فاز ثانویه خیلی کمتر از دانسیته فاز اولیه باشد. به صورت پیش فرض این نیرو در نظر گرفته نمی شود [۴۳]. برای جریان های چند فازی، اثر نیروی جرم مجازی وقتی به وجود می آید که فاز ثانویه p نسبت به فاز اولیه q شتاب داشته باشد.

انرژی تلف شده ی برخورد γ_{bs} بیانگر میزان اتلاف انرژی در داخل فاز جامد s ناشی از برخورد میان ذرات است. بعد از اعمال شرایط فوق در مدل و انجام شبیه سازی های لازم اولیه، نتایج مدل را باید با واقعیت مقایسه نمود. این کار را به اصطلاح معتبر سازی مدل می نامند که در صورت موفقیت آمیز بودن آن، از آن پس می توان به نتایج ارائه شده توسط مدل توجه نمود و مورد استفاده قرار داد. جهت اعتبار سازی مدل های ساخته شده، روش های متفاوتی مورد استفاده قرار گرفته است. در کنار هر مدل کار دیگری قرار خواهد گرفت تا نتایج آن دو با هم مقایسه شوند که اکثراً به صورت کارهای دینامیک سیالات محاسباتی و مقایسه با آزمایش های تجربی بوده اند.

در تعدادی از مطالعات، میزان افت فشار در واحد طول در سرعت های مختلف رسم شده اند، یا میزان تمرکز کننده ها در فضای دالیزی در آزمایشگاه و شبیه سازی در کنار هم قرار گرفته اند [۳۳]، یا از نسبت سرعت سیال و بستر در آزمایشگاه و شبیه سازی استفاده شده است [۹] و یا از نمودار حجم کننده های داخل فضای دالیزی در سرعت مختلف رشته حفاری استفاده شده است. در بعضی دیگر، رابطه افت فشار و سرعت های مختلف رشته حفاری کمک گرفته اند و یا برای حالات عمودی، طول و ارتفاع بالا آمدن کنده ها مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر قطع کردن تزریق و سرعت ته نشینی [۳۴] معیار دیگری بوده که در اعتبارسنجی مدل ها به محققان کمک کرده است.

نتیجه گیری

با مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه تجربی و دینامیک سیالات محاسباتی حمل کننده های حفاری در می یابیم که:

- ۱- شاخص ترین مطالعات حمل کننده های حفاری مربوط به گیر مکانیکی است.
- ۲- پارامترهای موثر در حفاری، همگی بر حمل کننده های حفاری و تمیز کاری چاه نیز موثرند.

میزان انرژی ذخیره شده در ذرات پس از برخورد با هم می باشد که به سرعت ذرات در هنگام برخورد مرتبط می باشد [۲۴] تابع توزیع شعاعی به معنی انتقال از شرایط تراکم پذیر یعنی وقتی که فاصله میان ذرات جامد پیوسته کاهش می یابد تا به شرایط تراکم ناپذیر که حداکثر تراکم در آن اتفاق افتاده است، برسد. در حقیقت این تابع احتمال برخورد میان دانه ها را اصلاح می کند [۵۸].

برای جریان های دانه ای در جریان های تراکم پذیر (که در آنها کسر حجمی جامد کمتر از مقدار ماکزیمم حد مجاز باشد)، فشار جامد به صورت مستقل محاسبه می شود و برای محاسبه Δp_s در معادله مونتوم فاز دانه ای استفاده می شود. فشار جامد از دویخش تشکیل شده است که یک بخش آن به ترم سینتیکی مرتبط است و ترم دوم آن به برخورد ذرات منوط می شود. پیش فرض نرم افزار برای ضریب ارتجاعی 0.9 است.

از آنجا که در مدل های اولری-اولبری، باید به تنسور تنش جامد که برخاسته از تغییرات مونتوم ذره در اثر انتقال و برخورد می باشد، توجه نمود، باید به انواع ویسکوزیته های مطرح در این مسیر نیز توجهی خاص داشت [۹-۳۱-۳۲]. این تنسور شامل ویسکوزیته های برشی و توده ناشی از تبادل مونتوم ذره در اثر انتقال و برخورد است. این نوع ویسکوزیته در سه بخش مورد بررسی قرار گرفته است: ویسکوزیته ناشی از اصطکاک $\mu(s,fr)$ برای لحاظ کردن انتقال ویسکوپلاستیک زمانی که جامد به حداکثر کسر حجمی برسد در جریان های دنس در شیرهای پایین، ویسکوزیته ناشی از برخورد $\mu_{s,col}$ و ویسکوزیته جنبشی $\mu_{s,kin}$ [۴۱].

به کارگیری تئوری سینتیکی برای جریان های دانه ای مناسب نیست، چون ذرات در تماس باهم هستند و تنش های اصطکاک حاصل باید در نظر گرفته شوند. مدل اولری فرمولاسیون ویسکوزیته ی اصطکاک را توسعه داده است و تنش های اصطکاک را در فرم نیوتونی، به کار می برد. زمانی که کسر حجمی جامد از مقدار بحرانی بیشتر شود، تنش اصطکاک به تنش پیش بینی شده توسط تئوری سینتیکی اضافه می شود. وقتی جریان سه بعدی و حداکثر پرشوندگی برابر 0.63 است، این مقدار برابر با 0.5 قرار داده می شود. به دست آوردن فشار اصطکاک اساساً به صورت تجربی است، در حالی که ویسکوزیته ی اصطکاک را می توان از اصول اولیه به دست آورد. در این حالت به کارگیری قانون کولن اصلاح شده منجر به شکل گیری رابطه می شود.

ویسکوزیته توده جامد برای مقاومت ذرات دانه ای به تراکم و انبساط مطرح شده است [۳۱-۴۱]. نرم افزار به طور پیش فرض برای آن عدد صفر را در نظر گرفته است ولی امکان استفاده از مدل لون نیز برای آن وجود دارد. تابع توزیع شعاعی g_0 یک

دانه‌ای بهره می‌گیرند.
 ۶- یک مدل شبیه‌سازی شده به کمک دینامیک سیالات محاسباتی بدون معتبرسازی به کمک داده‌های آزمایشگاهی و یا تجربی قابل اعتماد نیست.
 ۷- دمای دانه‌ای، تانسورهای تنش کرنش برای فازهای جامد و مایع، فشار جامد، ویسکوزیته برشی جامد، تابع توزیع شعاعی، جرم مجازی و ضریب نفوذ دانه‌ای از پارامترهای اثر گذار دینامیک سیالات محاسباتی حمل‌کننده‌های حفاری هستند.

۳- بررسی ارتفاع متوسط بستر کنده‌های حفاری در فضای دایزی و یا میزان تجمعی کنده‌های حفاری در خروجی لوپ‌های حفاری، معیاری از تمیزکاری چاه است.
 ۴- نوع گسسته‌سازی معادلات، تایم‌استپ و نحوه کوپل فشار-سرعت در معادلات مومنتوم و پیوستگی از پارامترهای اثر گذار بر همگرایی مدل می‌باشند.
 ۵- برای جریان‌های مایع-جامد حمل‌کننده‌های حفاری اکثراً از نگاه اولری-اولری به کمک تئوری سینتیک گازها برای جریان‌های

پانویس‌ها

- | | | |
|----------------------|---------------------------------|--------------|
| 1. Hole cleaning | 3. computational fluid dynamics | 4. flow loop |
| 2. cutting transport | | |

منابع

- [1] Zhang, F., Miska, S., Yu, M., Ozbayoglu, E., Takach, N., & Osgouei, R. E. (2015, March). Is Well Clean Enough? A Fast Approach to Estimate Hole Cleaning for Directional Drilling. In SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [2] Allahvirdizadeh, P., Kuru, E., & Parlaktuna, M. (2016). Experimental investigation of solids transport in horizontal concentric annuli using water and drag reducing polymer-based fluids. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 35, 1070-1078.
- [3] Cayeux, E., Leulseged, A., Kluge, R., & Haga, J. (2016, March). Use of a Transient Cuttings Transport Model in the Planning, Monitoring and Post Analysis of Complex Drilling Operations in the North Sea. In IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [4] Han, S. M., Woo, N. S., & Kim, Y. J. (2016). A Study of the Particle Transport in the Non-Newtonian Fluid with Inclined Annulus.
- [5] Ayeni, O. O., Wu, C. L., Nandakumar, K., & Joshi, J. B. (2016). Development and validation of a new drag law using mechanical energy balance approach for DEM-CFD simulation of gas-solid fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*, 302, 395-405.
- [6] Li, J., & Luft, B. (2014, December). Overview Solids Transport Study and Application in Oil-Gas Industry-Theoretical Work. In International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference.
- [7] Falcone, G. (2009). Flow Loops for Validating and Testing Multiphase Flow Meters. *Developments in Petroleum Science*, 54, 295-302.
- [8] Sutkar, V. S., Deen, N. G., & Kuipers, J. A. M. (2013). Spout fluidized beds: Recent advances in experimental and numerical studies. *Chemical engineering science*, 86, 124-136.
- [9] Mohammadzadeh, K., Hashemabadi, S. H., & Akbari, S. (2016). CFD simulation of viscosity modifier effect on cutting transport by oil based drilling fluid in wellbore. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 29, 355-364.
- [10] Limtrakul, S., Chen, J., Ramachandran, P. A., & Duduković, M. P. (2005). Solids motion and holdup profiles in liquid fluidized beds. *Chemical Engineering Science*, 60(7), 1889-1900.
- [11] Mingqin Duan, S. M., Mengjiao Yu, Nicholas Takach, Ramadan Ahmed and, & Zettner, C. (2007). Critical Conditions for Effective Sand-Sized Solids Transport in Horizontal and High-Angle Wells. Paper presented at the SPE 106707, Oklahoma, U.S.A.
- [12] Corredor, F. E. R., Bizhani, M., & Kuru, E. (2016). Experimental investigation of cuttings bed erosion in horizontal wells using water and drag reducing fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 147, 129-142.
- [13] Egenti, N. B. (2014). Understanding Drill-cuttings Transportation in Deviated and Horizontal Wells. Paper presented at the SPE-172835-MS, Lagos, Nigeria.
- [14] T. Nazari, G. H. a. J. J. A. (2010). Review of Cuttings Transport in Directional Well Drilling- Systematic Approach. Paper presented at the SPE, Anaheim, California, USA.
- [15] M. Bizhani, F. E. R.-C., and E. Kuru. (2015). Hole Cleaning Performance of Water vs. Polymer-Based Fluids Under Turbulent Flow Conditions. Paper presented at the SPE, Alberta, Canada.
- [16] S. Baldino, R. E. O., E. Ozbayoglu, S. Miska, N. Takach, R. May and D. Clapper. (2015). Cuttings settling and slip velocity evaluation in synthetic drilling fluids. Paper presented at the 12th Offshore Mediterranean Conference and Exhibition in Ravenna, Italy.
- [17] Valluri, S. G., Miska, S. Z., Yu, M., Ahmed, R. M., & Takach,

- N. (2006, January). Experimental study of effective hole cleaning using "sweeps" in horizontal wellbores. In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [18] Mingqin Duan, S. M., Mengjiao Yu, Nicholas Takach, Ramadan Ahmed and, & Zettner, C. (2008). Transport of Small Cuttings in Extended-Reach Drilling. SPE.
- [19] 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.
- [20] Amanna, B., & Movaghar, M. R. K. (2016). Cuttings transport behavior in directional drilling using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 670-679.
- [21] 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.
- [22] Riera, J., Zeppieri, S., & Derjani-Bayeh, S. (2014). Hydrodynamic study of a multiphase spouted column. *Fuel*, 138, 183-192.
- [23] 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.
- [24] Ofei, T. N., Irawan, S., & Pao, W. (2014). CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014.
- [25] Dewangan, S. K., & Sinha, S. L. (2016). Exploring the hole cleaning parameters of horizontal wellbore using two-phase Eulerian CFD approach. *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 8(1), 15-39.
- [26] Osgouei, R. E., Ozbayoglu, M. E., & Fu, T. K. (2013, July). CFD simulation of solids carrying capacity of a newtonian fluid through horizontal eccentric annulus. In ASME 2013 Fluids Engineering Division Summer Meeting (pp. V01CT20A003-V01CT20A003). American Society of Mechanical Engineers.
- [27] Sayindla, S., Lund, B., Ytrehus, J. D., & Saasen, A. (2017, March). CFD Modelling of Observed Cuttings Transport in Oil-Based and Water-Based Drilling Fluids. In SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.
- [28] 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.
- [29] Zhong, H., Gao, J., Xu, C., & Lan, X. (2012). CFD modeling the hydrodynamics of binary particle mixtures in bubbling fluidized beds: effect of wall boundary condition. *Powder technology*, 230, 232-240.
- [30] Sun, J., Zhou, Y., Ren, C., Wang, J., & Yang, Y. (2011). CFD simulation and experiments of dynamic parameters in gas-solid fluidized bed. *Chemical engineering science*, 66(21), 4972-4982.
- [31] Cornelissen, J. T., Taghipour, F., Escudí, R., Ellis, N., & Grace, J. R. (2007). CFD modelling of a liquid-solid fluidized bed. *Chemical Engineering Science*, 62(22), 6334-6348.
- [32] Panneerselvam, R., Savithri, S., & Surender, G. D. (2007). CFD based investigations on hydrodynamics and energy dissipation due to solid motion in liquid fluidised bed. *Chemical Engineering Journal*, 132(1), 159-171.
- [33] Huang, X. (2011). CFD modeling of liquid-solid fluidization: effect of drag correlation and added mass force. *Particuology*, 9(4), 441-445.
- [34] 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.
- [35] Goniva, C., Kloss, C., Deen, N. G., Kuipers, J. A., & Pirker, S. (2012). Influence of rolling friction on single spout fluidized bed simulation. *Particuology*, 10(5), 582-591.
- [36] Shah, M. T., Utikar, R. P., Tade, M. O., Pareek, V. K., & Evans, G. M. (2011). Simulation of gas-solid flows in riser using energy minimization multiscale model: effect of cluster diameter correlation. *Chemical engineering science*, 66(14), 3291-3300.
- [37] Zhang, H., Trias, F. X., Gorobets, A., Oliva, A., Yang, D., Tan, Y., & Sheng, Y. (2015). Effect of collisions on the particle behavior in a turbulent square duct flow. *Powder Technology*, 269, 320-336.
- [38] Neto, J. L., Martins, A. L., Neto, A. S., Ataíde, C. H., & Barrozo, M. A. S. (2011). CFD applied to turbulent flows in concentric and eccentric annuli with inner shaft rotation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(4), 636-646.
- [39] Han, S. M., Hwang, Y. K., Woo, N. S., & Kim, Y. J. (2010). Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 70(3), 308-319.
- [40] Zhang, F., Miska, S., Yu, M., Ozbayoglu, E., & Takach, N. (2016, November). An Eulerian Approach for Characterization of Solid Suspension in Multiphase Flow Systems and its Application in Hole Cleaning During Drilling. In ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp. V007T09A039-V007T09A039). American Society of Mechanical Engineers.
- [41] Fluent, A. N. S. Y. S. 16.2. (2015). "Fluent Theory Guide. ANSYS Help Viewer.
- [42] Liu, L. (2015). Effects of aggregation on the kinetic properties of particles in fluidised bed granulation. *Powder Technology*, 271, 278-291.
- [43] Fluent, A. N. S. Y. S. 16.2. (2015). "Fluent User Guide. ANSYS Help Viewer.
- [۴۴] هاشم آبادی، سید حسن و دهنوی، محمد علی. (۱۳۹۰). شبیه سازی جریان های چند فازي با نرم افزار fluent. تهران: اندیشه سرا.