

مقایسه‌ی بین شبیه‌سازی آزمایشگاهی و نرم‌افزاری مشکلات حمل خرده‌ها در حفاری اکتشافی

بهنام آمانا*، دانشگاه صنعتی امیرکبیر • محمدرضا خرسند موقر، دانشکده نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

حمل بهینه‌ی کنده‌های حفاری یکی از ضروری‌ترین و پیچیده‌ترین پارامترهای حفاری به‌خصوص در حفاری جهت‌دار بوده که نقش به‌سزایی در کاهش هزینه‌های حفاری و افزایش برداشت از مخزن ایفا می‌کند. بحث انتقال کنده‌های حفاری از فضای حلقوی به بیرون از چاه تحت تأثیر پارامترهای زیادی بوده که بررسی آنها می‌باید به‌صورت هم‌زمان صورت پذیرد. در این زمینه، تحقیقات فراوانی صورت گرفته و منجر به ارائه فرمول‌های تجربی زیادی شده است. اما استفاده از این روابط منوط به دسترسی به امکانات آزمایشگاهی و داده‌های مربوط به دستگاه‌های خاص آزمایشگاهی است که در عمل غیرممکن به‌نظر می‌رسد. از این‌رو دینامیک سیالات محاسباتی به‌عنوان یک ابزار مدل‌ساز در بازه‌ی وسیعی از مهندسی نفت نتایج موفقیت‌آمیزی به‌جای گذاشته است و از آنجایی که قابلیت در نظر گرفتن جریان چند فاز به همراه انعطاف‌پذیری مناسب در تغییر پارامترها را دارد، موجب شده که بدون ایجاد تغییرات سخت‌افزاری در دستگاه، نتایج مناسبی بدون صرف وقت زیاد و هزینه حاصل گردد. در این پروژه، بعد از شبیه‌سازی مدل توسط دینامیک سیالات محاسباتی، نتایج پیش‌بینی شده به کمک نرم‌افزار با نتایج داده‌های آزمایشگاهی به‌دست آمده از دستگاه شبیه‌ساز حمل کنده‌های حفاری در آزمایشگاه حفاری دانشکده نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر مقایسه و راستی‌آزمایی می‌گردند. سپس با استفاده از الگوریتم طراحی آزمایش، شرایط مختلف پارامترهای کلیدی موثر بر انتقال کنده‌ها از جمله دبی سیال حفاری، اندازه‌ی کنده‌های حفاری شده، سرعت چرخش رشته‌ی حفاری و زاویه‌ی انحراف چاه شبیه‌ساز CFD مدل‌سازی شده و در نهایت، اثر تغییر تک‌تک این پارامترها بر رفتار انتقال کنده‌های حفاری مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

واژگان کلیدی:

دینامیک سیالات محاسباتی، تمیزکاری چاه، انتقال کنده‌های حفاری، حفاری انحرافی، دستگاه شبیه‌ساز حمل کنده‌های حفاری، فضای حلقوی

مقدمه

بر انتقال کنده‌های حفاری پرداخت و به این نتیجه رسید که چرخش رشته حفاری تأثیر شگرفی بر انتقال خرده‌ها دارد. اگرانجینی [۳] نیز زاویه‌ی انحراف چاه و تأثیر آن بر پدیده‌ی انتقال خرده‌های حفاری را بررسی نمود و نتیجه گرفت که زاویه‌ی بین ۴۵ تا ۵۵ برای انتقال ذرات زاویه بحرانی بوده و تمیزکاری چاه در این بازه دشوارتر است. براون و همکارانش [۴] به بررسی تأثیر زاویه بر انتقال کنده‌ها پرداختند و زوایای بین ۵۰ تا ۶۰ درجه را به‌عنوان دشوارترین زوایا برای تمیزکاری چاه معرفی کردند. سیفرمن و همکارانش [۵] با بررسی پارامترهایی از قبیل چرخش رشته حفاری و زاویه انحراف چاه و قطر ذرات حفاری نتایج خود را به این شرح بیان کردند که در زوایای نزدیک افقی و با ذراتی با قطر کم، چرخش رشته حفاری تأثیر بسیار زیادی بر انتقال کنده‌ها به خارج از چاه دارد. سانچز و همکارانش [۶] به بررسی چرخش رشته حفاری و تأثیر آن بر انتقال کنده‌ها با استفاده از کنده‌هایی با اندازه‌ی بین ۲ تا ۷ میلی‌متر پرداخت. وی نتایج خود را بدین‌گونه بیان کرد که در سرعت زیاد چرخش رشته حفاری و استفاده از سیالی با لزجت بالا، حمل خرده‌های ریزتر، آسان‌تر خواهد بود. بسل [۷] به مطالعه و بررسی

در اثر حفاری، خرده‌هایی از زمین کنده می‌شوند که تجمع این کنده‌ها در ته چاه منجر به بروز مشکلات زیادی از قبیل گیر لوله‌های حفاری، بالا رفتن گشتاور پیچشی، فرسایش مته و از همه مهمتر، کاهش سرعت حفاری که باعث افزایش زمان حفاری و بالا رفتن هزینه است، خواهد شد. برای دست‌یابی به یک تمیزکاری ایده‌آل، باید پارامترهای کلیدی موثر بر تشکیل لایه‌ی ایستا در فضای حلقوی مورد بررسی قرار گیرد. بدین‌منظور در سالیان اخیر مطالعات فراوانی پیرامون تمیزکاری چاه و حمل کنده‌های حفاری در زمینه‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری صورت گرفته است.

در مطالعات آزمایشگاهی، آقای زیدلر [۱] به‌عنوان یکی از پیشگامان مطالعه پیرامون انتقال کنده‌های حفاری معرفی می‌شود. وی با انجام آزمایش‌های فراوان به مطالعه پارامترهای موثر بر انتقال خرده‌های حفاری از جمله دبی سیال حفاری و چرخش رشته‌ی حفاری پرداخت. مشاهده شد که جریان آشفته و چرخش رشته حفاری موجب انتقال بهتر کنده‌های حفاری می‌شود. پدن و همکارانش [۲] به بررسی تأثیر تغییرات زاویه‌ی انحراف و چرخش رشته‌ی حفاری و اندازه‌ی کنده‌ها

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (behnam.amanna@gmail.com)

و برای فاز جامد عبارت است از :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha s \rho s V s) + \nabla \cdot (\alpha s \rho s V s) = -\alpha s \nabla P + \nabla \cdot \tau + \alpha s \rho s g - M \quad (5)$$

در این فرمول P فشار، T تانسور نیروهای ویسکوزیته و M مومنتوم انتقالی در واحد حجم است که شامل نیروهای دراگ، شناوری و لیفت می باشد. همان گونه که گفته شد در این پروژه برای تخمین ویسکوزیته موثر در حالت دو فازی از مدل K-ε در جریان آشفتنه استفاده شده است که برای فاز مایع رابطه آن عبارت است از :

$$\mu_{Eff} = \mu + \mu_{tl} \quad (6)$$

$$\mu_{tl} = C_{\mu} \rho_l K l^2 / \epsilon_s \mu \quad (7)$$

$$C_{\mu} = 0.09 \quad (8)$$

و برای فاز جامد عبارتست از :

$$\mu_{Eff} = \mu + \mu_{ts} \quad (9)$$

$$\mu_{ts} = C_{\mu} \rho_l K l^2 / \epsilon_s \mu \quad (10)$$

$$C_{\mu} = 0.09 \quad (11)$$

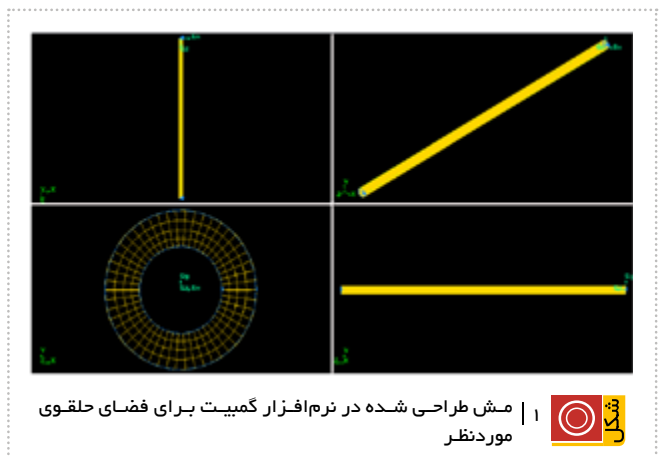
در این فرمول μ ویسکوزیته دینامیک، C_{μ} ثابت بدون بعدی است که در این مدل برابر با ۰،۰۹، ρ چگالی هر فاز و K در آن Turbulent kinetic energy و Turbulent dissipation energy است.

در این مقاله CFD به عنوان تکنیکی برای حل معادلات مذکور و شبیه سازی حرکت کندهای حفاری در فضای حلقوی مورد استفاده قرار گرفته است.

۲- شبیه سازی نرم افزاری

۲-۱- هندسه ی مدل و مش بندی

برای طراحی مدل و مش بندی آن از نرم افزار گمبیت [۱۲] استفاده شد که شامل یک لوله بیرونی به عنوان لوله جداری و یک لوله داخلی به عنوان لوله حفاری که به صورت هم مرکز بوده و ابعاد آن با مدل آزمایشگاهی یکسان می باشد. شایان ذکر است که در مدل طراحی شده همانند مدل آزمایشگاهی، لوله داخلی به صورت چرخشی عمل می کند که بیانگر چرخش رشته در حین حفاری است. همان طور که در شکل ۱- مشاهده می شود، تعداد کل مش ها در مقطع ۴ متری شبیه سازی، ۲۵۰۴۰۰ مش به سطح از نوع quad map و به حجم از نوع hex wedge/cooper می باشد.



شکل ۱ | مش طراحی شده در نرم افزار گمبیت برای فضای حلقوی موردنظر

تأثیر اندازه ی ذرات جامد در انتقال آنها و تمیزکاری چاه پرداخت، آزمایش های خود را روی خرده هایی با قطر بین ۲ تا ۷ میلیمتر انجام داد و به این نتیجه رسید که تمیزکاری و انتقال خرده های کوچک تر دشوارتر از خرده های بزرگ تر است. مارتینز [۸] مانند بسل آزمایش های خود را درخصوص تأثیر اندازه خرده ها بر روی ذراتی با قطر بین ۲ تا ۶ میلیمتر انجام داد و برعکس بسل به این نتیجه رسید که جابه جایی و حمل کندهای بزرگ تر دشوارتر خواهد بود.

در مبحث دینامیک سیالات محاسباتی^۱ بیلگسو [۹] یکی از اولین محققانی بود که به بررسی پارامترهای موثر بر انتقال کندهای حفاری در محیط دینامیک سیالات محاسباتی پرداخت. شبیه سازی نشان می داد که چرخش رشته حفاری به خصوص با کندهایی با قطر کوچک تر و همچنین زاویه ی انحراف تأثیر زیادی بر انتقال کندهای حفاری دارد. میشر [۱۰] برای شبیه سازی انتقال خرده های حفاری در محیط دینامیک سیالات محاسباتی از مدل اوپلرین استفاده کرد. نتایج وی از این قرار بود که با کاهش زاویه ی انحراف، انتقال کندهای حفاری به بیرون از فضای حلقوی دشوارتر خواهد بود. همچنین حمل کندهای بزرگ تر در آب راحت تر است. شبیه سازی های لی و همکارانش [۱۱] نشان دهنده ی تأثیر زیاد چرخش رشته ی حفاری بر آشفته سازی فضای حلقوی بوده که علاوه بر کاهش غلظت کندهای حفاری در فضای حلقوی، باعث شتاب گرفتن کندها و تسریع خروج آنها به بیرون از چاه می شود.

در این مطالعه با استفاده از محیط دینامیک سیالات محاسباتی به بررسی اثر پارامترهای کلیدی شامل دبی سیال حفاری، اندازه کندها، چرخش رشته ی حفاری و زاویه ی انحراف بر رفتار انتقال کندها^۲ پرداخته می شود.

۱- معادلات حاکم بر آزمایش ها

جهت مشاهده اثر دبی های متفاوت بر انتقال خرده های حفاری در جریان های دو فازی، از مدل اوپلرین- اوپلرین استفاده شد. از منظر فیزیک، مسئله آزمایش ها از قوانین پایستگی جرم، قانون دوم نیوتن و همچنین قانون بقای انرژی تبعیت می کنند.

معادله مومنتوم در جریان آشفته از مدل K-ε به دست آمده است. معادلات پیوستگی و مومنتوم در محیط دو فازی در زیر به اختصار بیان شده اند:

برای فاز مایع (l):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha l \rho l) + \nabla \cdot (\alpha l \rho l V l) = 0 \quad (1)$$

و برای فاز جامد (s):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha s \rho s) + \nabla \cdot (\alpha s \rho s V s) = 0 \quad (2)$$

$$\alpha s + \alpha l = 1 \quad (3)$$

که α درصد حجمی هر فاز و ρ چگالی هر فاز و V سرعت هر فاز است. معادلات مومنتوم که شامل نیروهای وارد بر هر فاز و برهمکنش دو فاز بر یکدیگر می باشد، برای فاز مایع عبارت است از :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha l \rho l V l) + \nabla \cdot (\alpha l \rho l V l V l) = -\alpha l \nabla P + \nabla \cdot \tau_l + \alpha l \rho l g + M \quad (4)$$

۲-۲- شرایط مرزی مدل

آزمایش بر اساس پارامترهای موجود که در بازه مشخصی تغییر می‌یابند، ۲۵ حالت برای اجرای برنامه در نظر گرفته شدند.

در این طراحی از مدل نوع response surface از روش central composite استفاده شده است.

پس از اجرای شبیه‌سازی‌های مربوطه بر اساس برنامه طراحی آزمایش، می‌توان روابط جهت پیش‌بینی رفتار کنده‌ها در فضای حلقوی و تأثیر پارامترهای موردنظر روی میزان تمیزکاری چاه یا همان غلظت کنده‌های مانده در چاه ارائه نمود.

روابط حاصل از شبیه‌سازی برنامه‌های اجرا شده به صورت نمودارهایی در بخش بعدی ارائه می‌گردند.

۳-۲- راستی‌آزمایی مدل شبیه‌سازی شده

در قسمت آزمایشگاهی این مطالعه، از یک دستگاه شبیه‌سازی حمل کنده شامل دو عدد پمپ جهت تزریق سیال و کنده‌های حفاری، یک الکتروموتور جهت چرخش رشته حفاری در فضای حلقوی، فشارسنج، یک تانک جهت تزریق کنده‌ها، یک ساختار فلزی جهت تسهیل تغییر زاویه و چهار متر لوله شفاف به قطر $\frac{1}{4}$ " به عنوان لوله جداری که داخل آن لوله‌ای به قطر $\frac{1}{8}$ " به عنوان رشته حفاری قرار دارد، استفاده شده است. ابتدا در محیط آزمایشگاه ۴ آزمایش در زاویه ۶۰ درجه با کنده‌هایی به قطر ۵ میلی‌متر و دور موتور ۶۰ rpm در دبی‌های مختلف انجام پذیرفت و سپس شبیه‌سازی این آزمایش‌ها در محیط CFD نیز انجام و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.

شکل ۲- نشانگر نتایج حاصله از درصد کنده‌های جابه‌جا شده در آزمایشگاه و محیط نرم‌افزاری در دبی‌های مختلف است. ملاحظه می‌شود که مدل شبیه‌سازی شده در CFD از دقت خوبی برخوردار است.

۴-۲- طراحی آزمایش

پس از راستی‌آزمایی مدل شبیه‌سازی شده در محیط CFD، جهت بررسی اثر پارامترهای کلیدی شامل زاویه انحراف، اندازه کنده‌ها، دبی سیال ورودی و چرخش لوله حفاری باید آزمایش‌های بیشتری طراحی، شبیه‌سازی و صورت پذیرد. بدین منظور با به کارگیری نرم‌افزار طراحی

۳- بررسی نتایج

۳-۱- تأثیر تغییرات دبی سیال حفاری و اندازه ذرات جامد بر تمیزکاری چاه

با بالا رفتن دبی، شدت جریان آشفته بیشتر شده و ذرات جامد موجود در لایه‌ی ایستا به سمت لایه‌ی پراکنده کشیده می‌شوند و به بیرون از فضای حلقوی منتقل خواهند شد. همانطور که در شکل ۳- مشاهده می‌شود، با افزایش دبی سیال حفاری، تجمع کنده‌ها در فضای حلقوی کاهش می‌یابد که تغییر اندازه کنده‌های حفاری تأثیری بر این روند کاهش ندارد. طبق شکل ۳- در همه‌ی دبی‌های استفاده شده با افزایش اندازه کنده‌های حفاری، انتقال آنها به خارج از فضای حلقوی کمی آسان‌تر و تجمع آنها نیز در این فضا کمی کمتر می‌شود.

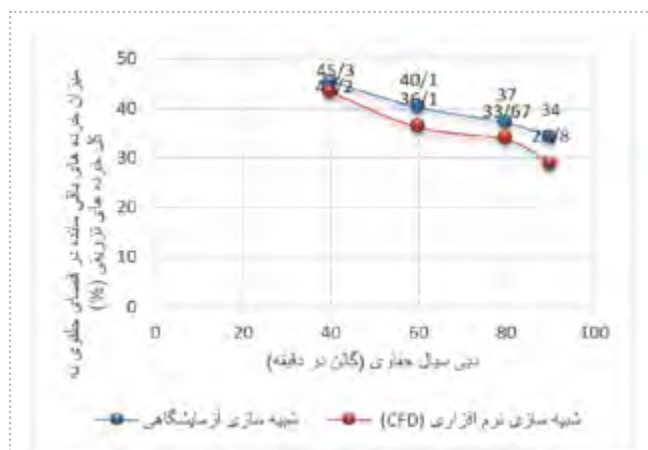
همچنین با مقایسه دو نمودار می‌توان دریافت که در دبی‌ها و اندازه ذرات برابر و سرعت چرخش یکسان رشته حفاری، تجمع کنده‌ها در زاویه ۳۰ درجه کمتر از زاویه ۶۰ درجه خواهد بود که البته تفاوت آن در مقایسه با تغییرات دبی به مراتب کمتر است.

۳-۲- تأثیر تغییرات چرخش رشته حفاری و اندازه ذرات جامد بر تمیزکاری چاه

همان‌گونه که انتظار می‌رود با چرخش رشته حفاری در سیال، نزدیک آن سرعت مماسی ایجاد می‌شود و نیروی مماسی درآنگ به واسطه‌ی لزجت سیال حفاری به خرده‌ها وارد می‌شود که می‌تواند به تمیزکاری چاه کمک کند. در صورت کم بودن نیروی درآنگ وارد بر خرده‌ها، ذرات جامد کمتری می‌توانند وارد جریان اصلی سیال حفاری شده و از چاه خارج شوند.

در نتیجه، به مرور زمان این ذرات جامد باقی‌مانده در فضای حلقوی ته‌نشین شده و تشکیل لایه‌ی ایستا می‌دهند که برای ادامه‌ی حفاری مشکل‌آفرین خواهد بود.

مطابق شکل ۴- در تمام سرعت‌ها، افزایش سرعت چرخش رشته حفاری، صرف نظر از اندازه ذرات، مانع از تجمع خرده‌ها در فضای حلقوی می‌شود. این چرخش رشته حفاری با ایجاد جریان آشفته، کنده‌های انباشته شده در بستر فضای حلقوی را بالا آورده و وارد جریان سیال می‌کند و به کمک جریان به بیرون از فضای حلقوی منتقل



۴ | مقایسه‌ی شبیه‌سازی آزمایشگاهی و نرم‌افزاری انتقال کنده‌های حفاری



از تأثیر تغییر زاویه بر تجمع خرده‌ها با در نظر گرفتن تغییرات دبی و یا چرخش رشته حفاری را می‌توان با نتایج ارائه شده در شکل-۶ نیز مشاهده کرد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با در نظر گرفتن جریان دو فازی مایع-جامد در فضای حلقوی ابتدا هندسه‌ی سه‌بُعدی مدل ساخته شد و سپس توسط دینامیک سیالات محاسباتی، شبیه‌سازی‌های مورد نظر انجام شد. نتایج به شرح زیر به دست آمدند:

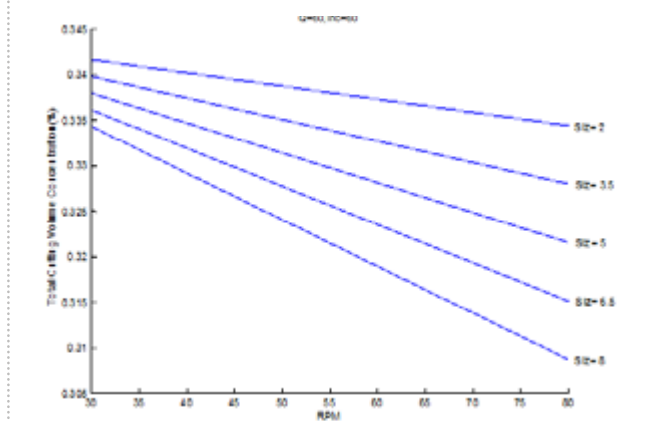
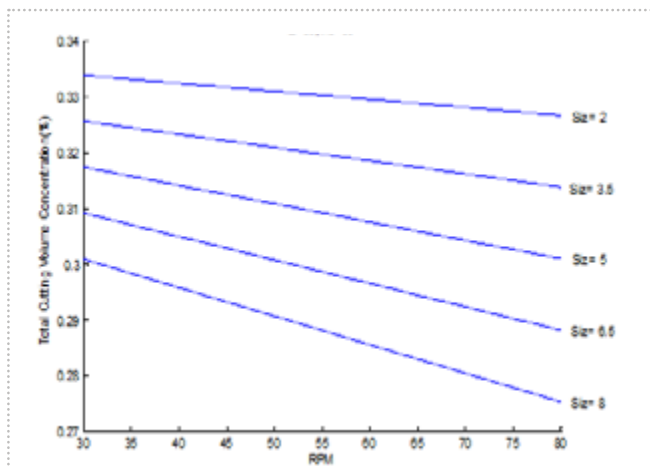
- ۱- در نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی مدل اوایل رین با موفقیت برای شبیه‌سازی رفتار دو فازی مایع-جامد و شبیه‌سازی آزمایشگاهی انتقال کنده‌های حفاری در چرخه‌ی حمل‌کنده‌ی موجود در دانشکده‌ی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر حاصل شد.
- ۲- غلظت کنده‌های حفاری در فضای حلقوی با افزایش دبی سیال حفاری کاهش می‌یابد. افزایش دبی سیال حفاری بر ذراتی با قطر بزرگ‌تر، تأثیر بیشتری دارد.
- ۳- هنگام استفاده از آب به عنوان سیال حفاری، انتقال کنده‌های حفاری

می‌شود. همچنین همانطور که قبلاً اشاره شد و در نمودارهای شکل-۴ مشاهده می‌شود، تغییر زاویه از ۳۰ به ۶۰ درجه موجب افزایش غلظت کنده‌های موجود در فضای حلقوی می‌شود.

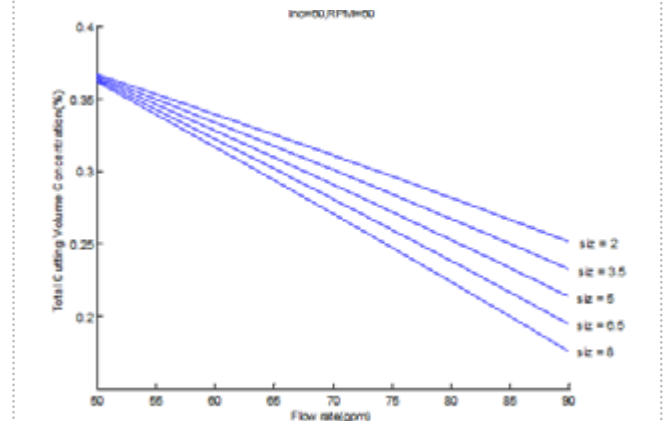
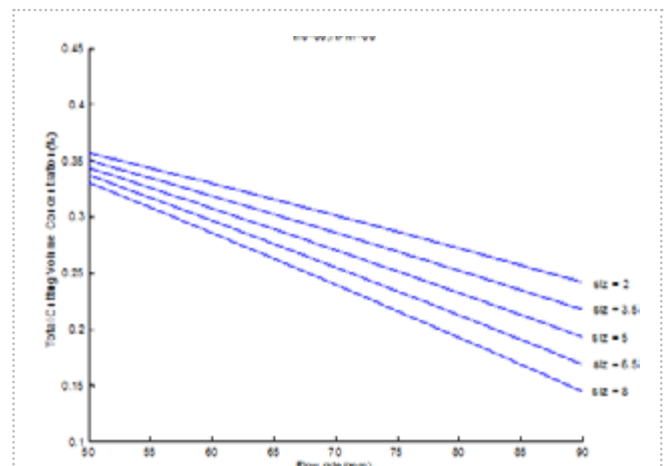
۳-۳- تأثیر تغییرات زاویه‌ی انحراف با دبی و چرخش رشته‌ی حفاری بر تمیزکاری چاه

برای بررسی اثر زاویه انحراف بر غلظت خرده‌ها شکل-۵ (تصویر پایین)، بر حسب تغییرات سرعت چرخش رشته‌ی حفاری در اندازه کنده‌ها برابر با ۵ میلی‌متر و دبی برابر با ۷۰ گالن در دقیقه ترسیم گردیده است. همچنین برای بررسی اثر زاویه انحراف بر غلظت خرده‌ها شکل-۵ (تصویر بالا) بر حسب تغییرات دبی در اندازه خرده‌های برابر با ۵ میلی‌متر و سرعت چرخش رشته حفاری برابر با ۶۰ دور در دقیقه ترسیم گردیده است.

مطابق شکل-۵ تغییرات غلظت ذرات جامد در فضای حلقوی بر حسب زاویه روند خطی نداشته و در محدوده‌ی زوایای ۴۵ تا ۶۰ درجه، تجمع خرده‌ها یک میزان حداکثری از خود نشان می‌دهد. این محدوده زاویه به‌عنوان زوایای بحرانی برای حفاری بیان می‌شوند. تطابق نتایج حاصله

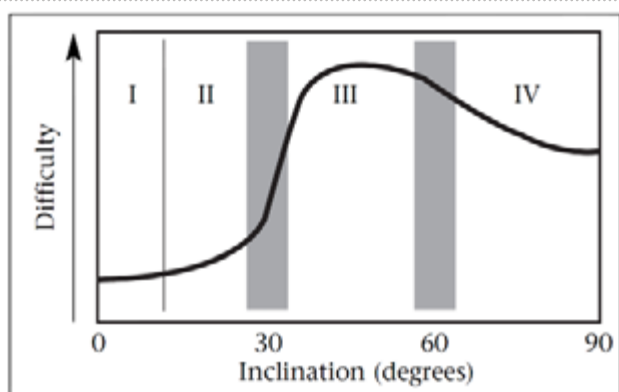


شکل ۴ | نمودار درصد حجمی کنده‌ها بر اساس سرعت چرخش رشته‌ی حفاری و اندازه‌ی کنده‌ها در زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه



شکل ۳ | نمودار درصد حجمی کنده‌ها بر اساس دبی سیال حفاری و اندازه‌ی کنده‌ها در زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه



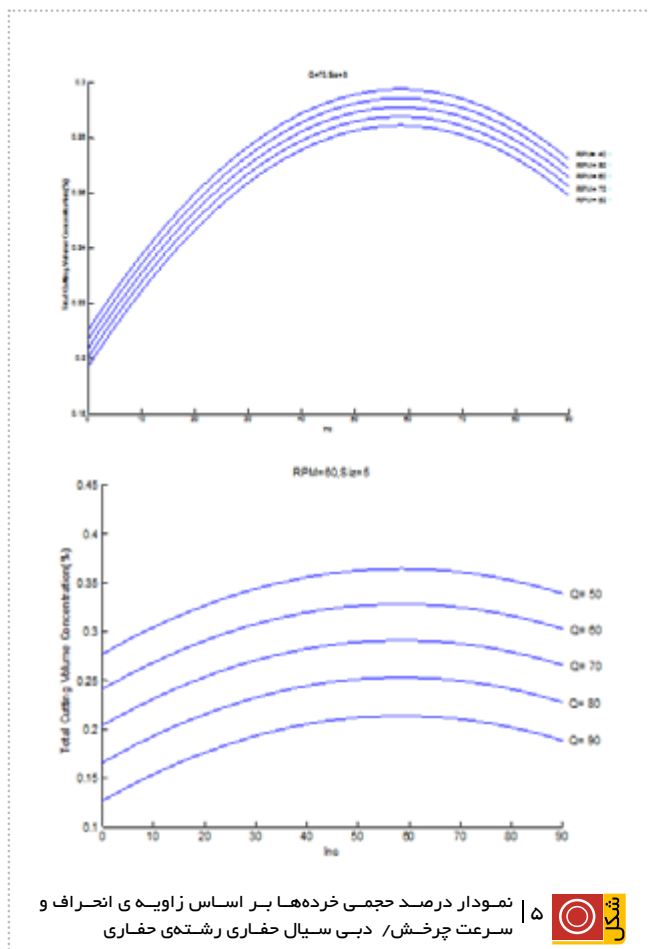


شکل ۶ | نمودار مقایسه‌ی سختی تمیزکاری چاه در زوایای مختلف [۱۳]

و تمیزکاری چاه برای کنده‌های بزرگ‌تر در مقایسه با کنده‌هایی با قطر کمتر، آسان‌تر است.

۴- چرخش رشته‌ی حفاری کمک‌شایانی به تمیزکاری چاه و انتقال خرده‌های حفاری به خارج از فضای حلقوی می‌کند و با افزایش آن غلظت خرده‌های حفاری در فضای حلقوی کاهش می‌یابند.

۵- زاویه‌ی انحراف رشته‌ی حفاری تأثیر مهمی بر انباشت خرده‌ها در فضای حلقوی و تشکیل لایه‌ی ایستا دارد. براساس شبیه‌سازی‌های انجام شده و نمودارهای مربوطه، بازه‌ی زاویه‌ی بین ۴۵ تا ۶۰ درجه به‌عنوان زوایای بحرانی مطرح می‌باشد که تمیزکاری چاه در این بازه دشوارتر از بقیه‌ی زوایاست. هنگام حفاری در این بازه باید حداکثر دقت جهت جلوگیری از تشکیل لایه‌ی ایستا به کار رود. ■



شکل ۵ | نمودار درصد حجمی خرده‌ها بر اساس زاویه‌ی انحراف و سرعت چرخش / دبی سیال حفاری رشته‌ی حفاری

پانویس‌ها

1. computational fluid dynamics (CFD)
2. Cutting transport behavior
3. Design of Experiment (DOE)

منابع

- [1] Zeidler H.U., SPE 3064, SPEAIME 45th Annual Fall Meeting, Houston, Texas, October, 1970.
- [2] Peden, J.M., Ford, J.T., Oyeneyin M.B., the European Petroleum Conference, 1990, p. 394-405.
- [3] Okranjini S.S. and Azar J.J., SPE 14178, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, USA, Las Vegas, September, 22-25, 1985.
- [4] Brown, N.P., Bern P.A., Weaver A., SPE/IADC Drilling Conference, 1989, pp. 171-180.
- [5] Sifferman, T.R., Becker, T.R., SPE Drilling Engineering, vol. 7, p. 115-120, 1992.
- [6] Sanchez R.A., Azar J.J., Bassal A.A., Martins A.L., SPE Journal, 4, 101, (1999).
- [7] Bassal, A.A., M.S. Thesis, University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, USA, 1995.
- [8] Martins, A.L., Sa, C.H.M., Lourenco A.M.F., Campos W., International Petroleum Conference and Exhibition, 1996, p. 295-304.
- [9] Bilgesu, H.I., Ali, M.W., Aminian, K., Ameri, S., SPE Eastern Regional Meeting, 2002, p. 1-4.
- [10] Mishra, N., M.S. thesis, West Virginia University, West Virginia, USA, 2007.
- [11] Li, M., Wang, Z.M., Hao, B.Y., Wang, Z.Q., Hong, Y.K., Chn. Petrol. Machan., 37, 34, (2009).
- [12] Fluent 6.2 Documentation (<http://Fluent.inc/fluent6.2.1.16/help/index.html>).
- [13] Swaco, M. I., "Engineering Drilling Fluid Manual," Rev. No. A-0, 03.31.98, Ch. 20B, Hole Cleaning, p. 618-629.