

مدل سازی انتقال خرده های حفاری توسط فوم در شرایط یک چاه افقی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

احسان وزیری، محمد سیم جو*، محمد چهاردولی

دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۳-۰۴
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۸-۲۵
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۹-۱۸
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۱۰-۰۹

کلمات کلیدی:

دینامیک سیالات محاسباتی
انتقال خرده های حفاری
فوم
چاه افقی

خلاصه: انتقال مطلوب خرده های حفاری یکی از پارامترهای تاثیرگذار در سرعت عملیات حفاری می باشد. فوم به دلیل ویژگی های منحصر به فردی از جمله چگالی پایین و گرانشی بالا، می تواند منجر به کاهش مشکلات عملیاتی در مقایسه با سیالات معمول حفاری شود. در این مقاله، انتقال خرده های حفاری توسط فوم در محیط دینامیک سیالات محاسباتی بررسی گردید. بدین منظور، جریان چندفازی خرده-سیال با استفاده از مدل اویلرین توصیف و رئولوژی فوم نیز توسط مدل غیرنیوتنی قانون توان ارائه گردید. همچنین تاثیر پارامترهای کیفیت و سرعت تزریق فوم، اندازه خرده ها، شرایط خروج از مرکزی لوله ها و نیز سرعت چرخش لوله های حفاری بر عملکرد فوم در تمیزسازی چاه مطالعه شد. نتایج حاصله از مدل نیز با داده های آزمایشگاهی صحت سنجی گردید. براساس نتایج، افزایش کیفیت فوم منجر به بهبود انتقال خرده های حفاری به علت افزایش ویسکوزیته فوم گردید. همچنین افزایش سرعت تزریق فوم به واسطه تخریب بستر ساکن خرده ها سبب کاهش غلظت خرده های درون چاه شد. نتایج نشان داد که خارج شدن لوله ها از شرایط هم مرکزی باعث تجمع خرده ها در محیط چاه می شود. با این حال، اعمال سرعت چرخشی به لوله های حفاری سبب بهبود تمیزسازی چاه گردید، به طوری که افزایش سرعت چرخش لوله ها به میزان ۴۰ دور بر دقیقه در حضور فوم موجب کاهش ۱/۸ و ۱/۴ برابری غلظت خرده ها در شرایط چاه هم مرکز و خارج از مرکز شد.

۱- مقدمه

گرفته است [۲]. در حفاری های متداول، با افزایش عمق حفاری به علت افزایش فشار هیدرواستاتیک گل، احتمال ایجاد شکستگی سازند و یا مشکلات ناپایداری دیواره چاه افزایش می یابد [۳]. حفاری با فوم به علت دارا بودن چگالی کم و ویسکوزیته بالا در مقایسه با سیالات حفاری پایه آبی متداول دارای مزایای مختلفی از جمله به حداقل رساندن استفاده از آب و ایجاد آسیب سازندی، جلوگیری از هدر رفت گل، افزایش عمر مته حفاری، بهبود انتقال خرده های حفاری و کاهش زمان توقف حفاری به دلیل کاهش احتمال گیر کردن لوله ها می باشد [۲]. علاوه بر این، فوم می تواند با کنترل چگالی موثر گردش سیال حفاری به تثبیت فشار ته چاهی کمک نماید [۴]. با عنایت به موارد مذکور، فوم به عنوان نوع خاصی از سیالات حفاری هوادهی شده از

تمیزسازی چاه یکی از پارامترهای مهم و کلیدی در عملیات حفاری است که به طور مستقیم بر زمان و هزینه های حفاری تاثیر می گذارد. تمیزسازی نامناسب چاه و متعاقباً تشکیل بستری از خرده ها بر روی دیواره چاه، منجر به بروز مشکلاتی مانند سایش زود هنگام لوله های حفاری، افزایش فشار به پمپ های تزریق گل، رخداد گشتاور بالا و درگ بر لوله ها، گیر کردن لوله ها، کاهش سرعت حفاری و مشکلات کنترل چاه می شود [۱]. فوم به عنوان مخلوطی از گاز و عامل فوم ساز که عموماً محلول های سورفکتانتی هستند، در حفاری چاه های دریایی و خشکی به عنوان سیال حفاری مورد استفاده قرار

* نویسنده عهده دار مکاتبات: simjoo@sut.ac.ir



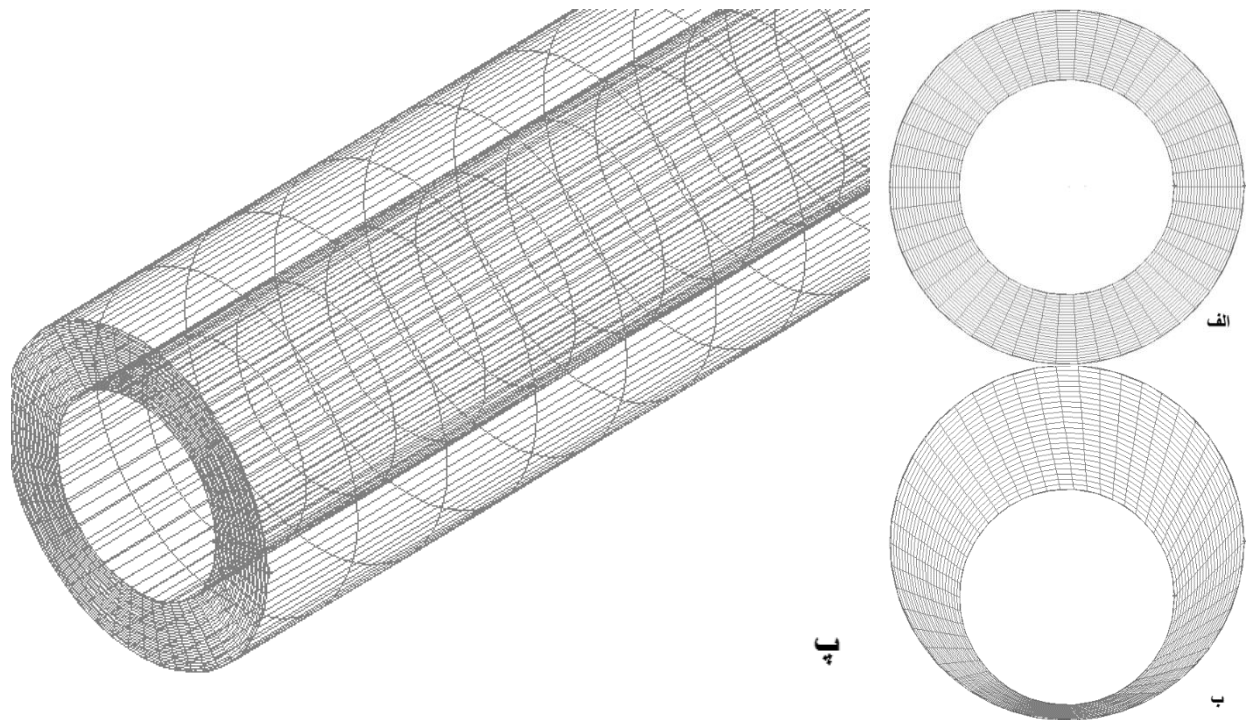
فوم در جابه‌جایی خرده‌های حفاری می‌باشد. حیدری و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۷ نیز با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، اثر چرخش و خروج از مرکزی لوله‌های حفاری را در انتقال خرده‌ها مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که شرایط خروج از مرکزی لوله‌های حفاری باعث افزایش تجمع خرده‌های درون چاه می‌شود. با این حال آن‌ها بیان کردند که کاهش نرخ حفاری و نیز افزایش سرعت تزریق سیال حفاری می‌تواند سبب کاهش میزان خرده‌ها در چاه شود. همچنین اخشیک و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ نیز مدلی را جهت پیش‌بینی کارایی انتقال خرده‌های حفاری با استفاده از سیالات هوادهی شده ارائه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش دبی تزریق گاز، غلظت خرده‌های حفاری در فضای درون چاه کاهش می‌یابد. در ادامه، ژانگ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۸ با بررسی انتقال خرده‌های حفاری با استفاده از یک فوم پایدار مشاهده کردند که با افزایش کیفیت فوم تزریقی، غلظت خرده‌های حفاری به تدریج کاهش یافته و در نهایت به یک مقدار ثابت می‌رسد. اخیراً نیز شاو و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۱۹ با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی تاثیر شکل خرده‌های حفاری در انتقال آن‌ها با استفاده از سیالات حفاری پرداختند. نتایج حاصله نشان داد که میزان تمیزسازی چاه در حضور خرده‌های کروی شکل به‌طور موثری بالاتر از خرده‌های مکعبی شکل بود.

بررسی مطالعات پیشین در زمینه انتقال خرده‌های حفاری توسط فوم نشان می‌دهد که عمده این مطالعات بر مبنای روابط تجربی بوده و مطالعات محدودی به مدل‌سازی انتقال خرده‌های حفاری درون چاه با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداخته‌اند. از سویی دیگر به‌واسطه پیچیده بودن ایجاد شرایط واقعی چاه، مطالعات آزمایشگاهی محدودی در زمینه انتقال خرده‌ها با فوم گزارش شده است. از این‌رو مقاله حاضر سعی داشته است که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود، مدلی مناسب جهت توصیف انتقال خرده‌های حفاری توسط فوم در محیط دینامیک سیالات محاسباتی ارائه نماید. ایجاد این مدل که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی می‌شود، می‌تواند به‌طور موثری در بررسی پارامترهای تاثیرگذار در انتقال خرده‌های حفاری به‌کار رود. جهت نیل به این هدف، این مقاله با بهره‌گیری از نرم‌افزار فلونت^۱ و استفاده از مدل جریان چندفازی اویلرین^۲ به

سال ۱۹۷۵ به‌صورت میدانی مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا، مطالعات مختلفی به توصیف عملکرد فوم در انتقال خرده‌های حفاری پرداخته‌اند. مارتینز و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۰ عملکرد فوم در حفاری چاه‌های زاویه‌دار و افقی را بررسی کردند و دریافتند که انتقال خرده‌ها در شرایط چاه زاویه‌دار دشوارتر از انتقال خرده‌ها در شرایط چاه افقی می‌باشد. در ادامه، لی و کورو [۶] در سال ۲۰۰۳ مدلی یک‌بعدی در شرایط ناپایدار برای انتقال خرده‌های حفاری توسط فوم در چاه‌های افقی ارائه دادند که ارتفاع بستر خرده‌ها را به‌عنوان تابعی از کیفیت فوم، نرخ حفاری^۱ و هندسه چاه پیش‌بینی می‌کرد. نتایج به‌دست آمده بیانگر این موضوع بود که افزایش نرخ حفاری و خارج شدن لوله‌های حفاری از شرایط هم‌مرکز، باعث افزایش ارتفاع بستر خرده‌ها شده و در مقابل افزایش کیفیت فوم باعث کاهش ارتفاع بستر خرده‌ها می‌گردد. همچنین، اوزبایگلو و همکاران [۷] و [۸] در سال ۲۰۰۵ با ارائه مدلی برای انتقال خرده‌ها توسط فوم در چاه‌های افقی و زاویه‌دار بیان کردند که در چاه‌های افقی برای جلوگیری از افزایش ارتفاع بستر خرده‌های درون چاه، سرعت سیال حفاری درون فضای حلقوی باید افزایش یابد. چن و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۶ نیز انتقال خرده‌های حفاری در شرایط یک چاه افقی را با استفاده از فوم در شرایط آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش کیفیت و سرعت تزریق فوم باعث کاهش غلظت خرده‌های درون چاه می‌شود، همچنین با توجه به شرایط مطالعه مذکور، افزایش دما تاثیر ناچیزی در بهبود عملکرد انتقال خرده‌های درون چاه داشت. همچنین، دوآن و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۰ نیز جابه‌جایی خرده‌ها با استفاده از فوم را در شرایط چاه‌های افقی بررسی کردند. نتایج نشان داد که چرخش لوله‌های حفاری، باعث کاهش غلظت خرده‌های درون چاه می‌شود. همچنین افزایش سرعت تزریق فوم تاثیر مثبتی در کاهش غلظت خرده‌های درون چاه داشت. در ادامه، ژیا فو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۳ انتقال خرده‌های حفاری با استفاده از فوم را در چاه‌های انحرافی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که مدل قانون توان^۲ به‌طور مناسبی رفتار رئولوژیکی فوم را توصیف می‌نماید. در این راستا، روکی و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۴ بیان کردند که مدل قانون توان یکی از مدل‌های مناسب برای توصیف رفتار رئولوژیکی

3 FLUENT
4 Eulerian

1 Rate of Penetration
2 Power Law



شکل ۱. مش‌بندی تهیه شده جهت توصیف جریان فوم در فضای حلقوی (الف: سطح مقطع هم مرکز، ب: سطح مقطع خارج از مرکز، پ: قسمتی از طول چاه)
Fig. 1. Designed mesh structure to describe foam flow in annulus (a: Concentric cross section, b: Eccentric cross section, c: Part of well length)

۲-۱- هندسه مدل چاه

در این مطالعه برای طراحی سه‌بعدی و مش‌زنی محیط چاه و فضای حلقوی آن، از نرم‌افزار گمبیت^۱ استفاده شد، به طوری که قطر لوله جداری برابر با ۱۴/۶۳ سانتی‌متر، قطر لوله حفاری برابر با ۸/۸۹ سانتی‌متر و طول چاه نیز ۲۲/۲۵ متر در نظر گرفته شد. لوله جداری و لوله حفاری به صورت هم‌مرکز و نیز غیر هم‌مرکز درون چاه در نظر گرفته شدند. محیط طراحی شده نیز به روش شش‌وجهی^۲ و نگاشت‌های چهارگوشه^۳ مطابق شکل ۱ مش‌بندی شد.

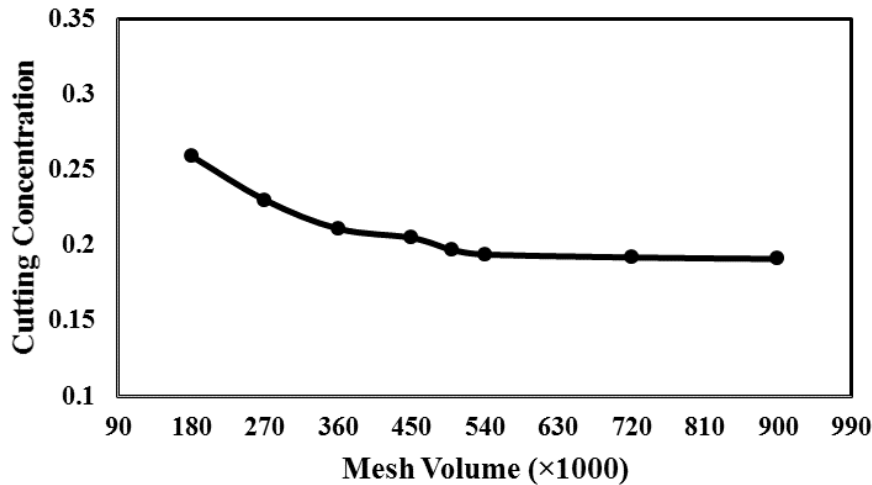
شکل ۲ آنالیز استقلال از مش را برای توصیف عملکرد فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) جهت انتقال خرده حفاری را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مش‌ها تا ۵۴۰۰۰۰، دقت نتایج حاصله از مدل بهبود یافته و بعد از آن عملاً تغییری در نتایج رخ نمی‌دهد. بر این اساس جهت جلوگیری از بالا رفتن زمان محاسبات، از انتخاب شبکه‌های ریزتر اجتناب گردید و تعداد مش ۵۴۰۰۰۰ در ادامه کار

توصیف جریان چندفازی سیال-خرده‌های حفاری پرداخت. به‌منظور توصیف رفتار رئولوژی فوم به‌عنوان یک سیال غیرنیوتنی نیز از مدل قانون توان استفاده شد. همچنین در این مقاله اثر کیفیت و سرعت تزریق فوم، اندازه خرده‌های حفاری، خروج از مرکز بودن لوله‌ها و نیز سرعت چرخش لوله‌های حفاری بر ارتقای کیفیت تمیزسازی محیط چاه مورد بررسی قرار گرفت.

۲- تعریف مدل چاه

در این مطالعه، هندسه مدل چاه شامل دو لوله می‌باشد که سیال موردنظر از فضای مابین این دو لوله که معادل فضای حلقوی درون چاه است، جریان می‌یابد. خرده‌های حفاری از ورودی چاه که به‌عنوان مرز جریان جرمی در نظر گرفته شده است، وارد فضای حلقوی می‌شوند. لازم به ذکر است که در این مطالعه از مدل جریان چندفازی اویلری برای توصیف جریان مخلوط خرده-سیال در محیط چاه استفاده شد. این مخلوط پس از طی طول چاه، از مرز فشار ثابت خارج می‌شود. فرآیند مدل‌سازی نیز با حل توامان معادلات بقای مومنتوم و جرم منطبق با شرایط مرزی تعریف شده انجام می‌گیرد.

1 Gambit
 2 Hex-Wedge
 3 Quad Map



شکل ۲. آنالیز استقلال مش برای چاه افقی هم‌مرکز برای فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه
 Fig. 2. Mesh independence analysis for horizontal well using 90% foam quality and 1.53 m/s injection velocity

حجم فاز q نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

مدل‌سازی استفاده شد.

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (2)$$

بر این اساس معادله پیوستگی برای فاز q به صورت زیر قابل توصیف است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (3)$$

که در رابطه فوق \vec{v}_q بیانگر سرعت فاز q است. همچنین ρ_q نیز بیانگر چگالی فاز q می‌باشد.

معادله پایستگی مومنتم برای فاز q :

صورت کلی معادله مومنتم برای هر فاز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = \\ -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + 0.5 \rho_q \alpha_q \left(\frac{d_q \vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p \vec{v}_p}{dt} \right) + \\ \vec{F}_q - 0.5 \rho_q \alpha_q (\vec{v}_q - \vec{v}_p) \times (\nabla \times \vec{v}_q) + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \end{aligned} \quad (4)$$

که در این رابطه، \vec{F}_q و $\alpha_q \rho_q \vec{g}$ به ترتیب بیانگر نیروهای گرانشی و حجمی خارجی^۱ است. K_{pq} نیز ضریب تبادل مومنتم بین فازی می‌باشد. همچنین p بیانگر فشار یکسان اعمال شده بر تمام

۲-۲- توصیف روابط به کار رفته در مدل

در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار گمبیت سطوح مختلف هندسه ایجاد شده مرزبندی شد. قسمت ورودی استوانه که معادل محل ورود سیال حفاری و خرده‌ها به درون چاه می‌باشد، به عنوان ورودی جریان جرمی و قسمت خروجی، به عنوان مرز فشار ثابت در نظر گرفته شد. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، استوانه بیرونی که معادل لوله جداری می‌باشد، به عنوان دیواره ثابت بوده و استوانه درونی که معادل لوله حفاری است، به عنوان دیواره قابل چرخش تعیین شده است. همچنین جهت توصیف معادلات جریان سیال-خرده، مدل جریان چند فازی اوپلرین که امکان مدل‌سازی چند فاز جداگانه که روی یکدیگر تاثیر می‌گذارند را دارا است، به کار رفت [۱۷]. فازها می‌توانند هر ترکیبی از مایعات، گازها یا جامدات باشند و برای هر فاز، معادلات پیوستگی و مومنتم که به صورت زیر توصیف می‌شوند، جداگانه حل خواهد شد.

معادله پیوستگی برای فاز q :

جهت توصیف معادله پیوستگی ابتدا جز حجمی α_q که بیانگر فضای اشغال شده توسط هر فاز می‌باشد، برای فاز مورد نظر (q) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (1)$$

1 External Body Forces

جدول ۱. شاخص رفتار و شاخص سازگاری فوم جهت توصیف رفتار رئولوژی فوم

Table 1. Foam behavior and consistency indices for describing rheological behavior

کیفیت فوم %	N	K (Pa.s ⁿ)
۷۰	۰/۴۵	۰/۸۳۵
۸۰	۰/۴۰	۲/۱۸۵
۹۰	۰/۳۶	۳/۷۳۲

درون محیط چاه از خود نشان می‌دهد. بر این اساس، رابطه (۸) جهت توصیف ویسکوزیته فوم مورد استفاده قرار گرفت. جهت توصیف پارامترهای شاخص رفتار فوم (N) و شاخص سازگاری (K) از نتایج مطالعات آزمایشگاهی چن و همکاران [۹] برای کیفیت‌های مختلف فوم استفاده شد، (جدول ۱). همان طور که مشاهده می‌شود، افزایش کیفیت فوم تاثیر مثبتی بر روی خواص رئولوژی فوم خواهد داشت.

$$\mu = K\dot{\gamma}^{N-1} \quad (8)$$

چگالی فوم نیز در شرایط دما و فشار ثابت به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\rho_f = \Gamma\rho_g + (1-\Gamma)\rho_l \quad (9)$$

به طوری که ρ_l و ρ_g به ترتیب بیانگر چگالی گاز و مایع می‌باشد. سرعت فوم درون محیط چاه نیز به صورت زیر توصیف می‌شود که با مجموع دبی سیالات رابطه مستقیم داشته، درحالی که با سطح مقطع چاه رابطه‌ای عکس دارد:

$$v_f = \frac{Q_g + Q_l}{A} \quad (10)$$

در رابطه فوق، Q_g دبی گاز، Q_l دبی مایع و A سطح مقطع چاه است. همچنین، در این مقاله، جهت توصیف سرعت خرده‌های حفاری در ورودی چاه ($v_{cut,i}$) از رابطه (۱۱) استفاده شد که در آن سرعت خرده‌ها با نرخ حفاری (R_p) رابطه مستقیم و با قطر چاه و قطر لوله حفاری رابطه عکس دارد [۱۹]:

فازها و \bar{v}_p و \bar{v}_q نیز به ترتیب سرعت فاز p و q می‌باشد. همچنین $\bar{\tau}_q$ نیز تنسور تنش-کرنش فاز q بوده که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \bar{v}_q + \nabla \bar{v}_q^T \right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \bar{v}_q \bar{I} \quad (5)$$

که در آن، λ_q و μ_q به ترتیب بیانگر ویسکوزیته برشی^۱ و ویسکوزیته فازه توده^۲ q است. \bar{I} نیز تنسور واحد می‌باشد.

عدد رینولدز برای سیال حفاری (فوم) نیز در این مقاله براساس رابطه زیر قابل توصیف است [۱۸]:

$$N_{Re} = \frac{14.57 \rho_f v_f^{(2-N)}}{K} \left(\frac{0.0208 (D_{hole} - D_{pipe})}{2 + \frac{1}{N}} \right)^N \quad (6)$$

که در رابطه فوق، D_{hole} قطر چاه و D_{pipe} قطر لوله حفاری است؛ به عنوان نمونه با در نظر گرفتن حداکثر کیفیت و سرعت فوم تزریقی در این مقاله (کیفیت فوم ۹۰ درصد و سرعت تزریقی ۱/۵۳ متر بر ثانیه) و تعیین سایر پارامترهای مورد نیاز، مقدار عدد رینولدز برای سیال حفاری برابر با ۶۶ خواهد بود. همچنین به منظور توصیف جریان فوم در محیط چاه، پارامتر کیفیت فوم که بیانگر نسبتی از حجم گاز به مجموع حجم سیالات مایع و گاز در ساختار فوم است، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (7)$$

که در این رابطه، Γ کیفیت فوم، V_l و V_g نیز به ترتیب بیانگر حجم گاز و مایع موجود در ساختار فوم است. در این مقاله جهت توصیف رئولوژی فوم که اساساً یک سیال غیرنیوتنی بوده و رفتار آن وابسته به کیفیت آن می‌باشد، از مدل قانون توان استفاده شد. با توجه به مطالعات آزمایشگاهی صورت گرفته توسط چن و همکاران [۹]، این مدل بهترین عملکرد را در توصیف رفتار رئولوژی فوم

1 Shear Viscosity
2 Bulk Viscosity

این مقاله (کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر برثانیه)، عدد رینولدز خرده‌ها برابر با ۱۱ خواهد بود.

سرعت خالص جریان خرده‌های در درون چاه (v_c) نیز به صورت زیر تعریف می‌شود که در آن میانگین سرعت سیال در محیط حلقوی چاه می‌باشد که به عنوان یکی از خروجی‌های مدل‌سازی پس از رسیدن به شرایط پایا تعیین می‌شود. همچنین v_s نیز سرعت لغزشی خرده‌ها است (رابطه (۱۳)):

$$v_c = v_a - v_s \quad (16)$$

در این مقاله جهت توصیف میزان انتقال خرده‌های حفاری درون محیط چاه از پارامتر بدون بعد نسبت انتقال (R_T) که به صورت نسبتی از سرعت خالص انتقال خرده‌ها به میانگین سرعت سیال در محیط حلقوی چاه می‌باشد، استفاده شد [۲۰]:

$$R_T = \frac{v_c}{v_a} \quad (17)$$

بر این اساس می‌توان نسبت انتقال خرده‌ها را بر مبنای غلظت خرده‌های حفاری در درون محیط چاه (CC) به صورت زیر تعریف نمود:

$$CC = 1 - R_T \quad (18)$$

لازم به ذکر است که میزان غلظت خرده‌ها در شرایط درون چاهی می‌تواند بین مقدار ۰ تا ۱ که به ترتیب بیانگر چاه عاری از خرده (شرایطی که طی آن انتقال کامل خرده‌ها توسط سیال حفاری انجام گرفته است) و نیز چاه آکنده از خرده است، تغییر نماید. در واقع در طی فرآیند مدل‌سازی، مقدار غلظت خرده‌ها (CC) در چاه می‌تواند به واسطه عملکرد فوم کاهش یابد که این امر بیانگر تمیزسازی محیط چاه از خرده‌ها می‌باشد. همچنین در این مقاله جهت بررسی شرایط چاه غیر هم‌مرکز در نحوه انتقال خرده‌ها، رابطه زیر جهت توصیف وضعیت لوله‌های جداری و حفاری نسبت به یکدیگر استفاده شد:

$$e = \frac{E}{R_o - R_i} \times 100 \quad (19)$$

که در رابطه فوق، e ضریب خروج از مرکز، E فاصله مراکز دو لوله و R_o و R_i به ترتیب شعاع لوله جداری و شعاع لوله حفاری می‌باشد.

$$v_{cut,i} = \frac{R_p}{3600 \left[1 - \left(\frac{D_{pipe}}{D_{hole}} \right)^2 \right] C_{conc,i}} \quad (11)$$

در رابطه فوق $C_{conc,i}$ معرف مقدار اولیه خرده‌ها جهت محاسبه سرعت ورودی خرده‌ها به چاه می‌باشد که از رابطه تجربی زیر محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$C_{conc,i} = 0.0001778R_p + 0.00505 \quad (12)$$

در این مدل‌سازی با احتساب نرخ حفاری (R_p) ۱۵/۲۴ متر بر ساعت که در مطالعات آزمایشگاهی چن و همکاران [۹] نیز مورد استفاده قرار گرفته بود، مقدار اولیه خرده‌ها جهت محاسبه سرعت اولیه خرده‌ها، برابر با ۰/۰۱۳۹۴ خواهد بود. همچنین سرعت لغزشی خرده‌ها که بیانگر سرعتی است که خرده‌های حفاری درون سیال ساکن سقوط می‌کنند، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۰]:

$$v_s = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_f)}{3\rho_f C_D}} \quad (13)$$

که در این رابطه، d_p قطر خرده‌های حفاری، ρ_p چگالی خرده‌ها، g شتاب ثقلی و C_D ضریب درگ است که از رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۲۱ و ۲۲]:

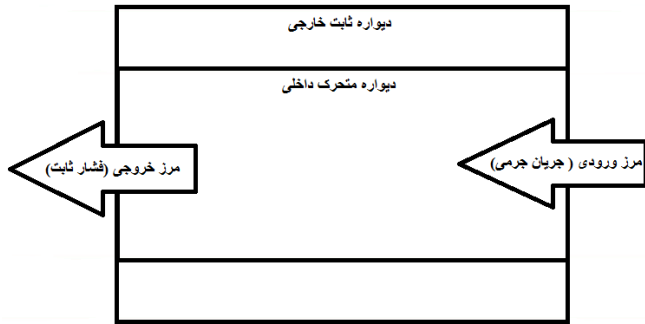
$$C_D = \frac{35.2}{\left(\frac{N_{Re,p}}{2^N} \right)} + N \left(1 - \frac{20.9}{\left(\frac{N_{Re,p}}{2^N} \right)^{1.11}} \right) \quad (14)$$

در رابطه فوق، پارامتر N مربوط به شاخص رفتار رئولوژی فوم و $N_{Re,p}$ نیز بیانگر عدد رینولدز خرده‌ها می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر قابل توصیف است:

$$N_{Re,p} = \frac{\rho_f v_f^{(2-N)} d_p^N}{K} \quad (15)$$

در این رابطه نیز پارامتر K بیانگر شاخص سازگاری فوم می‌باشد. حال با احتساب حداکثر کیفیت و سرعت تزریق فوم استفاده شده در

شرایط مرزی:



شکل ۳. شماتیکی از شرایط مرزی به کار رفته در مدل
Fig. 3. Schematic of the boundary conditions used in the model

بر اساس هندسه طراحی شده در این کار، چهار مرز به شرح زیر در مدل تعریف شد: مرز ورودی، مرز خروجی و دیواره ثابت خارجی و دیواره متحرک داخلی. بر این اساس، سیال حفاری و خرده‌ها از مرز ورودی که به صورت مرز جریان جرمی^۱ در نظر گرفته شد، وارد قلمرو سیستم می‌شود. در این مقاله، با در نظر گرفتن نرخ حفاری ۱۵/۲۴ متر بر ساعت، قطر خرده‌های برابر با ۳ میلی‌متر، چگالی خرده‌های برابر با ۲۶۱۰ کیلوگرم بر مترمکعب و تخلخل سنگ ۳۸ درصد، جریان جرمی خرده‌ها در مرز ورودی برابر با ۰/۱۵ کیلوگرم بر ثانیه تعریف شد. همچنین سرعت تزریق فوم در سناریوهای مختلف بین ۰/۹۲ الی ۱/۵۳ متر بر ثانیه متغیر بود که با توجه به کیفیت و چگالی فوم، سرعت تزریق سیال حفاری در مرز ورودی بین ۰/۹۷ تا ۴/۸۱ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد. علاوه بر این، شرایط مرزی به صورت فشار ثابت^۲ و برابر با ۱۰۱/۳۵ کیلوپاسکال در مرز خروجی اعمال شد. شرط مرزی در دیواره خارجی نیز به صورت دیواره ثابت^۳ توصیف شد، اما در دیواره داخلی، شرط مرزی دیواره متحرک^۴ اعمال شد. بنابراین در طول فرآیند انتقال خرده‌ها، دیواره متحرک داخلی با اعمال سرعت چرخشی که از ۰ تا ۱۲۰ دور بر دقیقه متغیر است، چرخش می‌یابد. شکل ۳ شرایط مرزی به کار رفته در مدل را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

همچنین یک معیار همگرایی ($\epsilon < 10^{-5}$) جهت پایان محاسبات مدل‌سازی در نظر گرفته شد. جدول ۲ نیز خلاصه‌ای از داده‌های استفاده شده جهت مدل‌سازی جریان خرده‌های حفاری توسط فوم را بیان می‌کند.

۳- نتایج

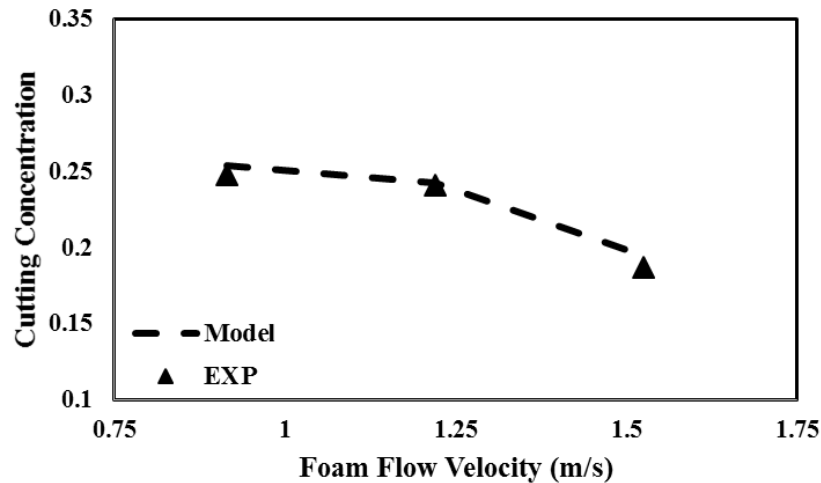
شکل ۴ اثر سرعت تزریق فوم بر انتقال خرده‌های حفاری در شرایط یک چاه افقی هم‌مرکز که شامل فومی با کیفیت ۹۰ درصد می‌باشد را نشان می‌دهد که محور افقی بیانگر تغییرات سرعت جریان فوم تزریقی بوده و محور عمودی بیانگر غلظت خرده‌های درون چاه می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت تزریق فوم از ۰/۹۲ الی ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۳ به ۵ فوت بر ثانیه)،

جدول ۲. داده‌های استفاده شده جهت مدل‌سازی
Table 2. Input data used in CFD modeling

پارامتر	مقدار
طول چاه	۲۲/۲۵ m
قطر لوله حفاری	۸/۸۹ cm
قطر لوله جداری	۱۴/۶۳ cm
خروج از مرکز	۰, ۵۰, ۷۸%
فشار	۶۹۰ kPa
دما	۲۶/۶۷ C
چگالی گاز	۱/۲۵ kg/m ³
چگالی مایع	۱۰۰۰ kg/m ³
چگالی خرده‌ها	۲۶۱۰ kg/m ³
قطر خرده‌ها	۳ mm
ویسکوزیته خرده‌ها	۵۰ Pa.s
سرعت اولیه خرده‌ها	۰/۴۸ m/s
نرخ حفاری	۱۵/۲۴ m/hr

غلظت خرده‌های حفاری درون چاه از ۰/۲۵ به ۰/۱۹ کاهش می‌یابد. همچنین نتایج به دست آمده از مدل با نتایج مطالعات آزمایشگاهی چن و همکاران [۹] نیز صحت‌سنجی گردید که نتایج حاصله در شکل ۴ بیانگر عملکرد مطلوب مدل در توصیف داده‌های آزمایشگاهی است. لازم به ذکر است که اثر مثبت سرعت تزریق فوم بر میزان انتقال خرده‌ها را می‌توان بر اساس نیروهای وارده بر خرده‌های درون چاه توصیف نمود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، خرده‌های درون چاه تحت تاثیر نیروهای بالابری، درگ، گرانش و شناوری قرار می‌گیرند. با توجه به روابط (۲۰) و (۲۱) نیروهای درگ و بالابری با

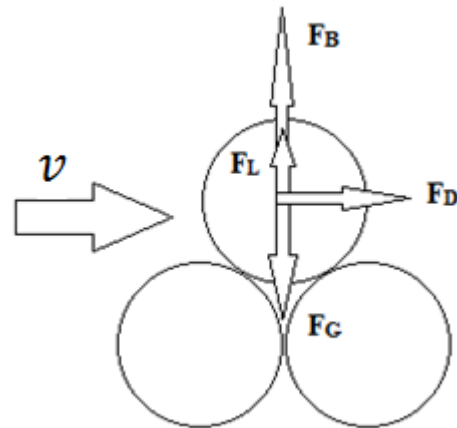
- 1 Mass Flow Inlet
- 2 Pressure Outlet
- 3 Static Wall
- 4 Moving Wall



شکل ۴. تاثیر سرعت تزریق فوم بر میزان غلظت خرده‌های حفاری در یک چاه افقی هم‌مرکز در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد
 Fig. 4. Effect of foam injection velocity on the cuttings concentration in a concentric horizontal well using 90% foam quality

فوم) می‌باشد. C_D و C_L نیز به ترتیب ضریب درگ و بالابری هستند. شکل ۶ نیز بیانگر پروفایل کانتوری تجمع خرده‌های حفاری در مقطعی مشخص از ورودی چاه ($L=11m$) در گذر زمان به واسطه تغییر سرعت تزریق در کیفیت فوم ۹۰ درصد می‌باشد. لازم به ذکر است که پارامتر زمان در شکل مذکور به صورت کسری از مدت زمان لازم برای رسیدن به حالت پایا که در آن میزان غلظت خرده‌ها در چاه با زمان تغییری نمی‌کند، گزارش شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در یک زمان مشخص، افزایش سرعت تزریق فوم تاثیر مثبتی بر میزان انتقال خرده‌ها و متعاقباً تمیزسازی چاه دارد. همچنین افزایش سرعت تزریق فوم به علت افزایش نیروهای درگ و بالابری اعمال شده به خرده‌های درون چاه، منجر به تخریب بستر ساکن خرده‌ها شده و از گسترش هرچه بیشتر بستر خرده‌های در درون محیط چاه ممانعت می‌کند.

شکل ۷ تاثیر کیفیت فوم تزریقی بر بهبود تمیزسازی محیط یک چاه افقی هم‌مرکز را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل مشاهده می‌شود که با افزایش کیفیت فوم از ۷۰ به ۹۰ درصد، غلظت خرده‌های درون چاه از ۰/۳۱ به ۰/۲۵ در سرعت تزریق ۰/۹۲ متر بر ثانیه (۳ فوت بر ثانیه) کاهش یافته است. در واقع با افزایش جزء گازی فوم و به تبع آن افزایش کیفیت فوم و کاهش چگالی آن، علی‌رغم کاهش تاثیر نیروهای شناوری، درگ و بالابری، غلظت خرده‌های درون چاه کاهش یافته است که این امر بیانگر تاثیر قابل توجه رئولوژی فوم و ویسکوزیته آن بر عملکرد تمیزسازی چاه



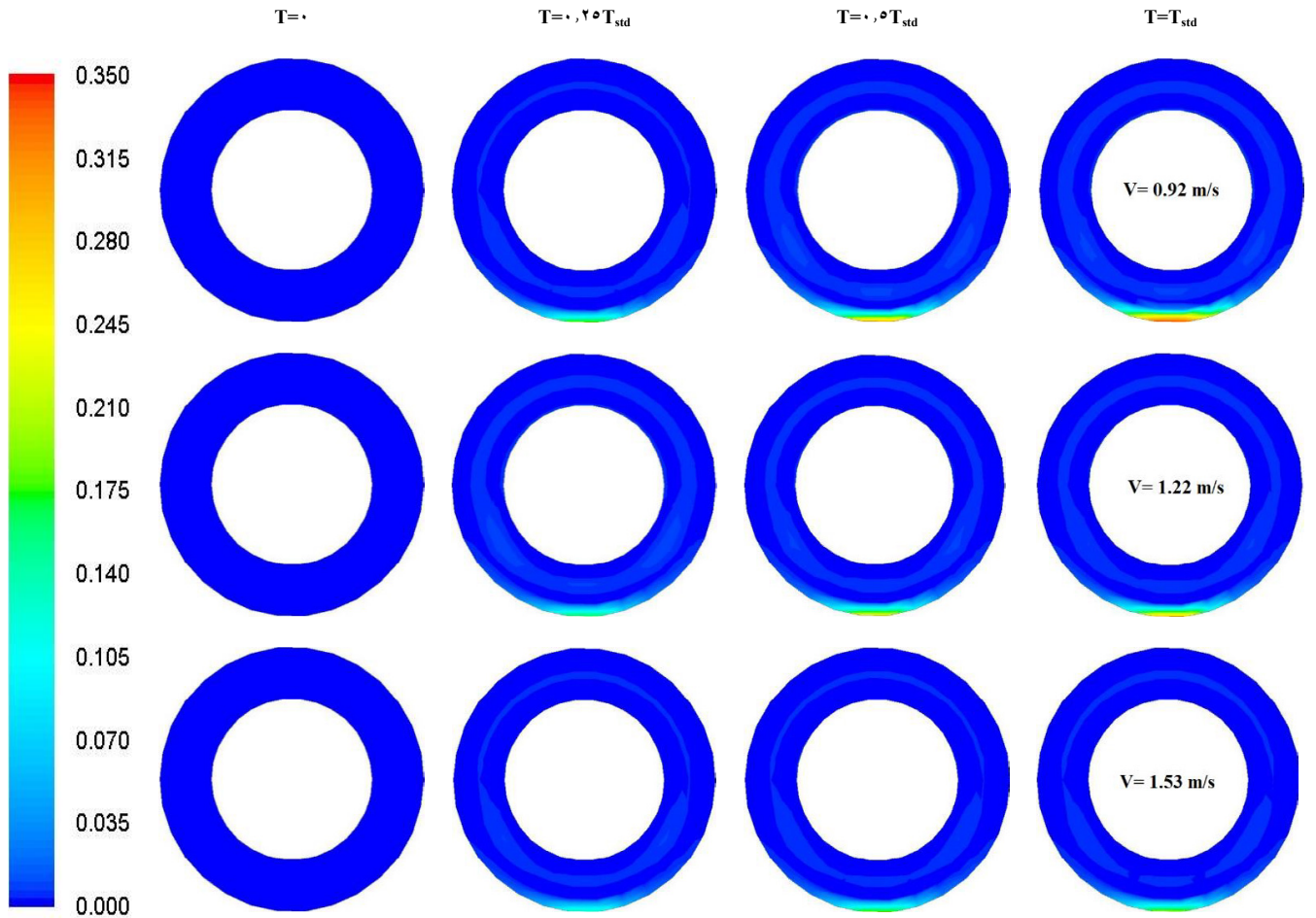
شکل ۵. مجموعه نیروهای وارد شده بر خرده‌های حفاری
 Fig. 5. The schematic of different forces acting on drilling cuttings

مجذور سرعت فوم مرتبط بوده و بنابراین با افزایش سرعت تزریق فوم، نیروی درگ و بالابری وارده بر خرده‌ها افزایش یافته که این امر باعث تسهیل جابجایی خرده‌ها توسط فوم می‌شود.

$$F_D = \frac{1}{6} C_D \rho_f g v_f^2 A_p \quad (20)$$

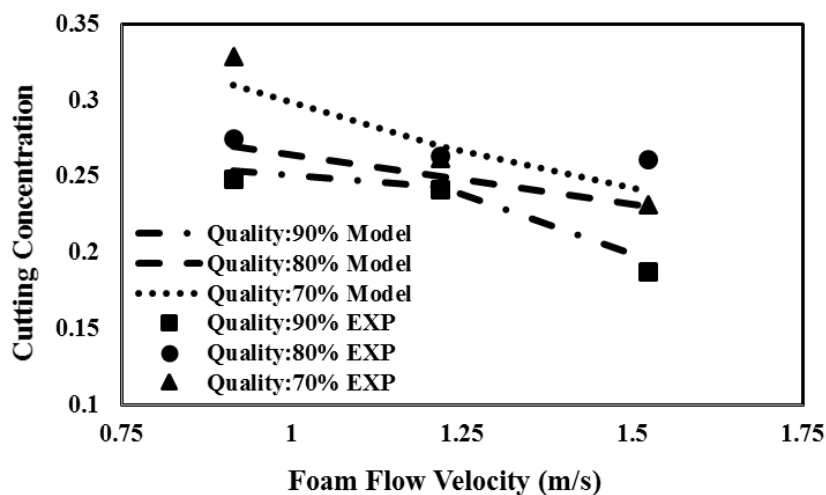
$$F_L = \frac{1}{6} C_L \rho_f g v_f^2 A_p \quad (21)$$

که در این روابط A_p سطح مقطع خرده‌ها و v_f سرعت سیال حفاری (فوم) می‌باشد. همچنین ρ_f نیز بیانگر چگالی سیال حفاری



شکل ۶: تاثیر سرعت تزریق فوم بر پروفایل کانتوری تجمع خرده‌های حفاری درون چاه افقی در گذر زمان در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد در مقطع (از ابتدای چاه $L=11\text{m}$)

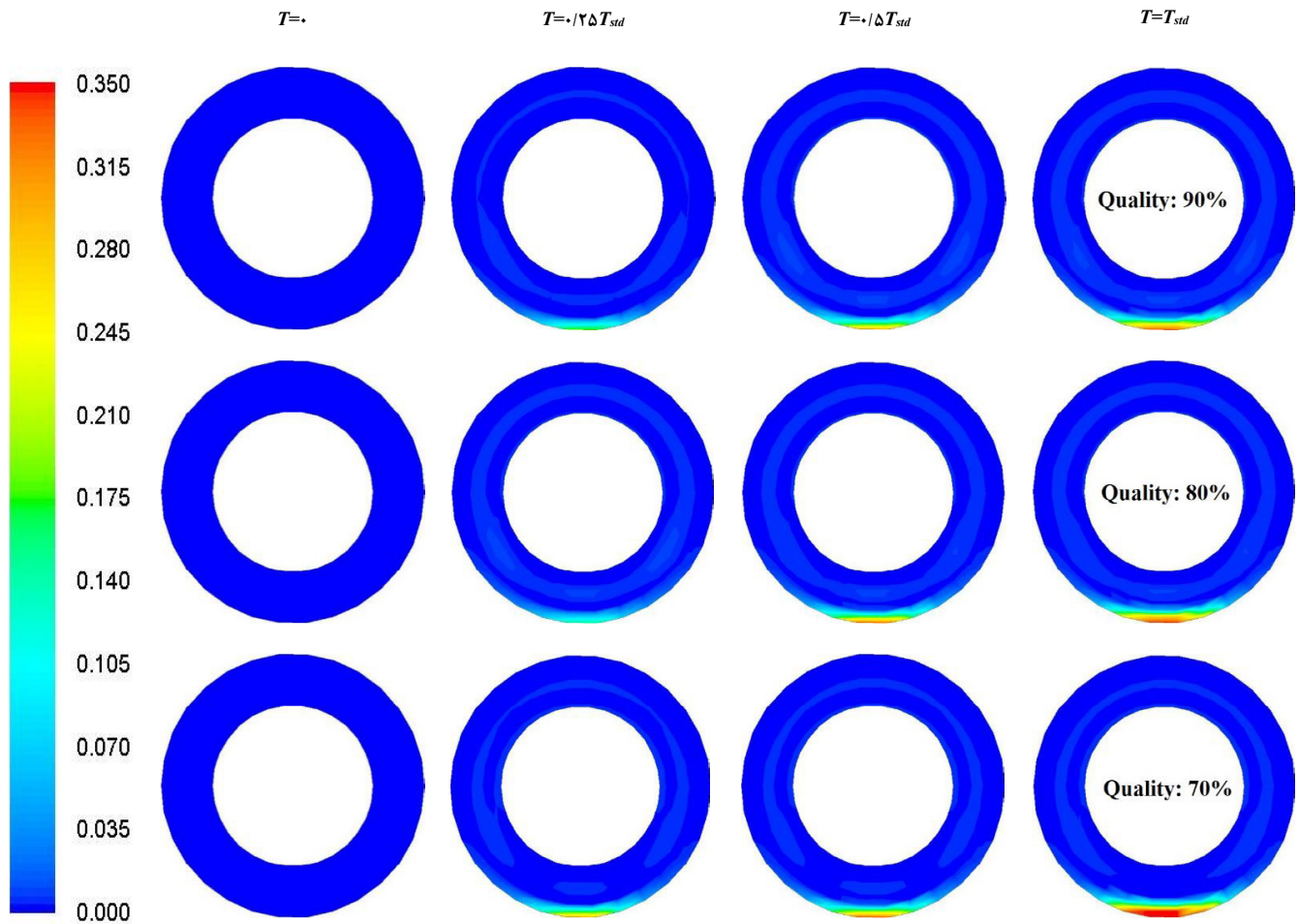
Fig. 6. Effect of foam injection velocity on the cuttings distribution in a horizontal well over time using 90% foam quality in a specific location from well inlet ($L= 11\text{ m}$)



شکل ۷: اثر کیفیت فوم بر غلظت خرده‌های حفاری در یک چاه افقی هم‌مرکز

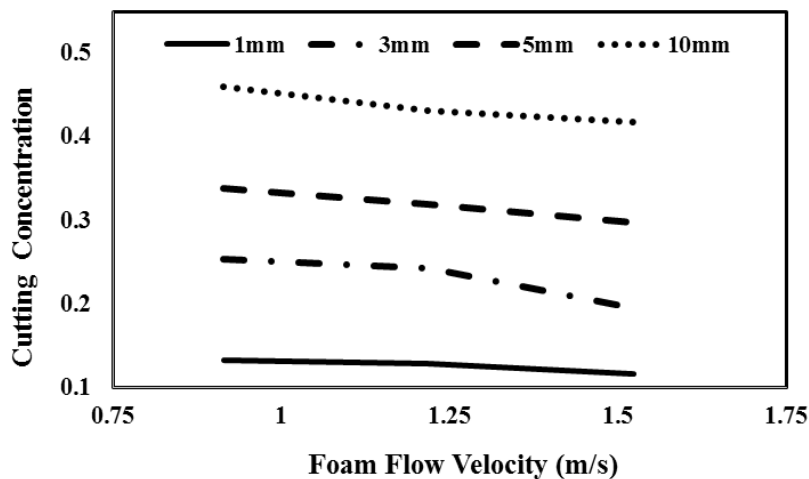
Fig. 7. Effect of foam quality on the cuttings concentration in a concentric horizontal well

می‌باشد. لازم به ذکر است که با توجه به جدول ۲، با افزایش کیفیت فوم ضرایب N و K رابطه رئولوژیکی قانون توان تغییر می‌کند و به تبع



شکل ۸. اثر کیفیت فوم بر پروفایل کانتوری تجمع خرده‌های حفاری درون چاه افقی در گذر زمان در سرعت تزریق ۹۲/۰ متر بر ثانیه (۳ فوت بر ثانیه) در مقطع (L=۱۱m) از ابتدای چاه

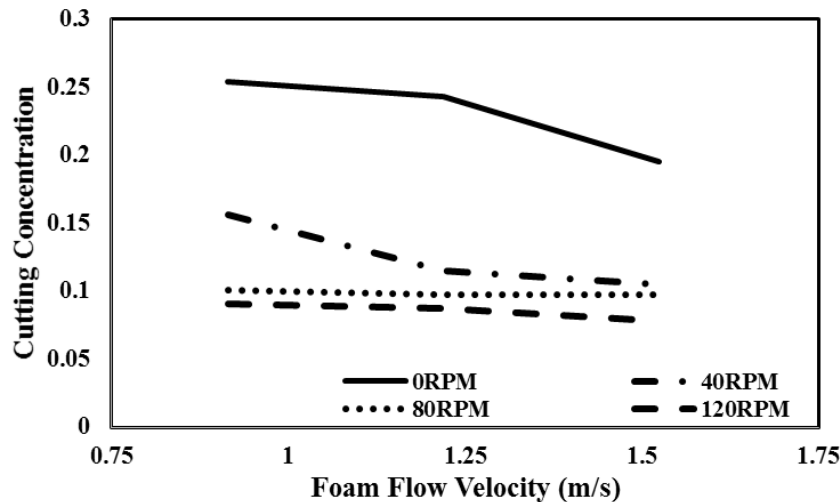
Fig. 8. Effect of foam quality on the cuttings distribution in a horizontal well over time using 0.92 m/s (3 ft/s) foam injection velocity in a specific location from well inlet (L= 11 m)



شکل ۹. تاثیر اندازه خرده‌ها بر میزان غلظت خرده‌های حفاری در یک چاه افقی هم‌مرکز در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد

Fig. 9. Effect of cuttings size on the cuttings concentration in a concentric horizontal well using 90% foam quality

آن ویسکوزیته فوم نیز دچار تغییر می‌شود. همچنین، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده توانسته است تطابق قابل قبولی با



شکل ۱۰. اثر چرخش لوله‌ها و سرعت تزریق فوم بر غلظت خرده‌های حفاری در چاه افقی در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد، سایز خرده‌ها ۳ میلی‌متر
 Fig. 10. Effects of drillpipe rotation and foam injection velocity on the cuttings concentration in a horizontal well using 90% foam quality and 3 mm cuttings size

داشته است. این مشاهده با نتایج مارتینز و همکاران [۵] در زمینه تاثیر افزایش قطر خرده‌های حفاری بر رشد بستر خرده‌ها و متعاقباً کاهش میزان تمیزسازی چاه نیز هم‌راستا می‌باشد.

لازم به ذکر است که مطابق نتایج فوق می‌توان دریافت که در دامنه سرعت فوم تزریقی، میزان تجمع خرده‌های درون چاه با بزرگ شدن قطر آن‌ها به شدت افزایش می‌یابد. شرایط مذکور براساس تاثیر نیروهای گرانشی و شناوری در انتقال خرده‌ها قابل توصیف است (روابط (۲۲) و (۲۳)).

$$F_G = \frac{1}{6} \rho_p g \pi d_p^3 \quad (22)$$

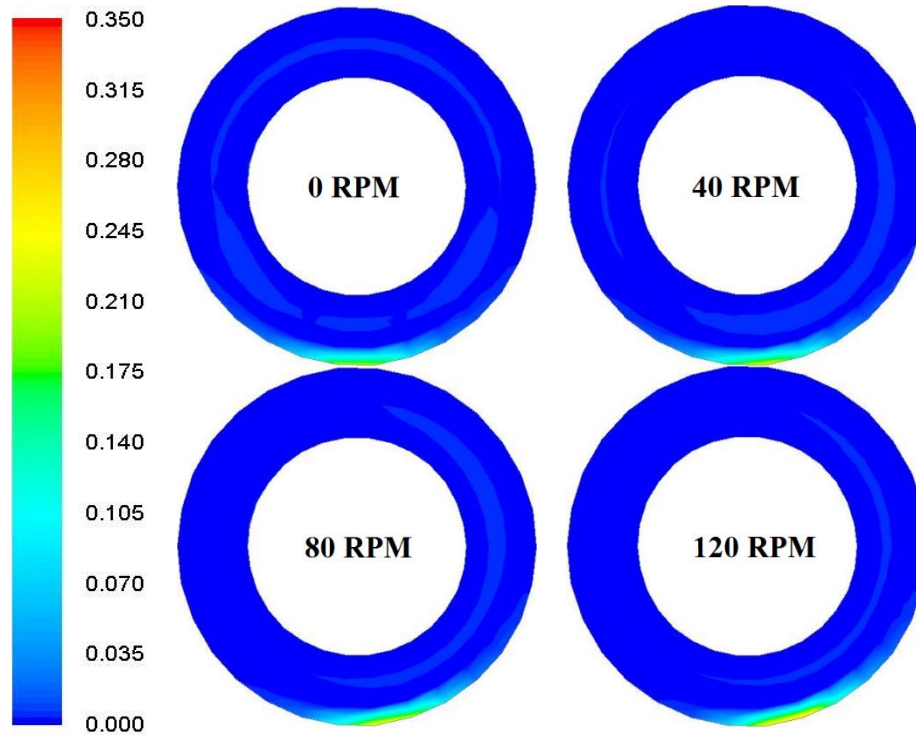
$$F_B = \frac{1}{6} \rho_f g \pi d_p^3 \quad (23)$$

که در این روابط d_p قطر خرده‌ها و ρ_p نیز چگالی خرده‌های حفاری می‌باشد. در واقع مطابق روابط فوق، نیروهای گرانشی و شناوری نسبت مستقیمی با توان سوم قطر خرده‌های حفاری دارد. اما از آنجایی که چگالی خرده‌ها به مراتب بیشتر از چگالی سیال حفاری (فوم) می‌باشد، بنابراین نیروی گرانشی بر نیروی شناوری غلبه کرده، به طوری که با افزایش قطر خرده‌ها نیروی گرانشی وارد شده بر آن‌ها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر مطابق رابطه (۱۳)، سرعت لغزش خرده‌ها نیز با بزرگ شدن خرده‌ها افزایش می‌یابد که مجموعه این موارد منجر به تشکیل بستر ساکن خرده‌ها در فضای حلقوی چاه می‌گردد.

داده‌های آزمایشگاهی چن و همکاران [۹] داشته باشد، به گونه‌ای که اختلاف بین نتایج مدل و آزمایشگاه در کیفیت‌های مختلف فوم در حدود ۴ درصد می‌باشد.

شکل ۸ نیز پروفایل کانتوری توزیع خرده‌ها در یک مقطع مشخصی از ورودی چاه به واسطه تغییرات کیفیت فوم را در گذر زمان برای سرعت تزریق ۰/۹۲ متر بر ثانیه (۳ فوت بر ثانیه) نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصله می‌توان مشاهده کرد که میزان انتقال خرده‌ها در کیفیت فوم ۹۰ درصد در زمان‌های یکسان، بیشتر از کیفیت‌های دیگر است. همچنین براساس روند کانتورها مشاهده می‌شود که با افزایش کیفیت فوم از ۷۰ به ۹۰ درصد، توانایی حمل و انتقال خرده‌ها توسط فوم به دلیل بهبود رفتار رئولوژی آن افزایش یافته است. همچنین با افزایش کیفیت فوم، ویسکوزیته ظاهری فوم افزایش یافته و از ته نشین شدن سریع خرده‌ها جلوگیری می‌کند.

یکی دیگر از پارامترهای موثر در تمیزسازی چاه، سایز خرده‌های حفاری می‌باشد. شکل ۹ تاثیر اندازه خرده‌ها در تمیزسازی محیط یک چاه افقی هم‌مرکز در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد را نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصله، با افزایش سایز خرده‌ها از ۱ به ۱۰ میلی‌متر، غلظت خرده‌های درون چاه از ۰/۱۲ به ۰/۴۲ افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت فوم تزریقی عملاً تاثیری در میزان انتقال خرده‌های با سایز کوچک ندارد؛ به طوری که میزان غلظت خرده‌های با سایز ۱ میلی‌متر با افزایش سرعت تزریق فوم از ۰/۹۲ الی ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۳ به ۵ فوت بر ثانیه) تغییر ناچیزی



شکل ۱۱. اثر چرخش لوله‌های حفاری بر پروفایل کانتوری تجمع خرده‌های درون چاه افقی هم‌مرکز در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۵۳/۱ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) در مقطع (L=۱۱ m) از ابتدای چاه

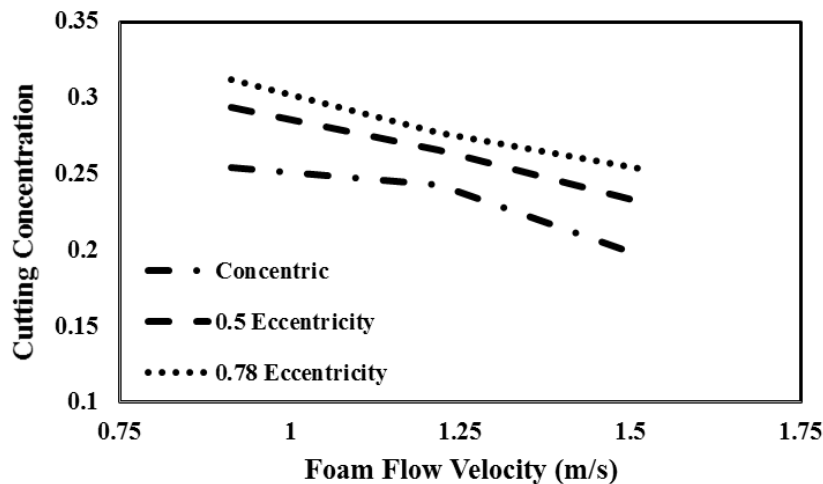
Fig. 11. Effect of drillpipe rotation on the cuttings distribution in a concentric horizontal well using 90% foam quality and 1.53 m/s (5 ft/s) injection velocity in a specific location from well inlet (L= 11 m)

سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) می‌رسد. مطابق نتایج حاصله می‌توان دریافت که با اعمال سرعت چرخشی به لوله‌های حفاری، سرعت مماسی^۱ سیال حفاری به صورت چشم‌گیری افزایش یافته که این امر منجر به ایجاد نیروی درگ در راستای مماسی می‌شود. متعاقباً حضور این نیرو از ته‌نشین شدن خرده‌ها و ایجاد بستر ساکن در درون چاه جلوگیری کرده و به بهبود تمیزسازی چاه کمک می‌نماید. همچنین مطابق نتایج حاصله می‌توان دریافت که با افزایش سرعت چرخش لوله‌های حفاری خصوصاً در بازه ۸۰ الی ۱۲۰ دور بر دقیقه، این اثر به شدت افزایش می‌یابد به طوری که اثر سرعت تزریق فوم بر غلظت خرده‌های حفاری درون چاه ناچیز می‌شود. این نتایج با مطالعات صورت گرفته توسط اوزبایگلو و همکاران [۲۳] در زمینه تاثیر مثبت چرخش لوله‌های حفاری در انتقال خرده‌ها همسو می‌باشد.

شکل ۱۱ نیز پروفایل کانتوری تجمع خرده‌ها در یک مقطع مشخصی از ورودی چاه به واسطه اثر چرخش لوله‌های حفاری در

چرخش لوله‌های حفاری نیز نقش مهمی در تمیزسازی چاه خواهد داشت. از این رو شکل ۱۰ به بررسی چگونگی تاثیر چرخش لوله‌های حفاری بر انتقال خرده‌های درون یک چاه افقی هم‌مرکز پرداخته است. باتوجه به نتایج این مطالعه مشاهده می‌شود که با اعمال سرعت چرخشی، توزیع خرده‌ها درون محیط چاه به صورت نامتقارن شکل گرفته و غلظت خرده‌های حفاری درون چاه به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. در واقع چرخش لوله‌های حفاری منجر به حرکت اوربیتالی لوله‌ها و ایجاد حالت سوسپانسیونی خرده‌ها در سیال تزریقی درون چاه شده و بدین ترتیب امکان جابجایی راحت‌تر خرده‌های تجمع یافته در قسمت پایینی لوله‌ها را به سمت بخش‌های بالایی محیط فضای حلقوی فراهم می‌کند. مطابق نتایج حاصله، با افزایش سرعت چرخش لوله‌ها از ۰ تا ۴۰ دور بر دقیقه غلظت خرده‌های حفاری در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) از ۰/۲۰ به ۰/۱۱ کاهش یافته است. همچنین با افزایش بیشتر سرعت چرخشی از ۸۰ به ۱۲۰ دور بر دقیقه، غلظت خرده‌ها کاهش بیشتری داشته و به ترتیب به مقدار ۰/۱۰ و ۰/۰۸ در

1 Tangential Velocity



شکل ۱۲. اثر خروج از مرکز لوله‌های حفاری بر غلظت خرده‌ها در چاه افقی در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۰/۹۲ متر بر ثانیه (۳ فوت بر ثانیه) و سایز خرده‌ها ۳ میلی‌متر

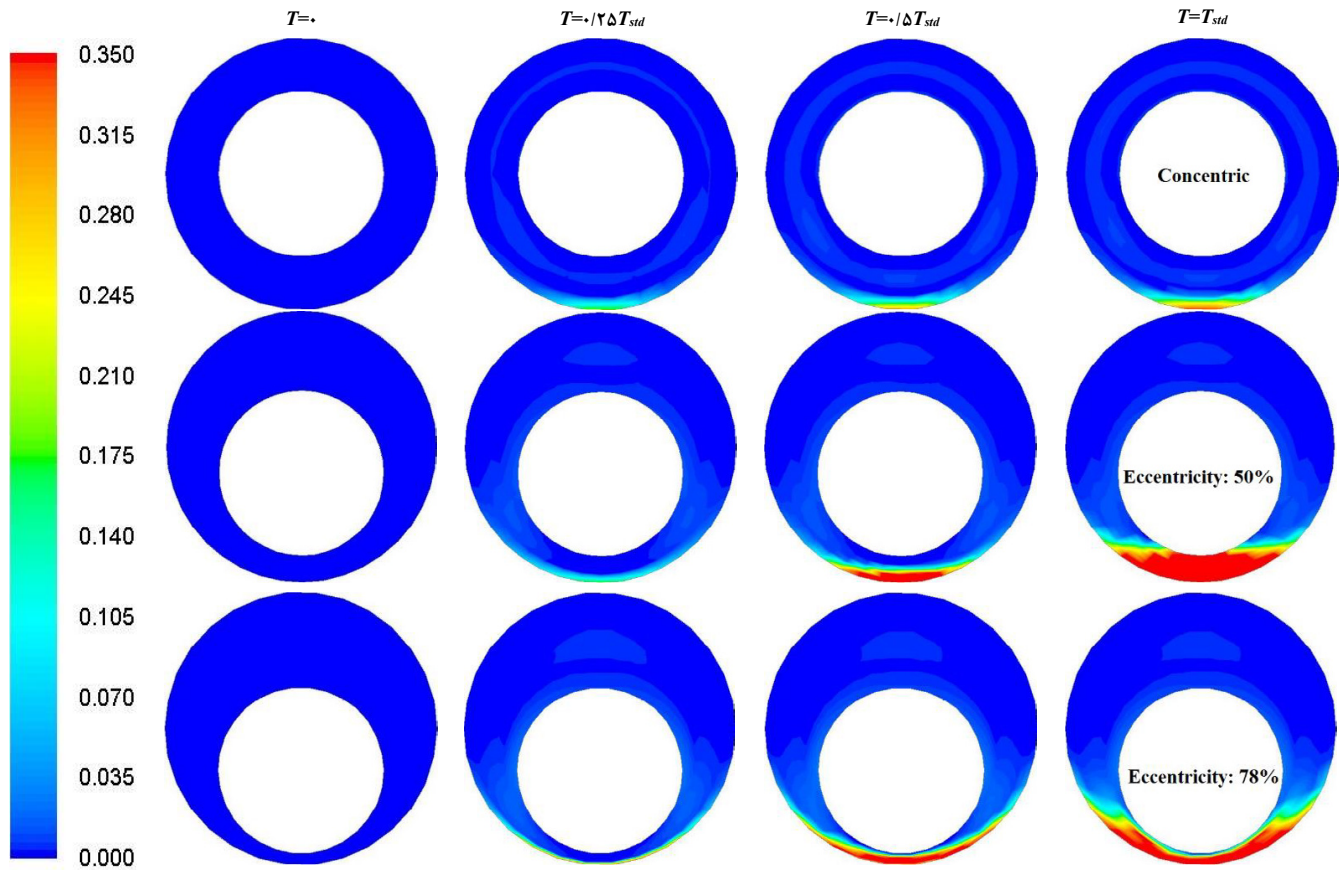
Fig. 12. Effect of drillpipe eccentricity on the cuttings concentration in a horizontal well using 90% foam quality, 0.92 m/s (3 ft/s) injection velocity and 3 mm cuttings size

حفاری و لوله جداري افزایش می‌یابد. در واقع با خارج شدن لوله‌های حفاری از شرایط هم‌مرکزی، توزیع سرعت درون محیط چاه به صورت ناهمسانی شکل می‌گیرد، به طوری که افت سرعت سیال حفاری در قسمت‌های پایینی محیط حلقوی که فاصله لوله‌های حفاری و جداري به علت خروج از مرکز کاهش یافته، مشاهده می‌شود. این امر منجر به کاهش نیروهای بالابری و درگ اعمالی به خرده‌ها شده و متعاقباً کاهش ظرفیت انتقال خرده‌ها را به دنبال دارد. تحت شرایط این مطالعه، با تغییر وضعیت لوله‌ها از حالت هم‌مرکزی به وضعیت خروج از مرکز ۵۰ درصد، غلظت خرده‌های حفاری از ۰/۲۵ به ۰/۲۹ خواهد رسید. همچنین با افزایش خروج از مرکز تا ۷۸ درصد، غلظت خرده‌های تا حدود ۰/۳۲ افزایش یافته است.

شکل ۱۳ نیز پروفایل کانتوری توزیع خرده‌ها در یک سطح مقطع مشخص از ورودی چاه تحت شرایط مختلف هم‌مرکزی لوله‌ها را در گذر زمان نشان می‌دهد. نتایج حاصله گویای این مطلب است که با خارج شدن لوله‌ها از شرایط هم‌مرکزی، خرده‌ها در فاصله بین لوله‌حفاری و جداري انباشته شده و ارتفاع بستر ساکن خرده‌ها درون محیط چاه افزایش می‌یابد. این امر به دلیل کاهش فضای لازم برای عبور خرده‌ها و همچنین کاهش نیروهای درگ و بالابری اعمال شده به خرده‌ها در قسمت باریک درون چاه بوده که متعاقباً باعث افزایش ته‌نشینی خرده‌ها در این فضا می‌گردد. مطابق نتایج حاصله، به واسطه خارج شدن لوله‌های حفاری از شرایط هم‌مرکزی، بستر خرده‌ها درون

حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل، با اعمال سرعت چرخشی به لوله‌های حفاری، بستر خرده‌ها به صورت نامتقارن درون محیط چاه شکل می‌گیرد که این امر به دلیل سرعت مماسی اعمال شده از طرف سیال حفاری به خرده‌های درون چاه می‌باشد. به عنوان مثال در شرایط سرعت چرخش ۴۰ دور بر دقیقه، خرده‌های موجود درون چاه از وضعیت بستر متقارن (مشابه آنچه که در شرایط لوله‌های فاقد چرخش رخ می‌دهد) خارج می‌شوند که این وضعیت با اعمال سرعت‌های چرخشی ۸۰ و ۱۲۰ دور بر دقیقه شدت بیشتری می‌گیرد.

یکی دیگر از چالش‌های متداول در عملیات حفاری، رخداد شرایط خروج از مرکز لوله‌های حفاری به علت تاثیرگذاری نیروی گرانشی است که می‌تواند بر روی بازدهی انتقال خرده‌ها از چاه تاثیرگذار باشد [۲۴]. به منظور بررسی تاثیر شرایط غیر هم‌مرکز بودن لوله حفاری نسبت به لوله جداري در میزان تمیزسازی چاه، میزان انتقال خرده‌ها در سه حالت هم‌مرکز بودن لوله‌ها، شرایط خروج از مرکز ۵۰ و ۷۸ درصد بررسی شد. شکل ۱۲ اثر خروج از مرکز لوله‌های حفاری را در انتقال خرده‌ها در حضور کیفیت فوم ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۰/۹۲ متر بر ثانیه (۳ فوت بر ثانیه) نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصله با خارج شدن لوله‌ها از شرایط هم‌مرکزی، مقدار خرده‌های حفاری درون محیط چاه به علت انباشته شدن خرده‌ها در فضای مابین لوله‌های



شکل ۱۳. اثر خروج از مرکز چاه بر پروفایل کانتوری تجمع خرده‌های حفاری درون چاه افقی در گذر زمان در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۰/۹۲ متر بر ثانیه (۳ فوت بر ثانیه) و سایز خرده‌ها ۳ میلی‌متر در مقطع (L=۱۱ m) از ابتدای چاه

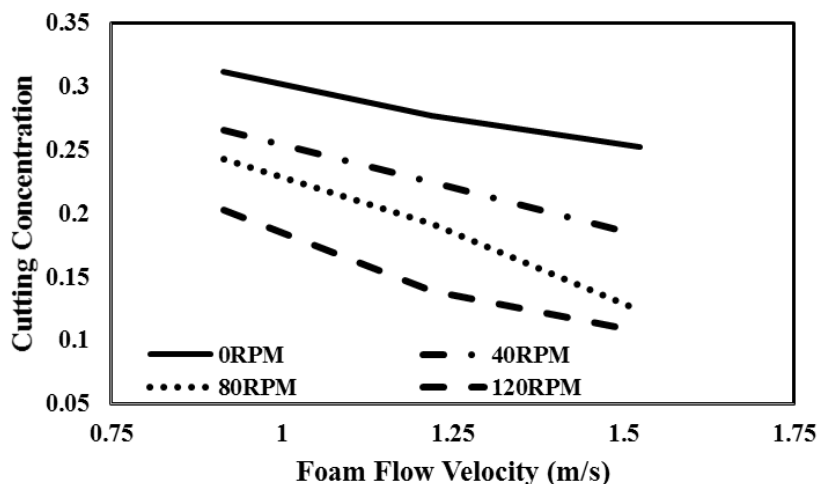
Fig. 13. Effect of drillpipe eccentricity on the cuttings distribution in a horizontal well over time using 90% foam quality, 0.92 m/s (3 ft/s) injection velocity and 3 mm cuttings size in a specific location from well inlet (L= 11 m)

با افزایش نیروی درگ وارد شده بر بستر خرده‌ها منجر به تخریب و پراکنده شدن بستر ساکن خرده‌ها شود. بدین ترتیب فضای موثر جهت جریان فوم درون چاه افزایش می‌یابد که متعاقباً تمیزسازی بهتر چاه را به دنبال خواهد داشت. با توجه به نتایج به دست آمده با افزایش سرعت چرخش لوله‌ها از ۰ تا ۴۰ دور بر دقیقه، غلظت نهایی خرده‌ها در محیط چاه غیر هم‌مرکز با استفاده از فوم ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۰/۹۲ متر بر ثانیه (۳ فوت بر ثانیه) از ۰/۲۵ به ۰/۱۸ کاهش می‌یابد. در ادامه با افزایش سرعت چرخشی از ۸۰ به ۱۲۰ دور بر دقیقه، غلظت خرده‌ها کاهش بیشتری داشته و در نهایت به مقدار ۰/۱۰ می‌رسد.

شکل ۱۵ نیز تاثیر توامان چرخش لوله‌های حفاری و نیز شرایط خروج از مرکز بودن لوله‌ها را بر پروفایل کانتوری توزیع خرده‌ها در یک سطح مقطع مشخصی از ورودی چاه در حضور کیفیت فوم ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) نشان

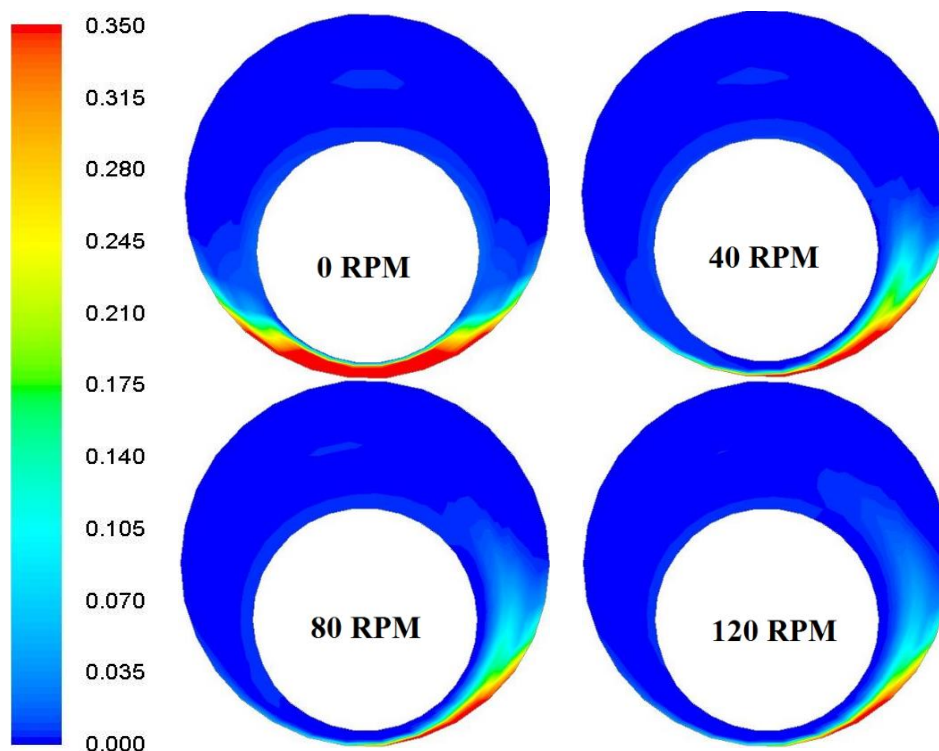
محیط چاه به تدریج شروع به تشکیل شدن کرده و تا رسیدن به زمان پایا گسترش می‌یابد. همچنین پروفایل کانتوری نشان می‌دهد که خارج شدن لوله‌ها از شرایط هم‌مرکزی منجر به تجمع مقداری از خرده‌ها در قسمت بالایی لوله حفاری گشته که این مقدار با افزایش خروج از مرکزی، تشدید می‌شود.

حال جهت بررسی توامان چرخش لوله‌های حفاری و نیز شرایط خروج از مرکز بودن لوله‌ها که عموماً در شرایط واقعی عملیات حفاری رخ می‌دهد، میزان غلظت خرده‌ها در شرایط یک چاه افقی در شکل ۱۴ نشان داده شده است. نتایج حاصله در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و نیز شرایط خروج از مرکزی ۷۸ درصد می‌باشد. مطابق نتایج به دست آمده با اعمال سرعت چرخشی به لوله‌های حفاری، غلظت خرده‌های حفاری درون چاه کاهش یافته است. در واقع چرخش لوله‌های حفاری سبب می‌شود که سرعت مماسی ایجاد شده بر سرعت محوری خرده‌های درون چاه تاثیر گذاشته و



شکل ۱۴. اثر توامان چرخش لوله‌ها و شرایط خروج از مرکزی چاه بر غلظت خرده‌ها در یک چاه افقی در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سایز خرده‌ها ۳ میلی‌متر

Fig. 14. Effects of drillpipe rotation and eccentricity on the cuttings concentration in a horizontal well using 90% foam quality and 3mm cuttings size



شکل ۱۵. اثر توامان چرخش لوله‌ها و شرایط خروج از مرکزی چاه بر پروفایل کانتوری تجمع خرده‌های درون چاه افقی در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه (۵ فوت بر ثانیه) و سایز خرده‌ها ۳ میلی‌متر در مقطع (L=۱۱ m) از ابتدای چاه

Fig. 15. Effects of drillpipe rotation and eccentricity on the cuttings distribution in a horizontal well using 90% foam quality, 1.53 m/s (5 ft/s) injection velocity and 3 mm cuttings size in a specific location from well inlet (L= 11 m)

لوله‌ها امکان اعمال تنش برشی به خرده‌ها را امکان‌پذیر می‌کند که این امر موجب تخریب بیشتر بستر خرده‌ها گردیده و به بهبود تمیزسازی چاه کمک می‌کند.

می‌دهد. مطابق نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که با اعمال سرعت چرخشی، بستر خرده‌ها به صورت نامتقارن شکل می‌گیرد. همچنین به علت نزدیکی لوله‌های حفاری به بستر خرده‌ها، چرخش

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد فوم جهت انتقال خرده‌های حفاری در شرایط یک چاه افقی با استفاده از محیط دینامیک سیالات محاسباتی مدل‌سازی شد. همچنین تاثیر پارامترهای سرعت و کیفیت فوم تزریقی، اندازه خرده‌های حفاری، شرایط خروج از مرکز بودن لوله‌های حفاری و نیز سرعت چرخش لوله‌های حفاری در انتقال خرده‌های حفاری مورد بررسی قرار گرفت. اعم نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشد:

۱- افزایش سرعت تزریق فوم منجر به کاهش غلظت خرده‌های درون چاه و بهبود تمیزسازی چاه می‌شود. با افزایش سرعت تزریق فوم به ۱/۵۳ متر بر ثانیه، غلظت خرده‌های درون چاه نسبت به شرایط سرعت تزریق ۰/۹۲ متر بر ثانیه در حدود ۱/۳ برابر کاهش یافت، همچنین نتایج حاصل از مدل تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی داشت.

۲- با افزایش کیفیت فوم تزریقی، ویسکوزیته سیال حفاری افزایش یافته و همین امر باعث بهبود قابلیت حمل خرده‌ها توسط فوم شد، به طوری که در تمیزسازی با استفاده از فوم با کیفیت ۹۰ درصد، غلظت خرده‌های درون چاه، نسبت به حالت تمیزسازی با استفاده از فوم ۷۰ درصد، در حدود ۱/۲ برابر کاهش یافت.

۳- با افزایش قطر خرده‌های حفاری از ۱ تا ۱۰ میلی‌متر، غلظت خرده‌های درون چاه افزایش یافته و تمیزسازی محیط درون چاه دشوارتر می‌گردد. همچنین نتایج نشان داد که افزایش سرعت فوم تزریقی عملاً تاثیری در میزان انتقال خرده‌های با سایز کوچک ندارد.

۴- با چرخش لوله‌های حفاری بستر خرده‌های درون چاه به صورت نامتقارن شکل گرفته و نسبت به حالت ایستا، غلظت خرده‌های درون چاه کاهش می‌یابد. براساس نتایج حاصله در حضور فوم با کیفیت ۹۰ درصد و سرعت تزریق ۱/۵۳ متر بر ثانیه، افزایش سرعت چرخشی از ۰ تا ۸۰ دور بر دقیقه منجر به کاهش ۲/۵ برابری غلظت نهایی خرده‌ها در چاه شد.

۵- با خارج شدن لوله‌های حفاری از شرایط هم‌مرکز، تجمع خرده‌ها درون محیط چاه افزایش یافته و منجر به کاهش تمیزسازی محیط چاه می‌گردد. با این وجود نتایج به دست آمده نشان داد که در حضور فوم، اعمال سرعت چرخشی به لوله‌های حفاری در شرایط غیر هم‌مرکز، اثر مثبتی در جهت بهبود تمیزسازی چاه دارد.

۶- نتایج حاصل از این مطالعه، بیانگر پتانسیل مطلوب فوم

به‌عنوان یک سیال حفاری کارآمد جهت انتقال خرده‌های حفاری در شرایط یک چاه افقی می‌باشد.

علائم

A	سطح مقطع (m^2)
A_p	سطح مقطع خرده‌ها (m^2)
$C_{conc,i}$	مقدار اولیه خرده‌ها
C_D	ضریب درگ
C_L	ضریب بالابری
CC	غلظت خرده‌های درون چاه
d_p	قطر خرده‌ها (mm)
D_{hole}	قطر چاه (cm)
D_{pipe}	قطر لوله‌حفاری (cm)
e	ضریب خروج از مرکز
E	فاصله مراکز دو لوله (cm)
F	نیرو (N)
F_B	نیروی شناوری (N)
F_D	نیروی درگ (N)
F_G	نیروی گرانشی (N)
F_L	نیروی بالابری (N)
F_{vm}	نیروی جرم مجازی (N)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
I	تنسور واحد
K	شاخص سازگاری فوم ($Pa.s^n$)
K_{pq}	ضریب تبادل مومنوم بین فازی
m	جرم (kg)
n	تعداد فاز
N	شاخص رفتار سیال
N_{Re}	عدد رینولدز سیال حفاری
$N_{Re,p}$	عدد رینولدز خرده‌ها
P	فشار (Pa)
Q	دبی جریان سیال (m^3/s)
R	نیروی برهم‌کنش بین فازی (N)

- complex structure wells, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37 (2014) 560-568.
- [3] Y. Wang, C. Thiberville, S.I. Kam, Modeling of foam-assisted wellbore cleanup and drilling processes with both dry-and wet-foam rheological properties, in: SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference, Society of Petroleum Engineers, 2018.
- [4] A. Saxena, A. Pathak, K. Ojha, S. Sharma, Experimental and modeling hydraulic studies of foam drilling fluid flowing through vertical smooth pipes, Egyptian journal of petroleum, 26(2) (2017) 279-290.
- [5] A. Martins, A. Lourenco, C. De Sa, Foam properties requirements for proper hole cleaning while drilling horizontal wells in underbalanced conditions, in: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- [6] Y. Li, E. Kuru, Numerical modelling of cuttings transport with foam in horizontal wells, Journal of Canadian Petroleum Technology, 42(10) (2003).
- [7] E.M. Ozbayoglu, S.Z. Miska, T. Reed, N. Takach, Cuttings transport with foam in horizontal & highly-inclined wellbores, in: SPE/IADC Drilling Conference, Society of Petroleum Engineers, 2003.
- [8] M. Ozbayoglu, S. Miska, T. Reed, N. Takach, Using foam in horizontal well drilling: A cuttings transport modeling approach, Journal of Petroleum Science and Engineering, 46(4) (2005) 267-282.
- [9] Z. Chen, R.M. Ahmed, S.Z. Miska, N.E. Takach, M. Yu, M.B. Pickell, J.H. Hallman, Experimental study on cuttings transport with foam under simulated horizontal downhole conditions, SPE Drilling & Completion, 22(04) (2007) 304-312.
- [10] M. Duan, S. Miska, M. Yu, N.E. Takach, R.M. Ahmed, J.H. Hallman, Experimental study and modeling of cuttings transport using foam with drillpipe rotation, SPE Drilling & completion, 25(03) (2010) 352-362.
- [11] J. Xu, E. Ozbayoglu, S.Z. Miska, M. Yu, N. Takach, Cuttings Transport with Foam in Highly Inclined Wells at Simulated Downhole Conditions/Transport urobku wiertniczego przy użyciu piany w silnie nachylonych
- شعاع لوله‌جداری (cm) R_i
- شعاع لوله‌حفاری (cm) R_o
- نرخ حفاری (m/hr) R_p
- نسبت انتقال R_T
- ضریب منبع S
- سرعت (m/s) v
- حجم (m^3) V
- سرعت فضای حلقوی (m/s) v_a
- سرعت خالص خرده‌ها (m/s) v_c
- سرعت ورودی خرده‌ها (m/s) $v_{cut,i}$
- سرعت لغزش (m/s) v_s
- علایم یونانی**
- کسر حجمی (%) α
- نرخ برشی (s^{-1}) γ
- کیفیت فوم (%) Γ
- ویسکوزیته ($Pa \cdot s^n$) μ
- چگالی (kg/m^3) ρ
- چگالی خرده‌ها (kg/m^3) ρ_p
- تنش برشی (Pa) τ
- ویسکوزیته فازه توده ($Pa \cdot s^n$) λ
- زیرنویس‌ها**
- فوم f
- گاز g
- مایع l
- شماره فاز p
- شماره فاز q
- جامد s
- مراجع**
- [1] J. Li, S. Walker, Sensitivity analysis of hole cleaning parameters in directional wells, SPE Journal, 6(04) (2001) 356-363.
- [2] T. Yan, K. Wang, X. Sun, S. Luan, S. Shao, State-of-the-art cuttings transport with aerated liquid and foam in

- [18] A.T. Bourgoyne Jr, K.K. Millheim, M.E. Chenevert, F.S. Young Jr, Applied drilling engineering. Volume 2, (1986).
- [19] T. Larsen, A. Pilehvari, J. Azar, Development of a new cuttings-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells, SPE Drilling & Completion, 12(02) (1997) 129-136.
- [20] T.R. Sifferman, G.M. Myers, E.L. Haden, H.A. Wahl, Drill cutting transport in full scale vertical annuli, Journal of Petroleum Technology, 26(11) (1974) 1,295-291,302.
- [21] D. Graham, T. Jones, Settling and transport of spherical particles in power-law fluids at finite Reynolds number, Journal of non-newtonian fluid mechanics, 54 (1994) 465-488.
- [22] P. Saffman, The lift on a small sphere in a slow shear flow, Journal of fluid mechanics, 22(2) (1965) 385-400.
- [23] M.E. Ozbayoglu, A. Saasen, M. Sorgun, K. Svanes, Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells, in: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Society of Petroleum Engineers, 2008.
- [24] S. Walker, J. Li, The effects of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cuttings transport, in: SPE/ ICoTA Coiled Tubing Roundtable, Society of Petroleum Engineers, 2000.
- otworach w symulowanych warunkach w otworze, Archives of Mining Sciences, 58(2) (2013) 481-494.
- [12] R. Rooki, F.D. Ardejani, A. Moradzadeh, M. Norouzi, Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics, Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 4(3) (2014) 263-273.
- [13] O. Heydari, E. Sahraei, P. Skalle, Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD), Journal of Petroleum Science and Engineering, 156 (2017) 801-813.
- [14] S. Akhshik, M. Rajabi, CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions, Journal of Petroleum Science and Engineering, 160 (2018) 229-246.
- [15] J. Zhang, W. Luo, C. Li, T. Wan, Z. Zhang, C. Zhou, Study of the cuttings transport in stable foam drilling, Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, 73 (2018) 30.
- [16] B. Shao, Y. Yan, X. Yan, Z. Xu, A study on non-spherical cuttings transport in CBM well drilling by coupled CFD-DEM, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 13(1) (2019) 579-590.
- [17] ANSYS FLUENT, Fluent User's Guide, version 15, ANSYS Inc.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Vaziri, M. Simjoo, M. Chahardowli, Modeling of Drilling Cuttings Transport by Foam in Horizontal Well Condition Using Computational Fluid Dynamics, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 1) (2021) 357-374.

DOI: 10.22060/mej.2019.16423.6364

