

بررسی اثر مشخصات کنده‌های حفاری بر مقدار هرزروی گل حفاری

حامد نامدار*، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۵/۲۰

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۷/۱۳

چکیده

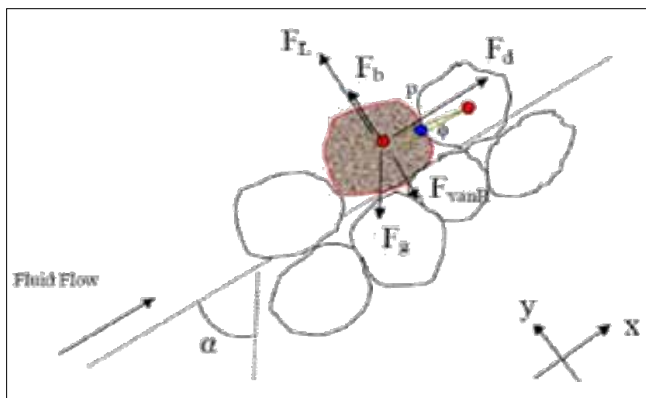
هرزروی و ورود گل حفاری به‌داخل سازند یکی از مشکلات مرسوم در چاه‌های نفت و گاز است که با توجه به اهمیت آن سالانه میلیون‌ها دلار جهت مقابله با آن هزینه می‌شود. مهم‌ترین بخش در حل معضل هرزروی گل تشخیص درست هرزروی و عوامل مؤثر بر آن باشد. یکی از متغیرهایی که تأثیر آن بر هرزروی به‌ندرت در مطالعات بررسی شده، مشخصات کنده‌های حفاری است. با توجه به نیروهای اعمالی بر کنده‌ها می‌توان گفت که نحوه‌ی انتقال کنده‌های حفاری و اثر آنها بر مقدار هرزروی تا حد زیادی به مشخصات کنده‌های حفاری بستگی دارد. بنابراین نمونه‌گیری صحیح کنده‌های حفاری و تفسیر درست مشخصات و اطلاعات آنها می‌تواند در جلوگیری از مشکلات هرزروی کمک شایانی باشد. در این راستا در مقاله‌ی حاضر اهمیت اثر مشخصات کنده‌های حفاری شامل مقدار، قطر، چگالی و همچنین شکل آنها بر هرزروی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار کنده‌های حفاری احتمال گرفتگی شکاف افزایش یافته و هرزروی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش چگالی و قطر کنده‌ها موجب افزایش وزن کنده‌ها و کاهش انتقال آنها به سمت بالا شده و احتمال گرفتگی شکاف‌ها کاهش می‌یابد. افزایش کرویت کنده‌ها موجب کاهش درگ آنها و در نتیجه افزایش انتقال آنها می‌شود که این به نوبه‌ی خود موجب افزایش احتمال گرفتگی شکاف و کاهش هرزروی می‌گردد.

واژگان کلیدی:

هرزروی سیال، کنده‌های حفاری، گل حفاری، دینامیک سیالات محاسباتی

مقدمه

ناحیه‌ی اول می‌تواند به‌طور طبیعی در مناطق مختلف حفاری دیده شود اما ناحیه‌ی چهارم در اثر افزایش و تجاوز نیروهای وارد از گل به سازند و در خلال عملیات حفاری به وجود می‌آید [۴]. مهم‌ترین بخش جهت حل معضل هرزروی گل، تشخیص درست هرزروی و عوامل مؤثر بر آنست. مشخصات کنده‌های حفاری یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر آنست که در مطالعات به‌ندرت اثر آن بررسی شده است. همان‌طور که در شکل ۱- نشان داده شده، هنگامی که کنده‌ها توسط مته از سازند کنده شده و از فضای حلقوی به سمت بالا حرکت می‌کنند متحمل بارهای مختلفی می‌شوند که مکانیزم انتقال و رسوب یا تعلیق کنده‌های حفاری توسط این نیروها تعیین می‌گردد. این نیروها عبارتند از [۵]:



۱ | نیروهای وارد بر یک ذره‌ی کنده‌ی حفاری [۵]

یکی از مشکلات مرسوم در چاه‌های نفت و گاز هرزروی گل حفاری است. به‌طور کلی هرزروی گل زمانی رخ می‌دهد که تراوایی سازند به اندازه‌ی کافی زیاد باشد یا حفره‌ها و شکستگی‌های سازند چنان بزرگ باشند که توسط مواد جامد موجود در گل مسدود نشوند [۱]. یکی از نتایج هرزروی، پایین رفتن سطح گل حفاری در فضای حلقوی چاه است که منجر به کاهش فشار هیدرواستاتیک نسبت به فشار سازند (فشار منفذی^۱) شده و می‌تواند منجر به فوران گردد. علاوه بر این هرزروی گل حفاری به داخل سازند، هزینه‌های گل را به شدت افزایش خواهد داد. همچنین هر قدر برگشت گل حفاری با کنده‌های حفاری به سطح کاهش یابد اطلاعات سازندی که حفاری می‌شود ناقص‌تر خواهد بود. از سوی دیگر در هرزروی احتمال گیر افتادن لوله‌ها به دلیل اختلاف فشار بین ستون گل و سازند زیاد است و ممکن است منجر به عملیات بسیار پرهزینه‌ی مانده‌یابی^۲ شود. هرزروی در لایه‌های تولیدی، بهره‌دهی را به شدت کاهش می‌دهد [۲]. مقدار هرزروی گل بر حسب سرعت تزریق آن به سازند و نوع شکاف‌های آن مقادیر متفاوتی دارد که بر اساس آن نوع هرزروی تعریف می‌شود؛ به‌طوری که معمولاً هرزروی ۱۰-۱۰۰ بشکه در ساعت را هرزروی تراوشی^۳، هرزروی ۵۰-۱۰۰ بشکه در ساعت را هرزروی جزئی^۴ و هرزروی بیش از ۵۰۰ بشکه در ساعت را هرزروی کلی^۵ می‌نامند [۳]. مناطق هرزرو شامل بخش‌های زیر هستند: سازندهای نفوذپذیر و نامتراکم^۶، سازندهای حفره‌ای و غاری^۷، سازندهایی با شکاف‌های طبیعی^۸ و سازندهایی با شکاف‌های القایی^۹. سه

* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (h_namdar@sut.ac.ir)

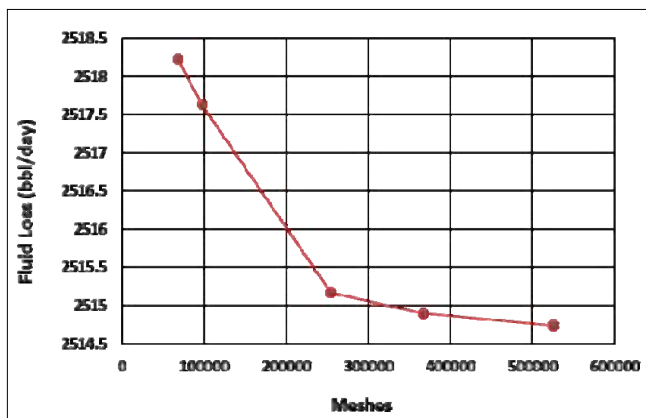
انجام می‌شود اما هیچ‌یک از کارشناسان به مشخصات کنده‌ها توجه نمی‌کند. بنابراین در مقاله‌ی حاضر اهمیت اثر مشخصات کنده‌های حفاری (شامل مقدار، قطر، چگالی و همچنین شکل آنها) بر مقدار هرزروی بررسی شده است. در راستای نیل به این هدف می‌توان از مطالعات آزمایشگاهی و شبیه‌سازی بهره جست. اما با توجه به زیادی هزینه‌های تجهیزات آزمایشگاهی و محدودیت استفاده از انواع دستگاه‌های اندازه‌گیری، امروزه تمایل به استفاده از روش‌های عددی و شبیه‌سازی کامپیوتری بیش از پیش شده است. و یکی از ابزارها جهت این کار روش عددی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است. به‌همین منظور در نوشتار حاضر یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای موجود به‌نام ANSYS CFX که برای انجام محاسبات از این روش استفاده می‌کند به‌کار رفته است.

۱- روش انجام کار

جهت انجام مطالعات، مشخصات واقعی یکی از چاه‌های شرکت ملی حفاری ایران که به‌دلیل وجود شکاف در دیواره‌ی چاه دچار هرزروی شده به‌کار رفته است. جدول ۱- خصوصیات هندسی چاه مورد نظر و جریان آنرا نشان می‌دهد. در ادامه به‌کمک این اطلاعات، شبیه‌سازی عددی این چاه انجام شده و پس از اعتبارسنجی مدل با مقدار واقعی هرزروی در چاه، سناریوهای مختلف اثر مشخصات کنده‌های حفاری بر هرزروی بررسی شده است.

۲- شبیه‌سازی عددی

بر اساس مشخصات هندسی و فیزیکی (اعم از شرایط مرزی و نیز اجزای تشکیل‌دهنده‌ی گل حفاری) نمونه‌ی عملی، در این بخش و در ادامه چگونگی انجام شبیه‌سازی توسط بسته‌ی نرم‌افزاری ANSYS مشتمل بر ANSYS WorkBench، ANSYS ICEM و در نهایت ANSYS CFX بررسی می‌شود. به‌همراه نرم‌افزار مدل‌سازی هندسی SOLIDWORKS



۳ | آنالیز حساسیت وابستگی نتایج به تعداد مش‌ها

نیروی گراوایته (F_g) و نیروی شناوری (F_p) که نیروهای استاتیکی هستند و به‌دلیل خواص ذرات و سیال اطراف آن وارد می‌شوند و ربطی به جریان سیال ندارند.

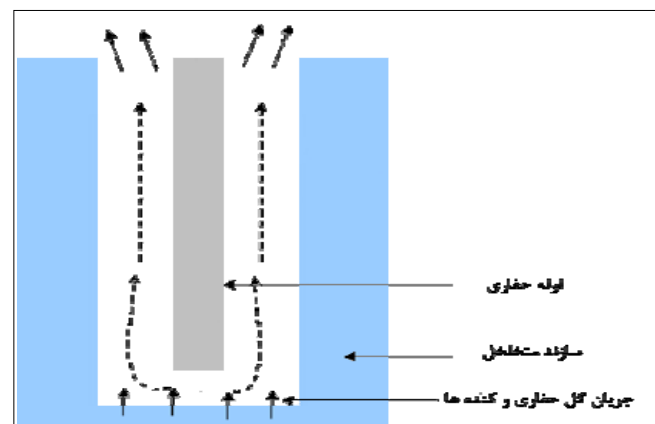
نیروی کشش E_D و نیروی بالا برنده E_T که نیروهای هیدرودینامیکی هستند و توسط جریان سیال وارد می‌شوند.

نیروی پراکندگی واندروالس F_{van} که نیروهای کلژییدی هستند و بین هر کدام از ذرات همسایه وجود دارند.

با توجه به نیروهای اعمالی بر کنده‌ها می‌توان پیش‌بینی کرد که نحوه‌ی انتقال کنده‌های حفاری و اثر آنها بر مقدار هرزروی تا حد زیادی به مشخصات آنها حفاری بستگی دارد. بنابراین نمونه‌گیری صحیح کنده‌های حفاری و تفسیر درست مشخصات و اطلاعات مربوط به آنها می‌تواند در پیشگیری از مشکلات هرزروی و بهبود عملیات حفاری کمک شایانی باشد. به‌طور کلی در حال حاضر نمونه‌گیری از کنده‌ها توسط زمین‌شناسان، گل‌شناسان و کارشناسان محیط زیست

۱ | خصوصیات هندسی و شرایط جریان چاه حفاری مورد بحث

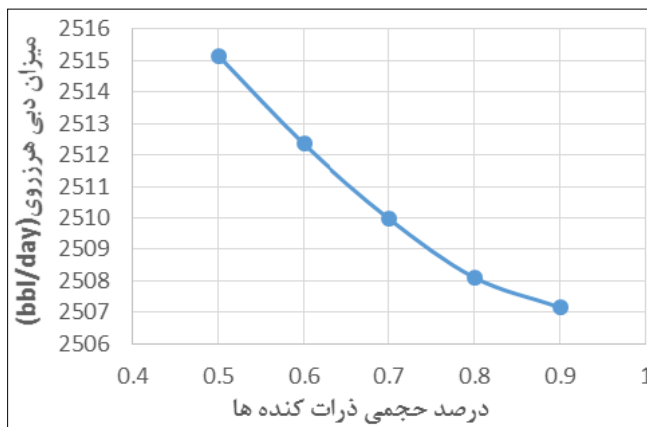
متغیرها	مقدار
قطر لوله‌ی حفاری	127 mm
قطر چاه	311.15 mm
قطر کنده‌های حفاری	0.1 inch
طول مدل در نظر گرفته شده	1000 mm
مقدار بازشدگی شکاف	0.65 mm
نرخ گل حفاری	430 GPM
مقدار هرزروی گل حفاری	2500 bbl/day
فشار ته چاه	4310 psi
فشار سازند در ناحیه‌ی هرزروی	3087 psi
فشار خروجی	4000 psi
کسر حجمی ذرات کنده‌ها	0.5
سرعت چرخش لوله	180 rpm



۲ | ساده‌سازی ریاضیاتی- مکانیکی فرآیند انتقال کنده‌های حفاری

در ابتدا جهت پیاده‌سازی توپولوژی این پدیده‌ی فیزیکی در نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی باید ساده‌سازی ریاضیاتی-مکانیکی روی این فرآیند انجام شود. بدین منظور مته‌ی حفاری حذف شده و در نهایت تمرکز تنها روی فضای حلقوی چاه حفاری به‌همراه جریان سیالات گل حفاری و ذرات کنده‌هایی که به‌صورت مخلوط از پایین وارد آن شده قرار خواهد گرفت (شکل-۲). همچنین فرض می‌گردد که به‌دلیل تشکیل یک گل روی دیواره‌ی چاه، سیالی از آن عبور نمی‌کند و تنها خروجی جریان، شکاف روی دیواره‌ی چاه و دهانه‌ی خروجی خود چاه است. در این تحقیق مدل‌سازی هندسی توسط نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی Solidworks انجام شده است. پس از مدل‌سازی هندسی جهت ورود به مراحل حل عددی در نرم‌افزار ANSYS باید هندسه‌ی حاصل از نرم‌افزار Solidworks وارد بخش طراحی هندسه‌ی نرم‌افزار ANSYS WorkBench (ماژول DesignModeler) شود. سپس در صورت عدم وجود مشکل، به مرحله‌ی مش‌زنی می‌رسیم. جهت مش‌بندی ناحیه‌ی دامنه‌ی حل عددی نیز از نرم‌افزار Meshing موجود در ماژول ANSYS Workbench استفاده شد. روال کلی مش‌بندی در این نرم‌افزار بدین صورت است که ابتدا سطوح مختلف دامنه‌ی حل عددی، به‌عنوان شرط مرزی موردنظر تعریف می‌گردد. بر این اساس برای ناحیه‌ی حل عددی این تحقیق، شرط مرزی‌های Well Outlet، Screw Wallside، Cutting Inlet، Well Outside Wall و Fracture تعریف و درنظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی از مش‌بندی غیرسازمان یافته و نامنظم

در ادامه جهت تعریف مسأله، حل آن و مشاهده‌ی نتایج از ماژول ANSYS CFX استفاده می‌شود. طراحی نرم‌افزار ANSYS CFX به‌صورتی است که سه بخش اصلی و اساسی دارد: CFX-Pre، CFX-Solver و CFX-Post. هر یک از این بخش‌ها جهت انجام یکی از مراحل اصلی شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. بخش CFX-Pre برای تعریف اولیه‌ی مسأله، بخش CFX-Solver برای انجام حل عددی روی تنظیماتی که در بخش CFX-Pre تعریف شده خواهد بود. در نهایت بخش CFX-Post نیز برای نمایش نتایج حاصل از شبیه‌سازی تعبیه شده است. مشخصات تعریف مسأله در این ماژول بدین صورت است. باتوجه به دقت زیاد مدل هرشل-بالکلی و ساده بودن آن نسبت به مدل‌های دیگر، از این مدل جهت مدل‌سازی ریاضیاتی-عددی حالت فیزیکی سیال غیرنیوتنی گل حفاری استفاده شد که به‌صورت کلی معادله‌ی ۱- است که در آن μ گرانیوی ظاهری^{۱۴}، K مقدار سازگاری گرانیوی^{۱۵}، γ نرخ تنش برشی^{۱۶}، λ ثابت نرمالیزه کردن، n ضریب توانی^{۱۷} و در نهایت t_0 تنش تسلیم است.

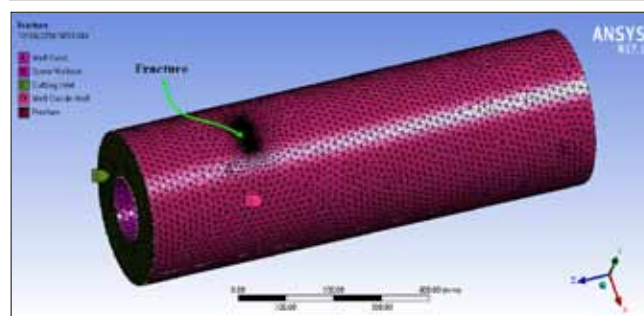


شکل ۵ | نرخ هرزروی در مقابل درصد حجمی ذرات کنده‌ها

در ابتدا جهت پیاده‌سازی توپولوژی این پدیده‌ی فیزیکی در نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی باید ساده‌سازی ریاضیاتی-مکانیکی روی این فرآیند انجام شود. بدین منظور مته‌ی حفاری حذف شده و در نهایت تمرکز تنها روی فضای حلقوی چاه حفاری به‌همراه جریان سیالات گل حفاری و ذرات کنده‌هایی که به‌صورت مخلوط از پایین وارد آن شده قرار خواهد گرفت (شکل-۲). همچنین فرض می‌گردد که به‌دلیل تشکیل یک گل روی دیواره‌ی چاه، سیالی از آن عبور نمی‌کند و تنها خروجی جریان، شکاف روی دیواره‌ی چاه و دهانه‌ی خروجی خود چاه است. در این تحقیق مدل‌سازی هندسی توسط نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی Solidworks انجام شده است. پس از مدل‌سازی هندسی جهت ورود به مراحل حل عددی در نرم‌افزار ANSYS باید هندسه‌ی حاصل از نرم‌افزار Solidworks وارد بخش طراحی هندسه‌ی نرم‌افزار ANSYS WorkBench (ماژول DesignModeler) شود. سپس در صورت عدم وجود مشکل، به مرحله‌ی مش‌زنی می‌رسیم. جهت مش‌بندی ناحیه‌ی دامنه‌ی حل عددی نیز از نرم‌افزار Meshing موجود در ماژول ANSYS Workbench استفاده شد. روال کلی مش‌بندی در این نرم‌افزار بدین صورت است که ابتدا سطوح مختلف دامنه‌ی حل عددی، به‌عنوان شرط مرزی موردنظر تعریف می‌گردد. بر این اساس برای ناحیه‌ی حل عددی این تحقیق، شرط مرزی‌های Well Outlet، Screw Wallside، Cutting Inlet، Well Outside Wall و Fracture تعریف و درنظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی از مش‌بندی غیرسازمان یافته و نامنظم

۲ | خصوصیات هندسی و شرایط جریان چاه حفاری مورد بحث

مقدار	متغیر
69 lb/ft ³	چگالی
57.22 C	دمای سیال درون چاه
32 cp	گرانروی گل حفاری
0.428244 m/s	سرعت گل حفاری در مقطع ورودی فضای حلقوی
8.6 Pa	تنش تسلیم
0.848	ضریب توانی
0.2176 Pa.sec	سازگاری گرانروی



شکل ۴ | مش‌بندی غیرسازمان یافته و نامنظم ناحیه‌ی حل عددی چاه حفاری

$$(1)$$

$$\mu = K(\lambda\gamma)^{n-1} + t_0(\lambda\gamma)^{-1}$$

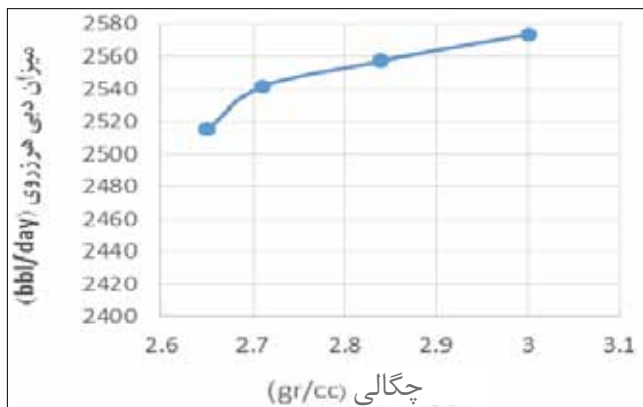
جزئیات اطلاعات مربوط به گل حفاری مورد استفاده بر اساس مدل هرشل-بالکلی در جدول ۲ ارائه شده است.

همچنین جهت مدل‌سازی آشفستگی و اغتشاش جریان از مدل دومعادله‌ای استفاده شده است. قدرت، اقتصادی بودن و دقت قابل قبول برای طیف وسیعی از جریانات آشفته، این مدل را به مدلی رایج در مدل‌سازی‌های صنعتی تبدیل کرده است. در میان مدل‌های دومعادله‌ای، مدل $K-\omega$ به دلیل فهم آسان و استفاده‌ی ساده در برنامه‌نویسی، معروف‌ترین مدل دومعادله‌ای است و در مطالعه‌ی حاضر هم این مدل به کار رفته است. نوع تحلیل به صورت پایدار^{۱۸} در نظر گرفته شده است. با اتمام فرآیند تعریف مسأله،

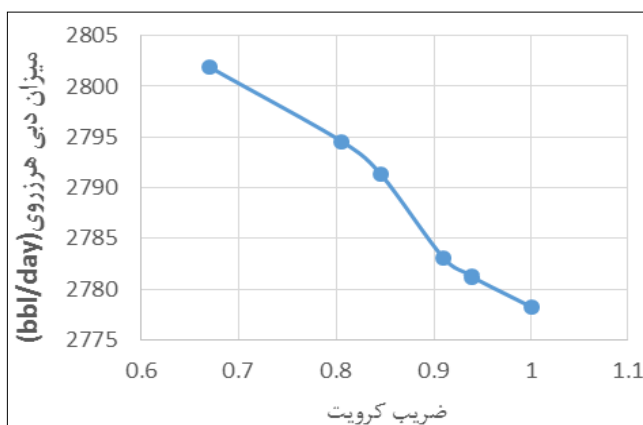
می‌توان حل عددی را انجام داد. جهت تأیید^{۱۹} مدل‌سازی، مقدار شبیه‌سازی شده با مقدار اندازه‌گیری‌های عملی انجام شده روی چاه حفاری نمونه مقایسه می‌گردد. تنها داده‌ی موجود هرزروی چاه مورد نظر ۲۵۰۰ bbl/day در سرعت چرخش لوله‌ی حفاری، ۱۸۰ دور بر دقیقه است. نرخ هرزروی حاصل از شبیه‌سازی در این مقطع $0.277685 \text{ m}^3/\text{min}$ است که پس از تبدیل واحد ۲۵۱۵ bbl/day خواهد بود. این مقدار در مقایسه با مقدار واقعی ۰/۶ درصد خطا دارد که نشان‌دهنده‌ی انطباق بسیار خوب نتایج با مقادیر عملی اندازه‌گیری شده است. در ادامه مدل صحت‌گذاری شده برای پیش‌بینی رفتار جریان سیالات در درون دامنه‌ی حل عددی چاه حفاری استفاده می‌شود و اثر مشخصات کنده‌های حفاری (شامل مقدار، قطر، چگالی و شکل آنها) بر مقدار هرزروی بررسی می‌گردد.

۳- نتایج

پس از انجام تحلیل‌های مربوطه بر اساس سناریوهای مختلف، نتایج موردنظر استخراج گردید که در ادامه نتایج هر یک از حالت‌ها به صورت جداگانه بررسی و آنالیز خواهد شد.



شکل ۷ | نرخ هرزروی در مقابل چگالی کنده‌ها



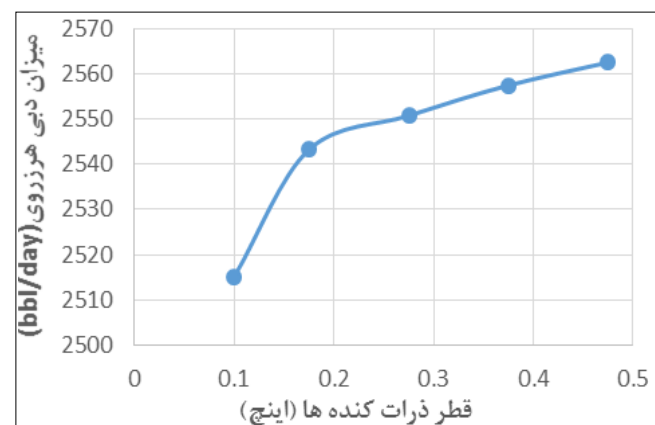
شکل ۸ | نرخ هرزروی در مقابل ضریب کروییت

جدول ۳ | نتایج شبیه‌سازی عددی حالت‌های مختلف جهت بررسی اثر درصد کنده‌های حفاری

سرعت خروجی گل حفاری و کنده‌ها (ft/sec)	کسر حجمی ذرات کنده‌ها
1.179715	0.5
1.1801	0.6
1.18046	0.7
1.18062	0.8
1.18094	0.9

جدول ۴ | نتایج شبیه‌سازی عددی حالت‌های مختلف جهت بررسی اثر قطر کنده‌ها

سرعت خروجی گل حفاری و کنده‌ها (ft/sec)	قطر کنده‌ها (Inch)
1.179715	0.1
1.177667	0.175
1.168832	0.275
1.163999	0.375
1.160066	0.475



شکل ۶ | نرخ هرزروی در مقابل قطر کنده‌ها

۳-۱- بررسی درصد کنده‌های حفاری

جهت مدل‌سازی درگ و مومنتوم ذرات با خودشان و همچنین با دیواره، باید در نرم‌افزار ANSYS-CFX دیدگاه لاگرانژی به کار رود. بنابراین جهت شبیه‌سازی اثر قطر کنده‌ها، در این بخش از مدل لاگرانژی استفاده شد تا بتوان به نتایج دقیق‌تری دست یافت. اگرچه شبیه‌سازی این اثر توسط روش اویلری نیز امکان‌پذیر است اما به دلیل پیوسته در نظر گرفتن ذرات، این روش برخورد ذرات با یکدیگر و دیواره را لحاظ نخواهد کرد. مقادیر قطر کنده‌های شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل از آن در جدول ۴- ارائه شده است.

بر اساس نتایج جدول ۴- می‌توان دید که با افزایش قطر کنده‌ها انتقال آنها (سرعت خروجی گل حفاری) کاهش می‌یابد و متعاقب آن شکل ۶- دیده می‌شود نرخ هرزروی افزایش می‌یابد. افزایش وزن کلی کنده‌ها (به دلیل افزایش حجم ذرات و ثابت ماندن چگالی آنها) و درگ باعث خواهد شد تعداد انتقال‌ها و جابجایی ذرات کاهش یافته و کنده‌های کمتری به سمت بالا منتقل شوند. با کاهش انتقال کنده‌ها به سمت بالا احتمال گرفتگی شکاف توسط کنده‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش قطر کنده‌ها، هرزروی افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان گفت با افزایش قطر کنده‌ها، به دلیل لزجت زیاد گل حفاری و همچنین افزایش وزن کنده‌ها، فشار در امتداد چاه حفاری و درون فضای حلقوی افزایش بیشتری خواهد یافت. در نتیجه با ایجاد اختلاف بیشتر بین فشار فضای حلقوی با فشار مقطع هرزروی، نرخ هرزروی افزایش می‌یابد.

افزایش نرخ نفوذ (ROP) موجب افزایش درصد کنده‌های حفاری در دهانه‌ی چاه می‌شود. بنابراین می‌توان اثر افزایش درصد کنده‌های تولیدی و ROP را به‌نوعی معادل یکدیگر دانست. از آنجا که یکی از مزیت‌های اصلی روش‌های شبیه‌سازی عددی اویلری، بررسی توزیع حجمی ذرات به‌هم پیوسته‌ی فازهای مختلف جریان است در این بخش به‌ازای درصد‌های حجمی کنده‌ها در مقطع ورودی، اثر کلی این حالت بر نرخ هرزروی و سرعت انتقال کنده‌ها بررسی می‌شود. در این راستا مقادیر مختلف این درصد‌ها طبق جدول ۳- شبیه‌سازی شده و نتایج آن در نمودار شکل ۵- ارائه گردیده است. مطالعات نشان می‌دهد که با افزایش نرخ نفوذ و درصد کنده‌های حفاری، انتقال کنده‌ها به‌سمت بالا کاهش می‌یابد [۶] و انتظار می‌رود هرزروی افزایش یابد. اما نتایج جدول ۳- عکس این قضیه را نشان می‌دهد و با توجه به شکل ۵- هرزروی کمی کاهش یافته است. با توجه به مطالب گذشته نمی‌توان گفت گرفتگی دهانه‌ی شکاف و کاهش هرزروی به‌دلیل افزایش انتقال کنده‌ها به‌سمت بالا بوده و تنها وجود کنده‌های حفاری بیشتر در فضای حلقوی است که احتمال گرفتگی شکاف را تا حد کمی افزایش داده است. بنابراین با وجود کاهش انتقال کنده‌ها به‌سمت بالا، به‌دلیل افزایش احتمال گرفتگی دهانه‌ی شکاف در اثر وجود کنده‌های بیشتر در فضای حلقوی، هرزروی کمی کاهش یافته و در نتیجه سرعت خروجی گل افزایش می‌یابد.

۳-۲- بررسی اثر قطر کنده‌ها

بررسی اثر قطر کنده‌ها در دیدگاه اویلری و توسط روش‌های عددی محدودیت‌هایی مواجه‌ست. بنابراین جهت بررسی این اثر معمولاً از روش‌های عددی ترکیبی لاگرانژی-اویلری استفاده می‌شود. در این راستا

۵ | نتایج شبیه‌سازی عددی حالت‌های مختلف جهت بررسی اثر چگالی‌کنده‌ها

چگالی کنده‌ها (gr/cc)	سرعت خروجی گل حفاری و کنده‌ها (ft/sec)
2.65	1.179715
2.71	1.16136
2.84	1.15456
3	1.14812

۳-۳- اثر چگالی کنده‌ها
این اثر نیز بر اساس روش لاگرانژی بررسی شده است. پیش‌بینی می‌شود این اثر مشابه تأثیر افزایش قطر کنده‌ها باشد. با این تفاوت که در این حالت به‌دلیل ثابت ماندن قطر کنده‌ها، درگ هندسی تغییر نکرده و ثابت خواهد ماند. بر این اساس قبل از انجام شبیه‌سازی‌ها (جدول ۵-) پیش‌بینی می‌شود اثرات تغییر این متغیر، مشابه اثر تغییر قطر کنده‌ها (به‌ازای ثابت ماندن چگالی) خواهد بود.

طبق جدول ۵- اثر تغییر چگالی کنده‌ها بر انتقال کنده‌ها، مشابه اثر افزایش قطر کنده‌هاست و با افزایش چگالی کنده‌ها به‌دلیل افزایش وزن آنها، نیروی گراویتی وارد بر آنها نیز افزایش یافته و انتقال کنده‌ها

۶ | نتایج شبیه‌سازی عددی حالت‌های مختلف جهت بررسی اثر چگالی‌کنده‌ها

شکل کنده‌ها						
ضریب کرویت	0.671	0.806	0.846	0.91	0.939	1
سرعت خروجی گل حفاری و کنده‌ها (ft/sec)	1.17126	1.17889	1.17936	1.17974	1.17994	1.18048

حفاری به سمت بالا، به دلیل افزایش حضور کندهای حفاری در فضای حلقوی چاه، احتمال گرفتگی دهانه‌ی شکاف کمی افزایش می‌یابد و به همین دلیل هرزروی کمی کاهش می‌یابد. متعاقب آن نیز به دلیل کاهش هرزروی، سرعت خروج سیال از دهانه‌ی چاه، کمی افزایش می‌یابد.

■ با افزایش قطر کندها، انتقال آنها (سرعت خروج گل حفاری) کاهش و نرخ هرزروی افزایش می‌یابد. افزایش وزن کلی کندها (به دلیل افزایش حجم کندها و ثابت ماندن چگالی آنها) و درگ باعث خواهد شد انتقال و جابجایی ذرات کاهش یافته و کندهای کمتری به سمت بالا منتقل شوند. با کاهش انتقال کندها به سمت بالا احتمال گرفتگی شکاف توسط کندهای حفاری کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش قطر کندها، هرزروی افزایش می‌یابد.

■ اثر تغییر چگالی کندها بر انتقال آنها مشابه اثر افزایش قطر کندهاست. به طوری که با افزایش چگالی کندها، وزن و اینرسی آنها افزایش یافته و انتقال کندها به سمت بالا کاهش می‌یابد. بنابراین احتمال گرفتگی شکاف توسط کندهای حفاری نیز کاهش یافته و هرزروی افزایش می‌یابد.

■ افزایش ضریب کرویت کندها موجب افزایش انتقال آنها شده است. با افزایش ضریب کرویت، گردشگری ذرات بیشتر شده، در نتیجه درگ کاهش می‌یابد و ذرات راحت‌تر روی هم لغزیده و به سمت بالا منتقل می‌شوند. با افزایش انتقال کندها به سمت بالا، احتمال گرفتگی شکاف توسط کندهای حفاری افزایش و هرزروی کاهش می‌یابد. ■

به سمت بالا کاهش می‌یابد. بنابراین احتمال گرفتگی شکاف توسط کندها کاهش یافته و هرزروی افزایش می‌یابد (شکل-۷).

۳-۴- اثر شکل کندها

یکی از شاخص‌های تعیین شکل کنده، ضریب کرویت (Ψ) (مقدار شباهت کنده به کره) است. هر چه شکل کنده از کره دورتر باشد ضریب کرویت کمتر است. ضریب کرویت، نسبت مساحت کره‌ی هم‌حجم کنده (S_p) به مساحت واقعی کنده (S_c) است و از رابطه‌ی ۲- محاسبه می‌شود.

$$\Psi = \frac{S_p}{S_c} \quad (2)$$

با توجه به مطالب گفته شده جهت بررسی اثر شکل کندها بر هرزروی، طبق جدول-۶ چندین شکل با ضریب کرویت متفاوت در نظر گرفته و نتایج مربوطه بررسی شد.

طبق نتایج جدول-۶ افزایش ضریب کرویت کندها موجب افزایش انتقال کندها شده که در مطالعات دیگر هم نتایج مشابهی گرفته شده است [۷]. با افزایش ضریب کرویت، گردشگری ذرات بیشتر شده، درگ کاهش می‌یابد و ذرات راحت‌تر روی هم لغزیده و به سمت بالا منتقل می‌شوند. از طرفی طبق شکل-۸ با افزایش انتقال کندها به سمت بالا احتمال گرفتگی شکاف توسط کندهای حفاری افزایش یافته و هرزروی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

■ با افزایش درصد حجمی کندها، با وجود کاهش انتقال کندهای

پانویس‌ها

- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Pore Pressure | 11. Lift |
| 2. Fisshing | 12. Van der Waals Dispersion |
| 3. Seepage loss | 13. Tetrahedron |
| 4. Partial loss | 14. Apparent Viscosity |
| 5. Complete loss | 15. Viscosity Consistency |
| 6. Very Permeable Unconsolidated Formation | 16. Shear Stress Rate |
| 7. Vugular and Cavernous Formation | 17. Power Law Index |
| 8. Faulted. Jointed. and Fissured (natural) Formation | 18. Steady State |
| 9. Induced Faulted. Jointed , and Fissured Formation | 19. Validation |
| 10. Drag | 20. Rate of Penetration |

منابع

- [1] Baroid Fluids Handbook", Baroid Drilling Fluids, Inc., Houston, 1998.
- [2] Whitfill, D.: "Lost Circulation Material Selection, Particle Size Distribution and Fracture Modeling with Fracture Simulation Software", 115039-MS SPE Conference Paper, 2008
- [3] "Lost Circulation Guide", Drilling Specialties Company a division of Chevron Philips Chemical Company LP, Stephens, 2014
- [4] Galate, J.W. and Mitchell, R.F.: "Behavior of Oil Muds during Drilling Operation", SPE Drilling Engineering, 1(2), 97,106-1986.
- [5] Duan M., Miska S., Yu M., Takach N, and Ahmed R.: "Critical & Conditions for Effective Sand-Sized Solids Transport in Horizontal and High-Angle Wells", SPE 106707-PA, 2009.
- [6] Dykes, Jr., "Cuttings transport implications for drill string design: a study with computational fluid dynamics", MSc. Thesis, West Virginia University, 2007.
- [7] Ref: Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi: "CFD-DEM Model for Simulation of Non-spherical Particles in Hole Cleaning Process". Particulate Science and Technology, 33(5), 4722015, 481-