

بررسی تأثیر تغییرات دما و فشار بر فیلتراسیون سیال حفاری به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

روناک اعظمی^۱، محسن ده ودار^{۲*}، احمدرضا ربانی^۳، یونس علیزاده^۴

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲. استادیار، دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران (Dehvedar@aut.ac.ir)
۳. استاد، دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۴. استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

یکی از چالش‌های مهم در صنعت نفت، کنترل میزان صافاب نفوذی درون سازند است. در این پژوهش، دما، فشار و اندازه ذرات به عنوان پارامترهای اصلی فرایند فیلتراسیون انتخاب شدند. آزمایش‌های استاندارد همراه با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی در نرم‌افزار انسیس فلونت انجام شد و مدل شبیه ساز با داده‌های آزمایشگاهی اعتبار سنجی گردید. نتایج نشان داد افزایش دما و فشار موجب افزایش میزان فیلترت می‌شود؛ با این تفاوت که دما اثر محسوس‌تری دارد. افزایش دما هر ۵۰ درجه فارنهایت، فیلترت را ۳۰ درصد و ضخامت کیک گل را ۵ درصد افزایش داد، در حالی که فشار در ۲۵۰ و ۵۰۰ psi ضخامت کیک را به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد کاهش داد. افزایش غلظت جامدها باعث کاهش فیلترت و افزایش ضخامت کیک گل شد. همچنین قطر بزرگ‌تر ذرات موجب افزایش فیلترت و ضخامت کیک گردید. در فرایند فیلتراسیون، ابتدا ذرات درشت رسوب کرده و با رشد کیک، سهم ذرات ریز بیشتر می‌شود. تشکیل کیک گل از نواحی کناری آغاز و در ۱۵۰ ثانیه نخست شبیه‌سازی بخش عمده آن شکل گرفت. افزایش غلظت ذرات پل‌زنی نیز فرایند پل‌زنی را سریع‌تر کرده و ریزش اولیه را کاهش داد. این مدل شبیه‌ساز با نتایج مطالعات پیشین همخوانی داشته و می‌تواند جایگزینی کم‌هزینه و دقیق برای دستگاه‌های گران‌قیمت آزمایش در دما و فشار بالا باشد. به‌طور کلی، تغییرات دما اثر بیشتری نسبت به فشار بر میزان فیلترت و ویژگی‌های کیک گل نشان داد و نتایج حاصل، راهکار مناسبی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی خواص فیلتراسیون گل‌های حفاری فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: فیلتراسیون، کیک گل، فیلتر پرس، شبیه‌سازی، دینامیک سیالات محاسباتی

۱- مقدمه

سیال حفاری به عنوان یکی از کلیدی‌ترین عوامل تعیین‌کننده در موفقیت یا شکست پروژه‌های حفاری شناخته می‌شود. این سیال به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم با تمامی چالش‌های حفاری در ارتباط بوده و نقش مؤثری در مدیریت و کاهش پیامدهای ناشی از این مشکلات ایفا می‌کند. [۱] سیالات حفاری پایه آبی به‌طور معمول از ترکیب آب و پلیمرهایی با ساختار شیمیایی و وزن مولکولی متغیر تشکیل می‌شوند. وظیفه این پلیمرها فراتر از افزایش ویسکوزیته فاز پیوسته بوده و شامل تثبیت ذرات وزن‌افزا و کاهش نفوذ

سیال به درون سازند تحت اختلاف فشار مثبت است. در واقع، نقش کلیدی پلیمرها در این سیالات، مدیریت بهینه فیلتراسیون، تنظیم خواص رئولوژیکی و ارتقای ثبات دیواره چاه خلاصه می‌شود. [۲]

فیلتراسیون یا صاف روی، فرآیندی است که در اثر اختلاف فشار مثبت رخ می‌دهد. این اختلاف فشار باعث نفوذ فاز مایع سیال حفاری (صافاب) به درون محیط متخلخل و بر جای ماندن ذرات جامد بر روی دیواره چاه می‌گردد. در مراحل اولیه فیلتراسیون و پیش از شکل‌گیری سد فیزیکی، پدیده هجوم گل به وقوع می‌پیوندد. با تداوم فرآیند، ذراتی که ابعاد آن‌ها از قطر حفرات سازند بزرگتر است، در دهانه حفره‌ها پل‌زنی کرده و با ایجاد لایه‌ای (کیک گل) با تراوایی بسیار ناچیز، نرخ نفوذ سیال را محدود می‌کنند. [۳] این لایه محافظت‌کننده، کیک گل خارجی نامیده می‌شود. ذرات کوچک‌تر نیز می‌توانند وارد منافذ محیط متخلخل شده و گذرگاه‌های عبوری محیط متخلخل را مسدود سازند که کیک گل داخلی را تشکیل می‌دهند. حجمی از فیلترات به صورت ناگهانی خارج خواهد شد. حجمی از صافاب که باید از گل خارج شود تا کیک تشکیل شود و تا زمانی که این حجم خارج نشده باشد، کیک گل تشکیل نمی‌شود. در واقع، این هدررفت اولیه می‌تواند به صورت تصاعدی ادامه یابد، مگر آنکه سیال حاوی ذرات جامد با توزیع سایز مناسب جهت پل‌زنی بر روی حفرات سازند باشد؛ فرآیندی که زیرساخت لازم برای تشکیل کیک گل را فراهم می‌کند. بر اساس اصول مکانیکی، تنها ذراتی با نسبت اندازه مشخص نسبت به قطر گلوبی حفرات، قادر به مشارکت در فرآیند پل‌زنی هستند. این ذرات با استقرار در دهانه حفرات، ساختاری پل‌مانند ایجاد کرده که منجر به به دام افتادن ذرات ریزتر و کلوئیدی می‌شود. با تکمیل این ساختار، نفوذ مواد جامد متوقف شده و تنها فاز مایع اجازه عبور به درون سازند را خواهد داشت [۴]

به‌طور کلی دو نوع فیلتراسیون ایستا^۱ و پویا^۲ وجود دارد. در سال ۱۹۳۷ دستگاه API فیلترپرس که توسط مؤسسه نفتی آمریکا (API) معرفی شده بود برای گزارش میزان صافاب سیالات معرفی شد. محیط متخلخل سنگ توسط کاغذی به نام کاغذ صافی شبیه‌سازی شده بود. [۵] باید توجه داشت که در سیالات حفاری، فیلتراسیون با هرزروی متفاوت است. [۶] فرگوسن به صورت آزمایشگاهی فیلتراسیون را برای گل‌های پایه آبی و پایه روغنی در دیواره چاه و زیر مته بررسی کرد و حجم نفوذ صافاب را در طی مراحل عملیات حفاری برای یک چاه آزمایشی تخمین زد. نتایج او نشان داد تقریباً ۹۵ درصد نفوذ صافاب در شرایط پویا صورت می‌گیرد و بقیه آن در شرایط ایستا رخ می‌دهند و حجم صافاب نرخ فیلتراسیون پویا بیشتر از حالت ایستایی است. [۷]

تفاوت بنیادین این دو در مکانیسم شکل‌گیری کیک گل نهفته است؛ در فیلتراسیون دینامیک، جریان سیال همواره نیروی برشی بر سطح کیک وارد می‌کند. در این حالت، ضخامت کیک تا زمانی افزایش می‌یابد که نرخ رسوب ذرات با نرخ سایش ناشی از جریان به تعادل برسد؛ پس از دستیابی به این ضخامت تعادلی، نرخ فیلتراسیون تثبیت می‌شود. در مقابل، در شرایط استاتیک، ضخامت کیک به‌طور پیوسته با زمان افزایش یافته که منجر به کاهش مستمر نرخ نفوذ صافاب می‌گردد. در نتیجه، در بازه‌های زمانی یکسان، کیک استاتیک ضخیم‌تر از کیک دینامیک بوده، اما نرخ فیلتراسیون نهایی در حالت استاتیک کمتر است. شایان ذکر است که ارزیابی استاندارد این خواص معمولاً از طریق آزمون API انجام می‌گیرد که مبنای آن سنجش فیلتراسیون در شرایط ایستا است [۸].

شینها عوامل تأثیرگذار بر تفاوت‌های بین مقادیر سیال نفوذی در شرایط آزمایشگاهی ایستا و پویا را برای بهبود پیش‌بینی رفتار نفوذی سیالات مورد استفاده در تکمیل چاه را بررسی نمود و تلاش کرد بهینه سرعت نفوذ سیال را به دست بیاورد که منجر به کاهش نفوذ سیال گردد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در صورت انجام آزمایش بر روی نمونه ماسه‌سنگی و نمونه مصنوعی با استفاده از سیالات سوسپانسیونی تحت شرایط ایستا و پویا، نتایج صافاب به‌دست‌آمده برای شرایط پویا کمتر از نتایج به‌دست‌آمده برای شرایط

¹ Static Filtration

² Dynamic Filtration

ایستا است. در صورت تکرار آزمایش با استفاده از سیالات دیزلی با رفتار ژلی یا بدون افزودنی‌ها، مقدار نفوذ سیال تقریباً برابر یا کمتر از مقدار به‌دست‌آمده تحت شرایط ایستایی است. علاوه بر این نمودار تجمعی حجم صافاب در برابر ریشه‌ای دوم زمان در دستگاه کارترین رسم گردید و نمودار به‌صورت خطی درآمد. [۹] ستاری نتیجه گرفت که بیشتر کیک گل تشکیل شده در زمان‌های اولیه آزمایش تشکیل می‌گردد. [۱۰]

با افزایش دمای گل حفاری، اثربخشی پلیمرها در گل حفاری کاهش می‌یابد. علاوه بر این، آنها تأثیر منفی نیز بر خواص فیلتراسیون گل حفاری دارند. با افزایش دما، ویسکوزیته پلاستیک و هم نقطه تسلیم کاهش می‌یابد. کربوکسی‌متیل سلولز با ویسکوزیته بالا اثر قابل توجهی بر کنترل فیلتراسیون داشت و افزایش مقدار کمی از غلظت آن باعث رشد قابل توجه ویسکوزیته گل شد. اکس سی پلیمر یک کنترل‌کننده قوی در فیلتراسیون مایعات نیست، با این حال اثر شوری بر این پلیمر ناچیز است. [۱۱]

نفوذ بیش از حد فیلترات گل مشکلات عدیده‌ای را مانند کاهش شدید نفوذپذیری سازند، آسیب به سازند به دلیل ورود صافاب و جامدات به سازند به وجود خواهد آورد. تجزیه و تحلیل میکرو سکوپ الکترونی روبشی (SEM) که بر روی مغزه‌ها انجام شد، روند مورد انتظار تهاجم ذرات را با عمق و زمان نشان داد. [۱۲]

الکاتاتی با سی‌تی‌اسکن نشان داد که کیک حاوی دو لایه با خواص متفاوت است. [۱۳] کیک گل فیلتری ناهمگن است. هر لایه حاوی دو لایه با خواص مختلف مانند ضخامت، تخلخل و نفوذپذیری است. هر لایه تفاوتی در فرآیند فیلتراسیون و تشکیل کیک فیلتر می‌گذارد. نتایج به‌دست‌آمده از سی‌تی‌اسکن نشان داد که یک‌زمان خمش در ۷٫۵ دقیقه فیلتر وجود دارد که در آن فرآیند از فشرده‌سازی به تجمع تغییر می‌کند. منطقه فشرده‌سازی قبل از ۷٫۵ دقیقه که در آن ضخامت لایه خارجی و داخلی کاهش یافته و تغییر زیادی در میانگین تخلخل در هر دو لایه وجود دارد. [۱۴]

همواره برای بررسی پدیده فیلتراسیون از روش‌های آزمایشگاهی استفاده شده است، روش آزمایشگاهی موانع و مشکلاتی را به پژوهش اعمال می‌کند بدین منظور نیاز به روشی جایگزین برای پوشش خلأهای موجود در روش آزمایشگاهی وجود داشته تا به بررسی دقیق‌تر این پدیده پرداخته شود؛ بنابراین استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و شبیه‌سازی این پدیده در ابتدای دهه ۹۰ میلادی ظهور نمود. فیشر یک روش عددی برای مدل‌سازی رشد کیک گل و تهاجم سیال در حین حفاری را توصیف کرد و یک مدل میکرو فیلتراسیون جریان متقاطع برای پیش‌بینی افزایش ضخامت کیک در روی دیواره در هر مرحله زمانی به وجود آورد. [۱۵] اشراقی و اوتماس نیز مدلی برای فیلتراسیون و تشکیل فیلتر کیک در حالت ایستا و پویا ارائه کردند. اشراقی با ساده‌سازی، معادلات موجود را به‌صورت تحلیلی حل کرده و با نتایج تجربی مقایسه کرد [۱۶] در حقیقت آنها حل اوتمانس [۱۷] را به روش عددی به دست آوردند. فیلیپس به کمک یک مدل عددی دریافت که کیک گل تشکیل شده بر روی سطح سازند باعث کاهش نرخ نفوذ سیال به درون سازند می‌شود. [۱۸] رفتار جریان سیال را می‌توان به دودسته سیالات نیوتونی و غیر نیوتونی دسته‌بندی کرد. سیالات نیوتونی دسته‌ای از سیالات هستند که بین تنش برشی و نرخ برش در آنها از طریق ویسکوزیته مولکولی رابطه خطی برقرار است. [۱۹]

شرایط مرزی در دینامیک سیالات، فرم گسسته معادلات برای حل در یک‌روند مخصوص و تعریف ویژگی جریان در مرزهای دامنه را انجام می‌دهند. قبل از شروع محاسبات شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، باید یک حدس اولیه به همراه مقادیر مشخص برای شروع حلگر تعیین گردد. در شبیه‌سازی، فرایند محاسبات یک‌بار صورت نمی‌گیرد و حلقه پرتکراری از محاسبات تا زمان رسیدن به همگرایی تکرار می‌شود؛ بنابراین برای انجام محاسبات، تنظیمات و مقادیری باید تعیین گردد. این مقادیر شامل تعداد و اندازه گام‌های محاسباتی است. اگر تعداد تکرارها برای رسیدن به همگرایی کافی نباشد، نتایج عددی دچار خطا خواهد شد. پس از همگرا شدن حل، اطلاعات موجود در تحلیل انجام شده به‌صورت مجموعه‌ای از داده‌ها، مورد پردازش قرار گرفته و می‌توان خروجی‌های موردنظر را استخراج نمود. [۲۰]

در پژوهشی مدل‌های بهبودیافته برای پیش‌بینی ضخامت کیک فیلتر تراکم‌ناپذیر و حجم فیلتراسیون را در شرایط ایستا و پویا توسعه داد. نتایج این مدل، بینشی تازه‌ای در مورد مکانیسم فیلتراسیون کیک تراکم‌ناپذیر و ابزارهای عملی برای تفسیر داده‌های تجربی، تخمین پارامترهای مدل و شبیه‌سازی فرایندهای فیلتراسیون خطی و شعاعی ارائه داد. [۲۱] یک مدل دینامیک سیالات محاسباتی چند فازي اوپلری را برای جریان جامد - مایع شبیه‌سازی نمود. در مطالعه، اثرات اندازه مش، گام زمانی و معیارهای همگرایی بررسی گردید. در نتایج این مدل روابط مختلف برای نیروی درگ بررسی گردید و پیش‌بینی‌ها با نتایج آزمایشگاهی مقایسه و نشان داده شد که نتایج بسیار نزدیک و مشابه بودند. [۲۲]

محمد و کبیر در مطالعه خود، فرآیند تشکیل کیک گل را در دو سناریوی حفاری عمیق و کم‌عمق با استفاده از نرم‌افزار ANSYS Fluent شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش، از مدل چندفازی اوپلری-اوپلری بهره گرفته شد که در آن معادلات بقای جرم (پیوستگی)، تکانه (مومنوم) و انرژی به‌طور مجزا برای هر فاز حل می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که ضخامت کیک گل در حفاری عمیق نسبت به حفاری کم‌عمق به‌مراتب بیشتر است. علاوه بر این، یافته‌های آن‌ها حاکی از آن است که افزایش قطر ذرات جامد در سیال، منجر به تشکیل کیک‌هایی با ضخامت بیشتر می‌شود. [۲۳] آقای صالحی برای تعیین نفوذپذیری با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلوئنت، نتایج مربوط به صافاب و کیک فیلتر مربوطه را با مدل عددی مقایسه و اعتبارسنجی نمود. [۲۴] رمضان جهت شبیه‌سازی تشکیل کیک گل در دو شرایط دما و فشار بالا در حفاری عمیق و در شرایط حفاری کم‌عمق رفتار سیالات غیر نیوتونی را با استفاده از رویکرد اوپلری - اوپلری مورد مطالعه قرار داد. [۲۵]

هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی تشکیل کیک گل در مقیاس آزمایشگاهی و در شرایط استاندارد استاتیک است. برای مدل‌سازی از شرایط از دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شد و فرآیند گسسته‌سازی با بهره‌گیری از تولید شبکه دقیق جهت حل معادلات حاکم صورت گرفت. کیفیت شبکه محاسباتی نقشی محوری در دقت، همگرایی و سرعت شبیه‌سازی بود؛ مطالعات استقلال از شبکه در نرم‌افزار انسیس فلوئنت، به عنوان گامی حیاتی انجام شد. پس از ایجاد یک شبکه بهینه، تحلیل با استفاده از هر دو مدل اوپلری-اوپلری و اوپلری-لاگرانژی برای شبیه‌سازی جریان جامد-سیال انجام گرفت. این مدل شبیه‌ساز با نتایج مطالعات پیشین همخوانی داشته و می‌تواند جایگزینی کم‌هزینه و دقیق برای دستگاه‌های گران‌قیمت آزمایش در دما و فشار بالا باشد. به‌طور کلی، تغییرات دما اثر بیشتری نسبت به فشار بر میزان فیلترات و ویژگی‌های کیک گل نشان داد و نتایج حاصل، راهکار مناسبی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی خواص فیلتراسیون گل‌های حفاری فراهم می‌کند. در این پژوهش سعی گردیده تا خلاهای موجود در شبیه‌سازی‌های گذشته تا حد امکان پوشش داده شده و پایه مناسبی برای تکمیل در آینده قرار گیرد و به بررسی اثر پارامترهایی چون غلظت ذره، اندازه ذره، دما و فشار مشخص شده بر میزان صافاب خروجی و ضخامت کیک گل توجه شود.

۲- معادلات حاکم

در فیلتراسیون، قانون دارسی^۳ به‌عنوان یک مدل جریان سیال در محیط متخلخل (مانند کیک گل)، در درک عوامل مؤثر کمک خواهد کرد. دبی حجمی ایجاد کیک گل با معادله ۱ توصیف می‌شود [۶ و ۲۶]

$$Q = \frac{KA}{\mu} * \frac{\Delta P}{L} \rightarrow \frac{dV_f}{dt} = \frac{KA}{\mu} * \frac{\Delta P}{h_{mc}} \quad \text{دبی فیلتراسیون: } \frac{dV_f}{dt}$$

K: نفوذپذیری کیک گل

³ Darcy's law

$$v_f = \frac{\sqrt{2K\Delta P \left(\frac{f_{sc}}{f_{sm}} - 1 \right) A \sqrt{t}}}{\sqrt{\mu}}$$

A : سطح مقطع کاغذ صافی

ΔP : افت فشار دو طرف کاغذ صافی

μ : گرانیوی فیلترات

h_{mc} : ضخامت کیک گل

f_{sm} : جز حجمی جامد در گل

f_{sc} : جز حجمی جامد در اندود صافی

V_F : حجم صافاب

T : مدت زمان

$$\frac{V_{F_2}}{V_{F_1}} \alpha \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}$$

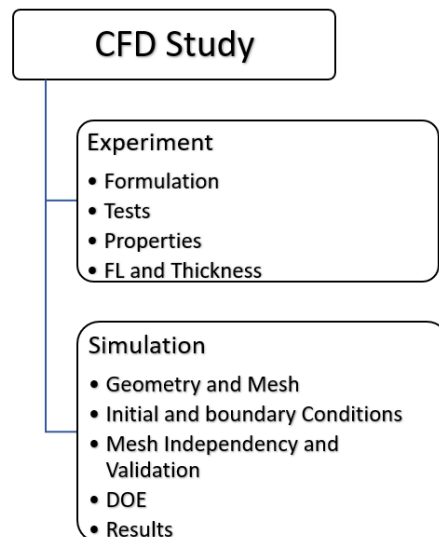
$$\frac{V_{F_2}}{V_{F_1}} \alpha \sqrt{\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}}$$

$$\frac{V_{F_2}}{V_{F_1}} \alpha \sqrt{\frac{t_2}{t_1}}$$

لارسن به این نتیجه رسید که اگر گلی در دما و فشار ثابت از بین کاغذ صافی عبور داده شود، نرخ فیلتراسیون عبوری با رادیکال زمان متناسب خواهد شد. [۲۶] هرچند این نتیجه برای تمام گل‌ها اتفاق نمی‌افتد؛ اما برای اهداف عملی به‌اندازه‌ای دقیق است که مبنای فیلتراسیون ایستا را تشکیل دهد. ریزش اولیه معمولاً به دلیل عبور ذرات کوچک‌تر گل از درون کاغذ صافی و مسدود کردن منافذ آن به وجود می‌آید که به آن خطا صفر نیز گفته می‌شود. پس از آن فقط فیلترات خارج می‌شود و منحنی حجم فیلتراسیون بر حسب زمان به‌صورت خطی می‌شود. ریزش اولیه اغلب کوچک است و در نظر گرفته نمی‌شود؛ اما اگر فیلتراسیون در برابر سنگ‌های متخلخل اتفاق بیفتد قابل ملاحظه بوده و باید اعمال گردد.

۳- مواد و روش آزمایش

در این بخش همانگونه که در شکل ۱ دیده می‌شود، روش انجام این تحقیق شرح داده شده است.



شکل ۱- مراحل تحقیق حاضر

Fig. 1. Stages of the present study

اگر سیالی با وزن بالا لازم نباشد، جایگزینی ماده وزن افزا بر پایه کلسیم کربنات^۴، امری منطقی به نظر می رسد. ماده وزن افزای کربناتی، علاوه بر ارزان تر بودن، سایش کمی ایجاد می کند و وقتی که حفاری در سازندهای مولد صورت می گیرد بسیار با اهمیت است و به آسانی در اسید هیدروکلریک حل می شود. همچنین قابلیت پل سازی در سطح دیواره چاه داشته و کیفیت کیک گل را بالا می برد. مصرف این ماده جهت کنترل فیلتراسیون، برای پوشاندن نواحی نفوذپذیر و نواحی شکسته شده بسیار مؤثر است. در این پژوهش سیال حفاری مورد نظر شامل آب، اکس سی پلیمر^۵، کربوکسی متیل سلولز^۶ [۲۷] و کلسیم کربنات [۲۸] در سه اندازه متفاوت (درشت، متوسط و ریز) است که مشخصات هر یک در جداول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مواد مورد استفاده برای ساخت گل و اندازه ذرات کلسیم کربنات

Table 1. Materials used for mud formulation and calcium carbonate particle size distribution

Group Name	Additives and Materials		Role	Amount	Mixing Time (min)
(CFD Model Verification)	Water		Continuous phase	350 cc	
	CMC		Viscosifier	0.5 g	5
	XC Polymer		Viscosifier	1 g	5
	Calcium Carbonate	Coarse (24 μ)	Weighting agent Bridging Agent	30 g	5
	Calcium Carbonate	Medium (13 μ)	Weighting agent Bridging Agent		5
	Calcium Carbonate	Fine (7 μ)	Weighting agent Bridging Agent		5

تجهیزاتی که در این پژوهش از آن ها برای تهیه نمونه ها، اندازه گیری خواص و انجام آزمایش استفاده شده است در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۲- تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده

Table 2. Laboratory equipment used

	Equipment Name	Technical specifications
1	Mixer	Hamilton variable speed with 1.3 horsepower and three variable speed ranges
2	Mud Balance	Diaeco brand in four scales ppg, SG, PCF and pam per thousand feet

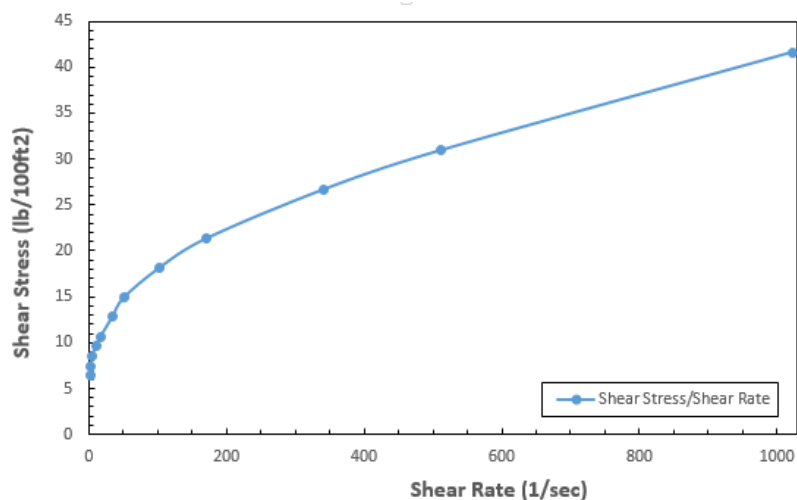
⁴ Calcium carbonate

⁵ XC-Polymer

⁶ Carboxymethyl cellulose

3	API Filter Press	Diaeco brand with 100 pam pressure difference and ambient temperature and stainless steel material and 400 cc capacity
4	Rotational Viscometer	3,6,10,20,30,60,100,200,300,600 with an accuracy of 0.1 rpm Upgraded fan 35 with 12 speeds
5	Scale	With an accuracy of 0.01
6	Filtrate Paper	Whatman paper with grade 42 and serial 1442-090

در این آزمایش‌ها برای این که بتوان از وقوع خطا تا حد امکان جلوگیری کرد، سعی شده است تمام نمونه‌های گل به یک شیوه آماده شده تا شرایط همگی یکسان باشد. روش آماده سازی نمونه‌ها بدین صورت است که ابتدا مقدار ۳۵۰ سی سی آب مقطر را داخل ظرف مخصوص همزن ریخته، سپس دور دستگاه را ۶۰۰ دور بر دقیقه^۷ قرار داده تا عمل هم زدن شروع گردد. سپس پلیمر کربوکسی متیل سلولز را به مرور اضافه کرده و به مدت ۵ دقیقه نمونه، هم زده می شود. سپس این مراحل برای اکس سی پلیمر و همچنین کلسیم کربنات تکرار می گردد تا سیال حفاری یکنواخت شود. در نهایت به مدت ۱۰ دقیقه هم زدن را با سرعت بالاتر ادامه داده تا سیال کاملاً آماده شده و بتوان بررسی‌های لازم را بر روی نمونه‌ها انجام داد.



Flow Constant Coefficient (k)	Behavior Index Deviation (n)	Yield Stress (pa)	Apparent Viscosity (cp)	Mud Weight (ppg)
1.2	0.39	6.4	19.5	8.6

Experiment number	Experiment name	Size of calcium carbonate particles	Temperature (Fahrenheit)	Pressure difference (Psi)	Mass of calcium carbonate (grams)
-------------------	-----------------	-------------------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------------

⁷RPM

1	EXP-M30-P100-T80-CM	Coarse Medium	80	100	30
2	EXP-M30-P100-T80-CMF	Coarse Medium Fine	80	100	30

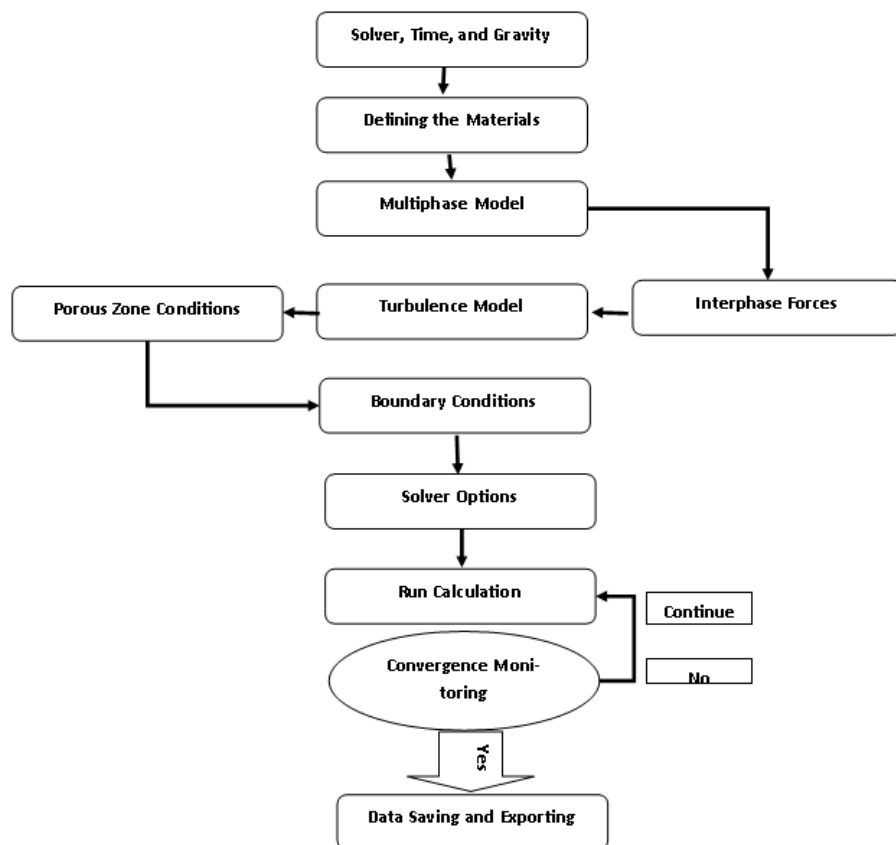
شکل ۲- نمودار تنش برشی و نرخ برشی سیال حفاری مورد آزمایش و خواص رئولوژی آن در تست به کمک ویسکومتر ۱۲ سرعتی

Fig. 2. Shear stress vs. shear rate flow curve and rheological properties of the tested drilling fluid using a 12-speed viscometer

در شکل ۲ با رسم نمودار تنش برشی بر حسب نرخ برشی و مقایسه با نمودار رفتار سیالات می توان نتیجه گرفت سیال از نوع غیر نیوتونی هرشل بالکلی^۸ بوده و خواص رئولوژیکی آن^۵ شرح داده شد. یکی از اصلی ترین و پرکاربردترین دستگاه هایی که در آزمایشگاه سیالات حفاری استفاده می شود، دستگاه فیلتر پرس است. این دستگاه دارای یک سلول است که بر روی یک پایه قرار می گیرد. در داخل این محفظه یک توری با مش مشخص و بر روی آن نیز کاغذ فیلتر پرس قرار گرفته است. ابتدا ۳۵۰ سی سی از سیال حفاری داخل این محفظه ریخته می شود. در بالای محفظه به اندازه ۵-۱ سانتی متر فضای خالی باقی می ماند که جهت اعمال فشار با گاز کربن دی اکسید یا هوا است. فنجان بالایی محفظه به یک رگلاتور جهت تنظیم فشار متصل شده و رگلاتور تنظیم فشار کمپرسور را بر روی ۱۱۵ پام تنظیم کرده تا به فضای خالی بالای سیال حفاری فشار موردنظر اعمال گردد که این فشار نیز به منزله اختلاف فشار بین سازند و گل حفاری در داخل چاه خواهد بود. این تست به مدت ۳۰ دقیقه با همین فشار ادامه می یابد و در انتها، حجم فیلترات جدا شده از سیال و همچنین ضخامت کیک گل تشکیل شده روی کاغذ فیلتر پرس اندازه گیری و گزارش داده می شود.

در ادامه با توجه به مفاهیم ارائه شده، نتایج حاصل از آزمایش ها و با استناد بر پژوهش های پیشین [۲۳ و ۲۴] تنظیمات شبیه سازی اعمال می گردد. ابتدا مدلی از هندسه دستگاه فیلتر پرس طراحی شده و شبکه بندی آن انجام می گردد. سپس تنظیمات و مدل های حاکم بر جریان سیال آن اعمال شده و در نهایت شبیه سازی می شود. در شکل ۳ الگوریتم کلی شبیه سازی مدل موردنظر در نرم افزار فلوئنت شرح داده شده است.

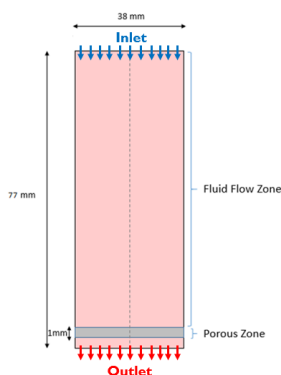
⁸ Herschel-Bulkley



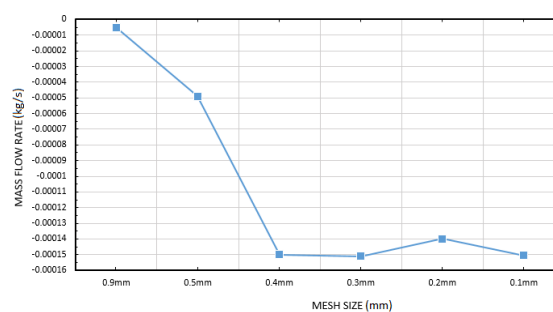
شکل ۳- الگوریتم کلی شبیه‌سازی مدل

Fig.3. Overall flowchart of the simulation process

مدل در ابعادی مطابق با دستگاه فیلتر پرس موجود در آزمایشگاه طراحی گردیده است که به صورت یک صفحه دوبعدی در صفحه XY است؛ اما برای کاهش هزینه‌های محاسباتی، هندسه مدل به صورت متقارن محوری^۹ با نصف ابعاد، در نظر گرفته شده است که در شکل ۴، مدل طراحی شده آن مشاهده می‌شود.



Geometry



Mesh Independency

شکل ۴- نمودار بررسی استقلال شبکه مش و هندسه مدل

^۹ Axisymmetric

Fig. 4. Grid independence study and model geometry

شبکه به صورت ساختارمند در نظر گرفته شده و روش‌های زیر در آن اعمال گردیده است. اندازه شبکه‌ها ۰/۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد که مقدار آن با استفاده از استقلال شبکه تأیید گردید. به دلیل ساده و منظم بودن هندسه، بهترین روش، شبکه هیبرید است.

در فرایند بررسی استقلال حل از شبکه، هدف یافتن درشت‌ترین شبکه‌ای است که با استفاده از آن می‌توان تابع موردنظر را (نرخ جرمی جریان) با دقت مطلوبی شبیه‌سازی کرد؛ بنابراین دقت حل کاملاً به ساختار و اندازه شبکه وابسته است و با افزایش تعداد سلول‌های شبکه، حجم محاسبات و زمان لازم برای شبیه‌سازی افزایش می‌یابد؛ بنابراین گام اول در بررسی استقلال حل از شبکه این است که یک شبکه با اندازه درشت تولید کرده و شبیه‌سازی با استفاده از آن انجام شود. در این شبیه‌سازی باتوجه به ابعاد هندسه، شش نوع شبکه‌بندی، تولید شده و هر بار شبیه‌سازی فرایند موردنظر با آن انجام گردید. تعداد شبکه‌ها به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه‌بندی تا زمانی تغییر می‌یابد که پروفیل‌های نرخ جریان جرمی بر هم منطبق گردند. با توجه به شکل بالا، شبکه ۰/۴ میلی‌متر جهت ادامه حل مسئله باتوجه به زمان لازم برای انجام محاسبات انتخاب گردید.

مقدار نسبت تصویر در حالت کمینه ۱/۰۰۵۷ و بیشینه برابر با ۱/۲۷۲۵ شده است که هرچه مقدار آن به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، شبکه باکیفیت‌تر است. مقدار چولگی در حالت کمینه برابر 1.3057e-10 و مقدار بیشینه آن 5.4071e-6 شده است که هرچه مقدار آن به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، شبکه باکیفیت‌تری است؛ بنابراین باتوجه به جدول ۳ می‌توان نتیجه گرفت مش ۰/۴ میلی‌متر از دقت بالایی برخوردار است. (جدول ۳)

جدول ۳- مقادیر چولگی، نسبت ابعاد و کیفیت شبکه در مش‌های مختلف

Table 3. Skewness, aspect ratio, and mesh quality for different grid configurations

MESH SIZE	MESH TYPE	ELEMENT QUALITY		ASPECT RATIO		SKEWNESS	
		MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
0.9mm	Tetrahedral	0.99	0.99	1.00	1.13	1.3e-10	0.0007
0.5mm	Tetrahedral	0.98	0.99	1.00	1.15	1.3e-10	2.16e-6
0.4mm	Tetrahedral	0.97	0.99	1.00	1.27	1.3e-10	7.97e-5
0.3mm	Tetrahedral	0.97	0.99	1.00	1.25	1.3e-10	3.6e-6
0.2mm	Tetrahedral	0.99	0.99	1.00	1.00	1.3e-10	5.4e-6
0.1mm	Tetrahedral	0.98	0.99	1.00	1.02	1.3e-10	0.0004

مدل در فضای دوبعدی و با نصف ابعاد دستگاه آزمایشگاهی به صورت متقارن محوری طراحی گردید. نرم‌افزار با این روش به صورت قرینه، تنظیمات را برای نیمه دیگر مدل فرض می‌کند تا نتایج با همان دقت در زمان کمتری حاصل گردد. برای فعال سازی انتقال حرارت و اعمال دما در بخش تنظیمات مدل، قسمت انرژی را انتخاب کرده و فعال می‌گردد.

در شبیه‌سازی ترکیب آب، کربوکسی‌متیل سلولز و اکس سی پلیمر با یکدیگر به عنوان سیال حفاری و به صورت فاز اولیه در نظر گرفته شده که خواص جریانی آن باتوجه به مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مطابق شکل ۲ تعیین می‌گردد. کلسیم کربنات به عنوان ذرات جامد و فاز ثانویه در اندازه‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود. مقادیر چگالی و ویسکوزیته نیز در تنظیمات این بخش باتوجه به خواص سیال انتخاب شده وارد می‌گردد. ذرات جامد به صورت مایع با چگالی ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب فرض گردید تا در شبیه‌سازی به صورت جامد در نظر گرفته شود. مدل سیال حفاری به صورت مدل غیر نیوتونی هرشل بالکلی با چگالی ثابت در نظر گرفته شده است.

در هر آزمایش تعداد فازها بین ۳ تا ۵ فاز انتخاب شده است که هوا در شبیه سازی به عنوان فاز ورودی جهت اعمال فشار است. نوع granular viscosity و granular bulk viscosity به ترتیب از نوع syamlal Obrien و lun et al در نظر گرفته شد. همچنین نیروهای درگ بین فاز مایع و جامد به صورت Syamlal-obrien و بقیه فازها به طور پیش فرض Schiller-newman فرض گردید. [۲۴]

شرط مرزی ورودی به صورت ورودی فشار^{۱۰} و شرط مرزی خروجی به صورت دریچه خروجی^{۱۱} در نظر گرفته می شود. [24] فشار در ناحیه مرزی ورودی معادل ۱۰۰ psi و فشار خروجی برابر با صفر در نظر گرفته می شود و در آزمایش های بررسی اثر فشار، تنها با تغییر مقدار فشار در ناحیه مرزی ورودی شبیه سازی صورت می گیرد. برای اعمال تنظیمات مربوط به ناحیه متخلخل در بخش cell zone condition پس از انتخاب ناحیه متخلخل، در قسمت تخلخل مقادیر نفوذپذیری و تخلخل را به ترتیب برابر ۰/۱ میلی دارسی و ۰/۰۱ قرار داده و میزان مقاومت در برابر حرکت هر کدام از فازها با توجه به معکوس مقدار نفوذپذیری در این بخش اعمال می گردد. هنگام استفاده از محیط متخلخل توصیه می شود که حتماً از مقداردهی اولیه استاندارد استفاده شود تا شرایط مرزی و میدان سرعت اولیه غیر واقعی محاسبه نشود. عموماً مقدار دما و فشار عملکردی به صورت پیش فرض برابر با مقادیر محیط قرار می گیرد؛ اما در مسائل فشار مبنا در محاسبات وارد نشده و تأثیری در همگرایی نخواهد داشت. برای پخش ذرات جامد در سیال با استفاده از تنظیمات patch در قسمت مقداردهی اولیه، کسر حجمی هر یک از مواد مشخص می گردد. (در آزمایش های ۳۰ گرم: سیال ۹۷ در صد و ذرات جامد: ۳ در صد؛ در آزمایش ۹۰ گرم: سیال ۹۱ در صد و ذرات جامد: ۹ در صد) با توجه به تأثیر مستقیم شبکه بندی بر نحوه پخش ذرات، تقسیم مدل به شبکه های کوچک باعث می شود هر یک از این شبکه ها در هنگام پیچ کردن مقدار ثابت تعیین شده از کسر حجمی مواد یا دمای مورد نظر را به خود اختصاص داده و در لحظه شروع محاسبات هر یک از این شبکه ها با مقادیر خود در محاسبات شرکت کنند. دمای مورد نظر در هر آزمایش نیز در این قسمت به کل ناحیه مدل اعمال شده و دمای هر یک از فازها نیز تعیین می گردد. در نهایت، تمامی تنظیمات مربوطه اعمال شده و محاسبات آغاز می گردد. به کمک پارامترهای تعیین شده در بخش تنظیمات نرم افزار فلوئنت، حل تا زمان همگرایی ادامه پیدا می کند. بعد از رسیدن به همگرایی، جواب های استخراجی ذخیره و تحلیل خواهند شد. مشخصات سیستم و نرم افزاری که شبیه سازی توسط آن انجام گردیده است به صورت زیر است:

CPU (Intel Core i9 3.7 GHz), GPU (nVidia GeForce 3070), Ram (64 GB), SSD (1 TB) and Ansys Fluent (v2022 R1)

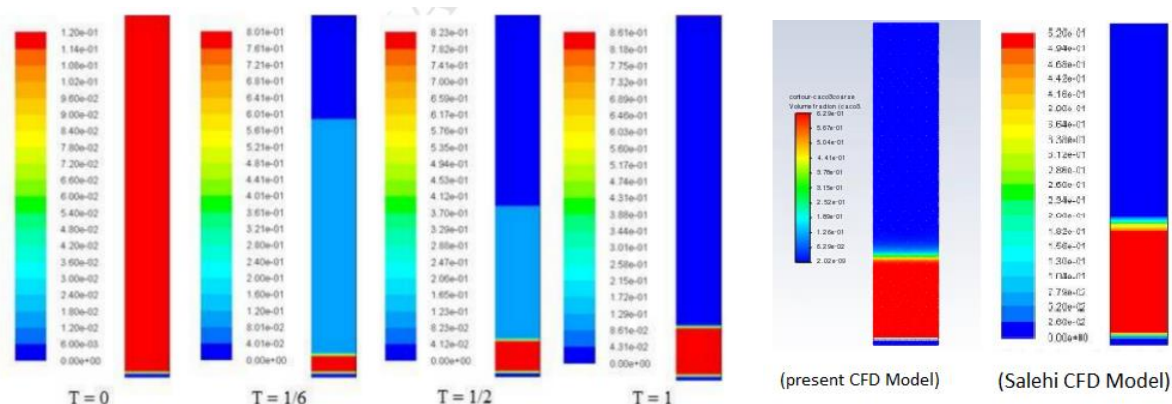
دینامیک سیالات محاسباتی آگاهی از رفتار جریان است و نه به دست آوردن اعداد دقیق، بنابراین تنها در صورتی می توان از نتایج استفاده نمود که حتماً اعتبار سنجی شده باشند. بدین منظور برای اعتبار سنجی مدل، نتایج حاصل از شبیه سازی را با داده های آزمایشگاهی مقایسه نموده و اگر نتایج به هم نزدیک باشد، مدل مورد قبول واقع خواهد شد و می توان ادامه آزمایش ها را برای حالت های دیگر و متنوع استفاده کرد. لازم به ذکر است که در مدل های ساخته شده در این نرم افزار میزان خطا می تواند از ۱۰ تا ۲۰ درصد تغییر کند. از روش هایی مثل مقایسه با نتایج آزمایشگاهی و مقایسه با نتایج مقالات چاپ شده معتبر می توان جهت اعتبار سنجی استفاده نمود.

در این پژوهش نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی و مقالات چاپ شده [۲۴] مقایسه شده و اعتبار سنجی بر پایه هر دو صورت گرفته است. صالحی سیال پایه آبی را به همراه ذرات گرانولار کلسیم کربنات در سایز ۴۰ میکرون با استفاده از مدل اولرین در مدلی دوبعدی به صورت فشار مبنا در ناحیه متخلخلی به ضخامت ۵ میلی متر شبیه سازی نمود و فرایند فیلتراسیون بر

¹⁰ Pressure Inlet

¹¹ Outlet vent

روی ناحیه متخلخل را مطابق شکل ۵ در چهار بازه زمانی تحلیل کرد. برای اعتبار سنجی تنظیمات و اطمینان از اعمال نیروی بین ذرات از جمله درگ، ویسکوزیته دانه‌ای و... مدلی مشابه با مدل صالحی در نظر گرفته شد تا پارامترهای یکسان در آزمایش‌ها، شبیه‌سازی شده و نتایج باهم مقایسه گردد. در نهایت باتوجه به شباهت زیاد نتایج در شکل ۵، اعتبار تنظیمات اعمال شده در آزمایش‌های بعدی اطمینان حاصل گردید.



Simulation Results [24]

Comparing Simulation [24] and the present study

شکل ۵- نتایج حاصل از شبیه سازی و پژوهش حاضر

Fig. 5. Simulation results obtained from the present study

جدول ۴- تنظیمات انسیس فلوئنت

Table 4. ANSYS Fluent simulation setup and solver parameters

General	
Solver Type	Pressure Based
Solver Time	Transient
2D space	Axisymmetric
Gravity	X +9.81
Models	
Multiphase	Eulerian
Viscous	Laminar
Energy	On
Materials	
Water liquid	Water – CMC – XC Polymer
Air	Air
Calcium Carbonate	Calcium carbonate(coarse/medium/fine)
Cell zone condition	
Laminar zone – porosity: 0.01 - permeability: 0.9 Md	
Boundary condition	
Pressure Inlet	Inlet pressure : 100 psi
Pressure Outlet	Outlet pressure: 0 psi
Methods	
Scheme	Coupled
Gradient	Least squares cell based
Pressure	PRESTO
Momentum	First order upwind
Volume fraction	First order upwind
Turbulent kinetic energy	First order upwind
Initialization	
Initialization method	Standard initialization
Calculation	
Type	Adaptive
Total time	450 sec
Time step	1e-05
Max iteration	200

تنظیمات برای همه آزمایش‌ها به صورت یکسان در نظر گرفته شده و تفاوت اصلی در دما، فشار، کسر حجمی و اندازه قطر ذرات است.

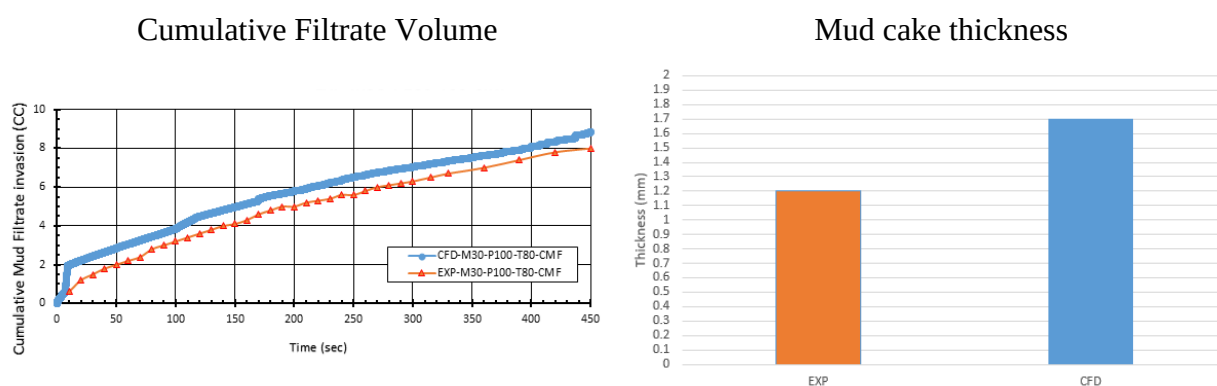
Test Type	Carbonate Calcium (g)	Diff Pressure (psi)	Temperature (F)	Particle Size	Test Code
EXP	M30=30 g	P100=100 psi	T80=80 F	Coarse	EXP-M30-P100-T80-CM
CFD	M90= 90 g	P250= 250psi	T200 = 200 F	Medium	
		P500= 500 psi	T250= 250 F	Fine	
Base Test		Particle Size		Temperature and Pressure	
CFD-M30-P100-T80-CM		CFD-M30-P100-T250-C		CFD-M30-P250-T200-CM	
CFD-M30-P100-T80-CMF		CFD-M30-P100-T250-M		CFD-M30-P500-T250-CM	
Temperature		CFD-M30-P100-T250-F		CFD-M30-P500-T250-CMF	
CFD-M30-P100-T200-CM		Pressure		CFD-M30-P500-T250-CMF	
CFD-M30-P100-T250-CM		CFD-M30-P250-T80-CM		Concentration	
		CFD-M30-P500-T80-CM		CFD-M90-P100-T80-CMF	

شکل ۶- فرمول بندی آزمایش ها و آزمایش های تعیین شده برای شبیه سازی

Fig. 6. Experimental formulation and designated test matrix for the simulation study

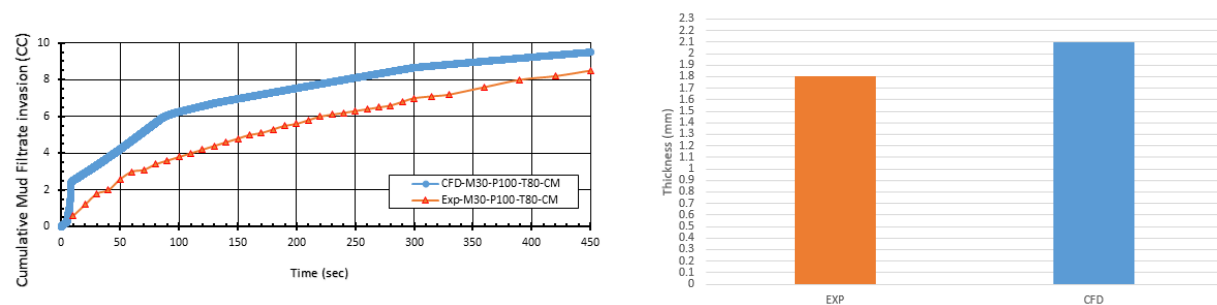
۴- نتایج و بحث

افزودن مقدار ۳۰ گرم کلسیم کربنات شامل ۲ سایز بزرگ و متوسط، در دمای محیط و اختلاف فشار ۱۰۰ psi برای اعتبار سنجی نسبت به نتایج آزمایشگاهی تعیین گردید. مقدار تجمعی فیلترات خروجی در ۷/۵ دقیقه شبیه سازی و آزمایشگاهی به ترتیب ۹/۴۷ و ۸/۵ سی سی است. نمودار آزمایش ها و حالت مقایسه ای آن ها در شکل ۷ آورده شده است.



CFD-M30-P100-T80-CMF, EXP-M30-P100-T80-CMF

$$\% \text{ Error(Filtrate) } = \left| \frac{8.86 - 8}{8} \right| * 100 = 10.75 \%$$



CFD-M30-P100-T80-CM و EXP-M30-P100-T80-CM

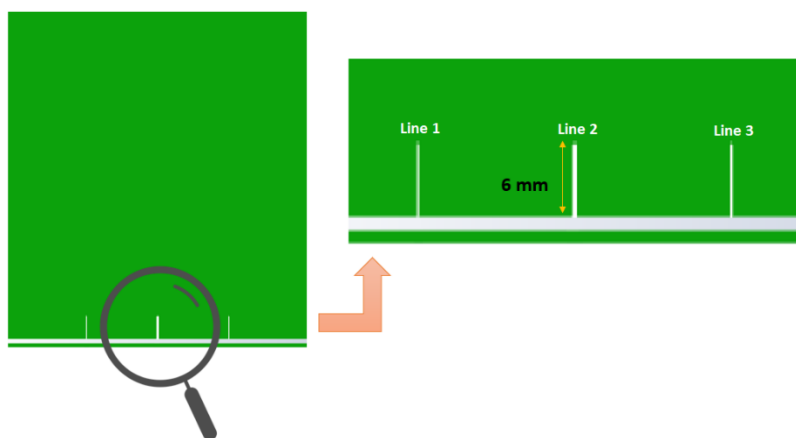
$$\% \text{ Error(Filtrate) } = \left| \frac{9.47 - 8.5}{8.5} \right| * 100 = 11.41 \%$$

شکل ۷- اعتبار سنجی مدل CFD با تست آزمایشگاهی و گزارش میزان درصد خطا

Fig. 7. Validation of the CFD model results against experimental data with reported error percentages

باتوجه به اینکه روند کلی نمودار آزمایش‌ها شبیه به هم بوده و داده‌های شبیه‌سازی نسبت به آزمایشگاهی دارای درصد خطا پایینی هستند پس می‌توان نتیجه گرفت آزمایش اعتبار سنجی شده و نتایج حاصل از آن قابل قبول است و می‌توان آزمایش‌های بعدی را نیز شبیه‌سازی کرد. از آن جایی که روند کلی نمودارهای فیلترات باهم مطابقت داشته و مقدار درصد خطا تست شبیه‌سازی نسبت به آزمایشگاهی کمتر از ۱۵ درصد است پس شبیه‌سازی اعتبار سنجی شده و نتایج مورد قبول هستند؛ لذا می‌توان آزمایش‌های دیگری با مقادیر کلسیم کربنات، شرایط دما و فشار متفاوت تعریف و شبیه‌سازی کرد. هندسه مدل بر اساس دستگاه فیلتر پرس API فرض گردیده است. نتایج بر اساس هفت و نیم دقیقه آزمایش در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی ترکیب آب و پلیمر ها به عنوان یک فاز در نظر گرفته شده است.

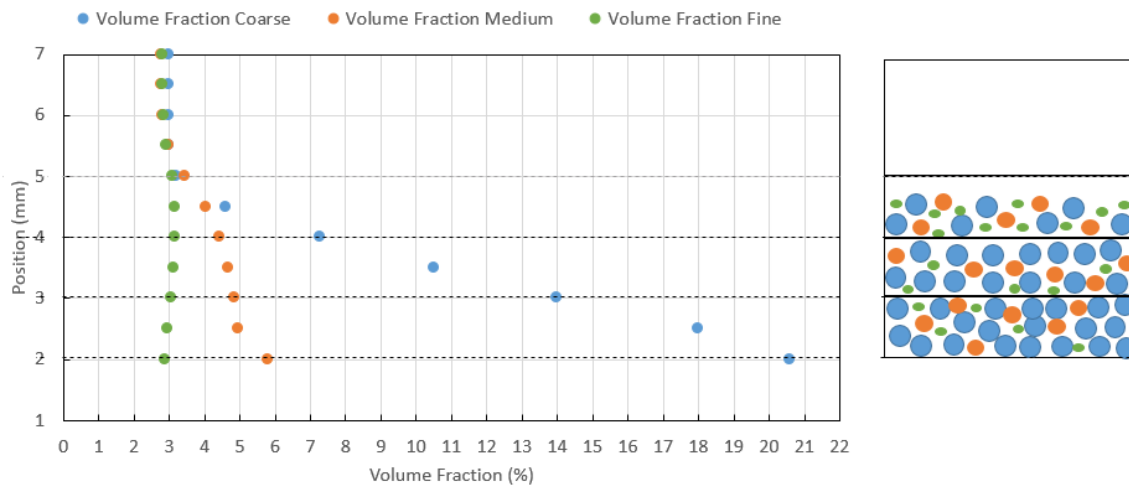
برای اندازه‌گیری ضخامت کیک گل در شبیه‌سازی‌ها، خط شاخصی بر روی ناحیه متخلخل طبق شکل ۸ تعیین می‌شود که می‌توان مقدار کسر حجمی ذرات با اندازه‌های مختلف را نسبت به موقعیت مکانی آن‌ها از روی ناحیه متخلخل ر صد نمود. نتایج مربوط به آزمایش‌ها در جدول ۴ آورده شده است.



شکل ۸- خط شاخص در محیط متخلخل جهت تعیین ارتفاع کیک گل

Fig. 8. Indicator line in the porous media for mud cake thickness determination

با انطباق نتایج کسر حجمی سه ذره درشت، متوسط و ریز بر روی هم و رسم نمودار موقعیت مکانی بر حسب کسر حجمی می‌توان قرارگیری ذرات ریز و متوسط در میان ذرات درشت را در شکل ۹ مشاهده نمود.



شکل ۹- نمودار انطباقی کسر حجمی سه ذره درشت، ریز و متوسط نسبت به موقعیت مکانی در آزمایش

.CFD-M90-P100-T80-CMF

Fig. 9. Comparison of volume fraction profiles for coarse, medium, and fine particles versus position in case CFD-M90-P100-T80-CMF

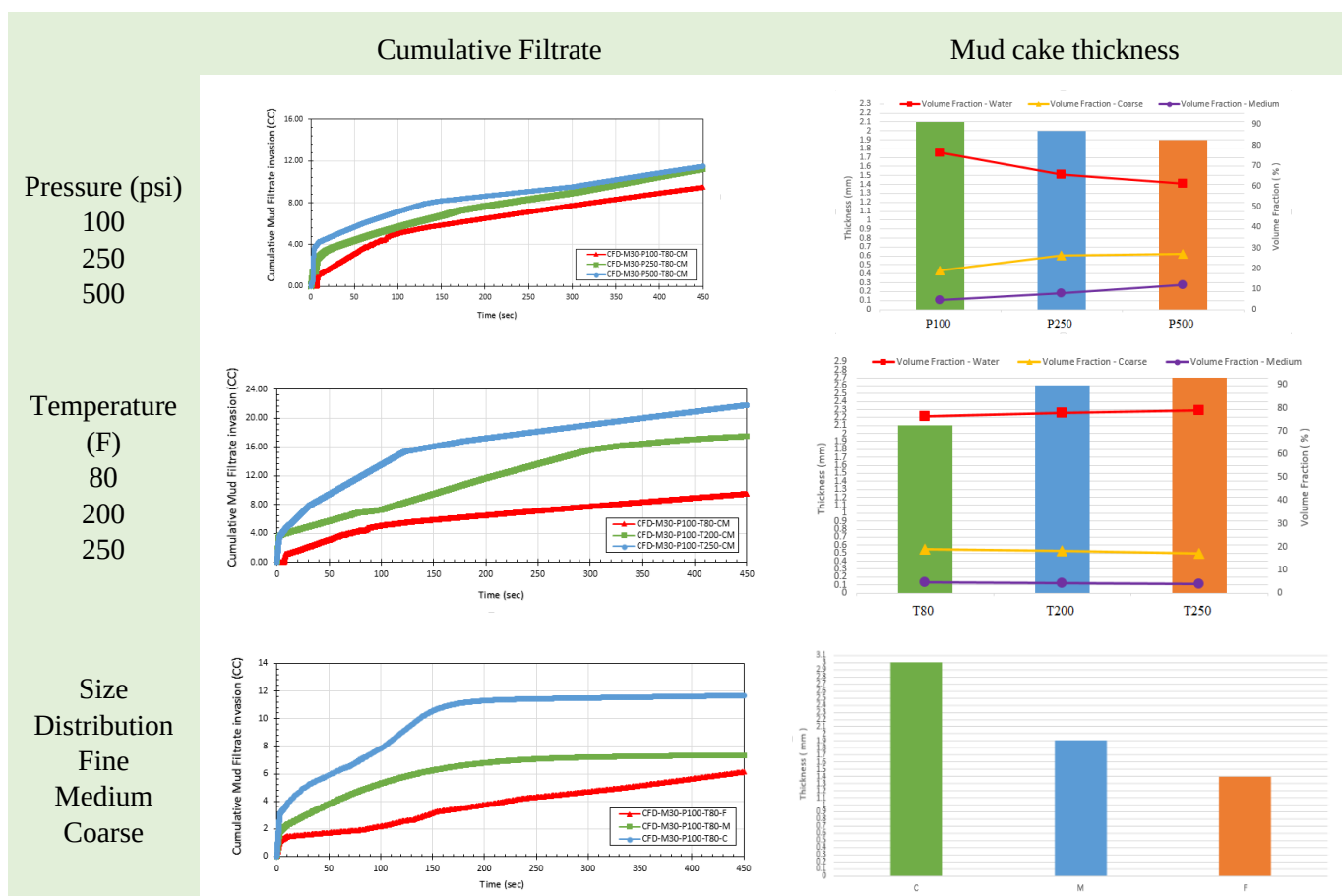
همانگونه که در شکل ۱۰ دیده می شود، در ۱۵۰ ثانیه ابتدایی اثر افزایش فشار محسوس بوده و منجر به افزایش میزان فیلترات و ریزش اولیه گردیده است و از ۱۵۰ تا ۳۰۰ ثانیه پل زنی به طور کامل صورت گرفته و یک گل تشکیل شده است. از ثانیه ۳۰۰ تا ۴۵۰، نمودارهای فشار ۲۵۰ و ۵۰۰ psi همگرا شده و نشان دهنده این موضوع است که افزایش فشار از ۳۵۰ ثانیه به بعد دیگر تأثیر محسوسی بر میزان فیلترات خروجی نخواهد داشت و نرخ فیلتراسیون ثابت می گردد؛ بنابراین، افزایش فشار تقریباً در هر دو حالت منجر به افزایش ۱/۲ برابری میزان فیلترات در ۴۵۰ ثانیه می شود؛ اما نرخ نفوذ فیلترات به داخل سازند در لحظات ابتدایی بیشتر است؛ یعنی فشار بر میزان ریزش اولیه تأثیر گذاشته و مقدار آن را افزایش داده است پس اهمیت کنترل این موضوع در لحظات اولیه بیشتر بوده و باید تمهیدات لازم جهت کاهش حداکثری آسیب سازند صورت گیرد. افزایش ۲/۵ و ۵ برابری فشار به ترتیب باعث کاهش ۵ و ۱۰ درصدی ضخامت کیک می گردد؛ همچنین کسر حجمی ذرات افزایش و رطوبت کیک گل کاهش یافته است.

نمودارهای فیلترات تجمعی در حالات دما ۸۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ درجه فارنهایت حاصل شده از شبیه سازی با یکدیگر مقایسه شده و نتایج زیر حاصل می گردد. در ۱۵۰ ثانیه ابتدایی، افزایش دما منجر به افزایش میزان فیلترات و ریزش اولیه گردیده است. افزایش دما منجر به افزایش کلی میزان فیلترات در ۴۵۰ ثانیه شده است. از ثانیه ۳۰۰ تا ۴۵۰، نمودارها نرخ ثابتی پیدا کرده اند؛ اما همگرایی میان آن ها صورت نگرفته است که نشان می دهد تأثیر افزایش دما در افزایش میزان فیلترات، بیشتر از تأثیر فشار است. بنابراین به ازای هر ۵۰ درجه فارنهایت افزایش دما، میزان فیلترات ۳۰ درصد افزایش یافته است. افزایش دما ضخامت کیک گل را افزایش داده است همچنین کسر حجمی ذرات جامد و رطوبت گل به ترتیب کاهش و افزایش داده است. بنابراین به ازای هر ۵۰ درجه فارنهایت افزایش دما، میزان ضخامت کیک گل ۵ درصد ضخیم شده است.

هرچه اندازه ذرات بزرگ تر می شود، میزان فیلترات خروجی، ریزش اولیه و همچنین ضخامت کیک گل هم بیشتر می شود. افزایش اندازه از ریز به متوسط منجر به افزایش ۱/۲ برابری فیلترات گردیده است. همچنین به طور مشابه با تغییر اندازه ذرات از متوسط به درشت میزان فیلترات ۱/۶ برابر افزایش یافته است. افزایش دو برابری اندازه ذرات منجر به افزایش ۳۰ درصدی ضخامت کیک گل گردیده است.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش میزان غلظت ذرات جامد موجب کاهش میزان ریزش اولیه گردیده و تا ثانیه ۲۵۰، نرخ فیلتراسیون در دو نمودار نسبتاً مشابه است؛ اما در ۲۰۰ ثانیه پس از تشکیل کیک گل، نرخ فیلتراسیون در آزمایش ۹۰ گرم بسیار کاهش پیدا کرده است و افزایش ۳ برابری غلظت منجر به افزایش ۲/۶ برابری ضخامت کیک گل گردیده است؛ بنابراین به‌طور کلی با افزایش غلظت ذرات جامد میزان فیلترت و ضخامت کیک گل در ۴۵۰ ثانیه به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.

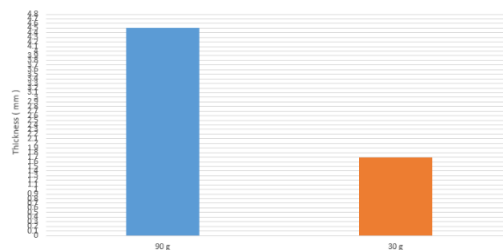
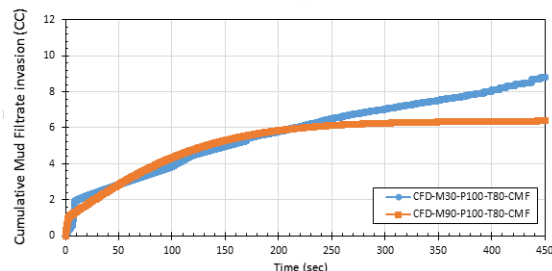
مقایسه نمودار دو آزمایش CFD-M30-P500-T250-CM و CFD-M30-P250-T200-CM نشان می‌دهد (شکل ۱۱) که با افزایش بیشتر دما و فشار، ریزش اولیه در طی ۵۰ ثانیه ابتدایی افزایش یافته است. همچنین دو آزمایش CFD-M30-P250-T200-CMF و CFD-M30-P500-T250-CMF نیز از این روند پیروی می‌کنند اما این دو نمودار در ۵۰ ثانیه اول، همگرایی بیشتری باهم نسبت به گروه اول دارند که نشان‌دهنده تأثیر ذرات ریز در کنترل ریزش اولیه و حجم فیلترت، فقط در لحظات ابتدایی آزمایش است. همچنین در لحظات اولیه نمودار آزمایش CFD-M30-P250-T200-CM بالاتر از نمودار CFD-M30-P500-T250-CMF قرار دارد؛ اما در پایان شبیه‌سازی این روند معکوس شده است که نشان‌دهنده تأثیر غالب دما و فشار نسبت به ذرات پل زن می‌باشد.



Concentration

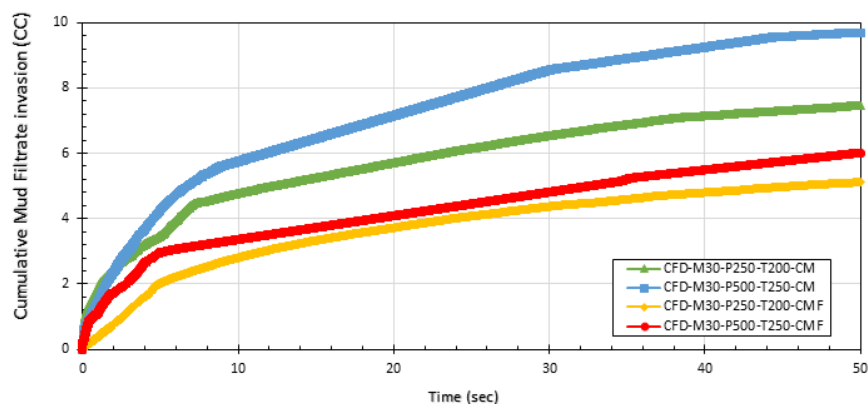
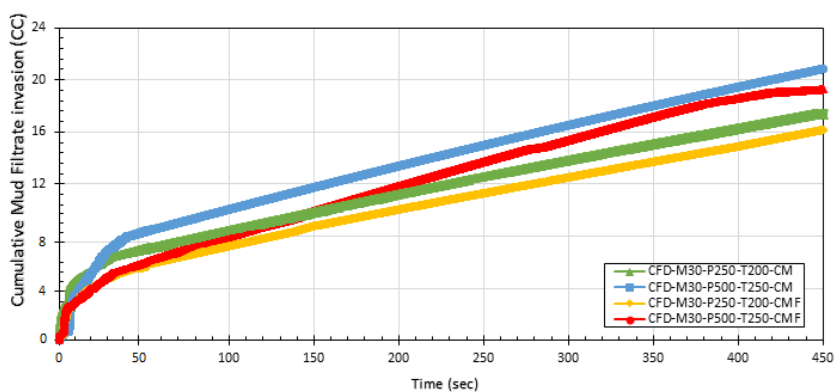
30

90



شکل ۱۰- مقایسه اثر فشار، دما، اندازه ذرات و درصد حضور ذرات جامد برکیک گل و میزان فیلترات

Fig. 10. Effects of pressure, temperature, particle size, and solid concentration on mud cake and filtrate volume.



شکل ۱۱- اثر دمای بالا و فشار بالا در طول زمان های ۵۰ و ۴۵۰ ثانیه

Fig. 11. Effects of high temperature and high pressure at 50 and 450 seconds

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش یک مدل شبیه ساز پدیده فیلتراسیون برای بررسی اثر دما و فشار طراحی گردید، بر اساس بررسی های انجام گرفته و نتایج به دست آمده از تمامی آزمایش ها در این پژوهش، نتایج زیر حاصل می گردد:

۱- دینامیک سیالات محاسباتی نیاز به تجهیزات گران قیمت آزمایشگاهی را حذف می کند و می تواند برای شبیه سازی تعداد نامحدودی از شرایط فیزیکی و عملیاتی در هر چاهی به کار رود همچنین با این روش می توان اطلاعاتی را به دست آورد که اندازه گیری آنها سخت یا ناممکن است و جزئیات بیشتری را نسبت به مدل آزمایشگاهی در اختیار قرار داده و در درک دقیق تر و کامل تر فرایند مؤثر خواهند بود.

۲- به طور کلی افزایش فشار طی ۷/۵ دقیقه شبیه سازی، باعث افزایش میزان فیلترات خروجی شده است؛ اما این افزایش در دقایق اولیه فشارهای بالاتر، بیشتر و محسوس تر بوده است. همچنین افزایش فشار در ۲۵۰ و ۵۰۰ psi به ترتیب باعث کاهش ۵ و ۱۰ درصدی ضخامت کیک گل و کاهش رطوبت آن شده است.

۳- افزایش دما طی ۷/۵ دقیقه شبیه سازی، باعث افزایش میزان فیلترات خروجی، ضخامت و رطوبت کیک گل شده است به طوری که افزایش هر ۵۰ درجه فارنهایت دما، میزان فیلترات را ۳۰ درصد و ضخامت کیک را ۵ درصد افزایش می دهد. همچنین تغییرات دما تأثیر بیشتری نسبت به تغییرات فشار نشان داد.

۴- با افزایش غلظت جامدها میزان فیلترات کاهش یافت؛ ولی ضخامت کیک گل افزایش پیدا کرد. هرچقدر که غلظت ذرات پل زنی بیشتر شود فرایند پل زنی سریع تر اتفاق می افتد و ریزش اولیه کمتری رخ می دهد. همچنین هرچه قطر ذرات بزرگ تر شود، میزان فیلترات خروجی و ضخامت کیک گل افزایش می یابد.

۵- نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که طی فیلتراسیون، ابتدا بیشتر، ذرات درشت رسوب کرده و با پیشروی رشد کیک در قسمت بالایی آن، غلظت ذرات درشت کمتر خواهد شد. همچنین ذرات کوچک تر، بر روی و میان ذرات بزرگ تر قرار می گیرند و غلظت نهایی ذرات کوچک تر در قسمت بالایی کیک، بیشتر است؛ بنابراین کیک از قسمت فوقانی خود، بیشتر نفوذناپذیر می گردد.

۶- باتوجه به کانتورهای استخراجی، تشکیل کیک گل از نواحی کناری مدل آغاز شده و به سمت مرکز پیشروی می کند و بیشتر کیک گل ایجاد شده، در ۱۵۰ ثانیه ابتدایی شبیه سازی تشکیل می گردد.

۷- اندازه گیری دقیق ضخامت کیک گل به دلیل عدم تشخیص مرز بین گل و سطح بالایی، امر سختی بوده و امکان پذیر نیست؛ اما به وسیله شبیه سازی و اعمال کانتورهای بادقت بالا و تشخیص دقیق مرز بین این دو، به راحتی می توان ضخامت کلی کیک و حتی ضخامت و کسر حجمی هریک از ذرات با اندازه های متفاوت را تشخیص داده و میزان غلظت کیک گل و رطوبت آن را نیز به دست آورد.

پیشنهاد می شود تا آزمایشات با استفاده از نمونه های مغزه انجام گیرد تا شرایط به محیط سازند نزدیک تر شود. آزمایش در اندازه ذرات، دما و فشارهای متفاوت شبیه سازی گردد. شبیه سازی حاضر با زمان ۳۰ دقیقه ای فرایند مقایسه شود. در این پژوهش از اختلاف دمای سیال حفاری و سازند صرف نظر شده است. این اختلاف دما در حفاری های عمیق قابل توجه است. به همین دلیل پیشنهاد می گردد این شرایط در شبیه سازی در نظر گرفته شود.

۶- منابع و مراجع

[1] Abraham, J. J., Kanjirakat, A., Carvero, A., Teodoriu, C., Amani, M., & AlMujalhem, M. (2025, May). Novel Techniques to Control Fluid Loss by Optimizing Filter Cake Properties During Drilling Operations. In SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia (p. D031S034R003). SPE. <https://doi.org/10.2118/225227-MS>

- [2] Abbasi, H., Hashemi Zadeh, A. & Navaei, F. (2023). Evaluation of the Efficiency of Polymers, Polymeric Nanoparticles and Surfactants Additives in Improving the Rheology and Loss Control of Drilling Fluids: A Review. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 22 (129), 7-25. (In Persian) [10.22034/ijche.2022.345982.1212](https://doi.org/10.22034/ijche.2022.345982.1212)
- [3] Assi, A. H. (2023). The Effect of Micro and Nona Silica Addition on the Filtration and Mud Cake of Drilling Fluid. *Journal of Petroleum Research and Studies*, 13(3), 41-58. <https://doi.org/10.52716/jprs.v13i3.694>
- [4] Fattah, K. A., & Lashin, A. (2016). Investigation of mud density and weighting materials effect on drilling fluid filter cake properties and formation damage. *Journal of African Earth Sciences*, 117, 345-357. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.02.003>
- [5] Jones, P. H. (1937, January). Field control of drilling mud. In *Drilling and Production Practice*. OnePetro.
- [6] Nasiri, A. R., Haji Abadi, S. H., & Soleimani, M. (2013). Control of drilling fluid leakage in oil and gas reservoirs using new industrial and mineral pumice. *Journal of Iranian Chemical Engineering*, 12 (71), e112361. (In Persian)
- [7] Ferguson, C. K., & Klotz, J. A. (1954). Filtration from mud during drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 6(02), 30-43. <https://doi.org/10.2118/289-G>
- [8] Li, J., Qiu, Z., Zhong, H., Zhao, X., Liu, Z., & Huang, W. (2022). Effects of water-based drilling fluid on properties of mud cake and wellbore stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109704. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109704>
- [9] Sinha, B. K. (1976, October). Fluid Leak-Off Under Dynamic and Static Conditions Utilizing the Same Equipment. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (pp. SPE-6126). SPE. <https://doi.org/10.2118/6126-MS>
- [10] Settari, A. (1985). A new general model of fluid loss in hydraulic fracturing. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 25(04), 491-501. <https://doi.org/10.2118/11625-PA>
- [11] Ghassem Alaskari, M. K., & Nickdel Teymoori, R. (2007). Effects of salinity, pH and temperature on CMC polymer and XC polymer performance. *International Journal of Engineering. Transactions B: Applications*, 20.
- [12] Salehi, S., Ghalambor, A., Saleh, F. K., Jabbari, H., & Hussmann, S. (2015, June). Study of filtrate and mud cake characterization in HPHT: Implications for formation damage control. In *SPE European Formation Damage Conference and Exhibition* (pp. SPE-174273). SPE. <https://doi.org/10.2118/174273-MS>
- [13] Elkatatny, S. M., & Nasr-El-Din, H. A. (2012, March). Properties of filter cake of water-based drilling fluid under dynamic conditions using computer tomography. In *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition* (pp. SPE-151798). SPE. <https://doi.org/10.2118/151798-MS>

[14]Elkatatny, S. M., Mahmoud, M. A., & Nasr-El-Din, H. A. (2011, May). A new approach to determine filter cake properties of water-based drilling fluids. In *SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition* (pp. SPE-149041). SPE.

<https://doi.org/10.2118/149041-MS>

[15] Fisher, K. A., Wakeman, R. J., Chiu, T. W., & Meuric, O. F. J. (2000). Numerical modelling of cake formation and fluid loss from non-Newtonian muds during drilling using eccentric/concentric drill strings with/without rotation. *Chemical Engineering Research and Design*, 78(5), 707-714. <https://doi.org/10.1205/026387600527888>

[16] Eshraghi, I. A. (1980). Modeling of filter cake build-up under dynamic and static condition. SPE. <https://doi.org/10.2523/8902-ms>

[17] Outmans, H. D. (1963). Mechanics of static and dynamic filtration in the borehole. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3(03), 236-244. <https://doi.org/10.2118/491-PA>

[18] Phelps, G. D., Stewart, G., & Peden, J. M. (1984, September). The analysis of the invaded zone characteristics and their influence on wireline log and well-test interpretation. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition?* (pp. SPE-13287). SPE. <https://doi.org/10.2118/13287-MS>

[19] Poletto, V. G., De Lai, F. C., & Junqueira, S. L. (2020). CFD–DEM simulation of mud cake formation in heterogeneous porous medium for lost circulation control. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(7), 376. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02450-y>

[20] Ogunnowo, E., Awodele, D., Parajuli, V., & Zhang, N. (2023, October). CFD simulation and optimization of a cake filtration system. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 87660, p. V009T10A009). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2023-112836>

[21] Civan, F. (1998). Incompressible cake filtration: mechanism, parameters, and modeling. *AIChE Journal*, 44(11), 2379-2387. <https://doi.org/10.1002/aic.690441106>

[22] 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.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.07.014>

[23] Gamwo, M. (2011). Filter cake formation on the vertical well at high temperature and high pressure: computational fluid dynamics modeling and simulations. *Journal of Petroleum and Gas Engineering Vol*, 2(7), 146-164. <https://doi.org/10.5897/JPGE11.026>

[24] Salehi, S., Madani, S. A., & Kiran, R. (2016). Characterization of drilling fluids filtration through integrated laboratory experiments and CFD modeling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 29, 462-468. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.01.017>

[25] Ramadan, A. M., Shehadeha, M. F., Shehataa, A. I., & Mehannaa, A. (2021). Filter Cake Formation on Deep Vertical Well Under High Pressure and Temperature Conditions

Computational Fluid Dynamics Modeling and Simulations. *International Journal of Applied Engineering Research*, 16(3), 192-199.

[26] Larsen, H. D. (1938). Determining the filtration characteristics of drilling muds. *The Petroleum Engineer*, 42-48.

[27] Akpan, E. U. (2024). Utilizing environmentally friendly polymers as rheological control and fluid loss additives in water-based drilling muds. *Geoenergy Science and Engineering*, 242, 213195. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2024.213195>

[28] Duan, Y., Dong, X., Yang, H., Fan, Y., Ma, X., & Zhou, L. (2023). Research and application of construction technology of digital mud cake formed by drilling fluid filtration. *Geoenergy Science and Engineering*, 231, 212315. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212315>

Investigating the effect of temperature and pressure changes on drilling fluid filtration using computational fluid dynamics

Roonak Azami¹, Mohsen Dehvedar^{2*}, Ahmad Reza Rabbani³, Younes Alizade Vaghaslou⁴

1. MSc. Petroleum and Geoenergy Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Tehran Province, Iran.
2. Assistant Professor, Petroleum and Geoenergy Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Tehran Province, Iran. (Corresponding Author: Dehvedar@aut.ac.ir)
3. Professor, Petroleum and Geoenergy Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Tehran Province, Iran.
4. Professor, Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Tehran Province, Iran.

Abstract

A primary challenge in the oil and gas industry involves managing filtrate invasion into the formation. This study identifies temperature, pressure, and particle size distribution as the critical parameters governing the filtration process. By integrating standard laboratory experiments with Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations via ANSYS Fluent, the proposed model was rigorously validated against empirical data. Findings indicate that while both temperature and pressure correlate positively with filtrate volume, temperature exerts a more substantial influence. Specifically, a 50°F temperature increment led to a 30% increase in filtrate volume and a 5% increase in filter cake thickness. Conversely, increasing pressure to 250 and 500 psi resulted in a 5% and 10% reduction in cake thickness, respectively. Furthermore, while higher solid concentrations effectively curtailed filtrate loss, they led to disproportionately thicker cakes. The study also observed that coarser particles settle initially, followed by a transition to finer particle dominance as the cake matures. The simulation revealed that cake formation initiates at the model boundaries, with the bulk of development occurring within the first 150 seconds. Additionally, higher concentrations of bridging agents were found to accelerate the bridging mechanism, thereby reducing spurt loss. Ultimately, the high degree of alignment between the simulation and experimental results suggests that this validated CFD model provides a cost-effective, reliable alternative to expensive HTHP testing, offering critical insights for optimizing drilling fluid rheology.

Keywords: Filtration, Mud cake, Filter press, Simulation, Computational fluid dynamics