

## تأثیر تمیز کاری چاه بر نرخ نفوذ حفاری با استفاده از نرم افزار شبیه ساز حفاری

مر نرضی چراغعلی زاده\*، رسول خسروانیان، رضا علیزاده ممقانی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر • سینا صائغ، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران |

### چکیده

تجمع کنده‌ها در چاه در حال حفاری و عدم تمیز کاری مؤثر کنده‌های حفاری باعث چسبیدن رشته حفاری، گیر کردن آن و کاهش نرخ حفاری می‌شود. بنابراین پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری و تعیین حداکثر نرخ نفوذ در برنامه‌های حفاری، امری بسیار ضروری و حیاتی است. برای پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری و تعیین حداکثر نرخ نفوذ ایمن، یک چاه عمودی در جنوب غربی ایران به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد و پارامترهای مؤثر بر انتقال کنده‌های حفاری را تعیین و تأثیر هر یک از این پارامترها بر نرخ نفوذ بررسی گردید. بر اساس این مطالعه مدل هرشل-بالکلی خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌های رئولوژی در پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری در چاه مورد مطالعه داشت و برای آنالیز حساسیت از این مدل استفاده شد. همان‌طور که از تجزیه و تحلیل نمودارها به دست می‌آید، وزن گل بالاتر باعث بهبود عملکرد انتقال کنده‌ها می‌شود و نرخ نفوذ ایمن را افزایش می‌دهد. ویژگی کنده‌های حفاری یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که بر پدیده تمیز کاری چاه تأثیر می‌گذارد و به‌طور کلی، در چاه‌های عمودی، کنده‌های کوچک‌تر بسیار سریع‌تر از کنده‌های با اندازه بزرگ‌تر جابجا می‌شوند و با نرخ نفوذ بالاتر می‌توان حفاری کرد. بر این اساس فاز طراحی و تهیه برنامه حفاری چاه، انجام شبیه‌سازی به‌منظور پیش‌بینی سرعت انتقال کنده‌های حفاری و تعیین حداکثر نرخ نفوذ بر مبنای محدودیت‌های حفاری امری بسیار حیاتی در برنامه هیدرولیک چاه است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۶/۰۴/۱۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۶/۰۴/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۶/۰۶/۱۲

### واژگان کلیدی:

تمیز کاری چاه، نرخ نفوذ حفاری، پارامترهای حفاری، مدل رئولوژی

### مقدمه

کنده‌های حفاری می‌شود، عملکرد انتقال کنده‌های حفاری با و بدون مواد افزودنی شیمیایی توسط منگجیا و همکاران در مقیاس آزمایشگاهی بررسی و نشان داد که بدون مواد افزودنی شیمیایی، انتقال کنده‌های حفاری نزدیک به صفر است و با استفاده از سورفاکتانت شیمیایی زنجیر راست، ۳۰ درصد از کنده‌های حفاری منتقل می‌شود و با استفاده از سورفاکتانت شیمیایی شاخه‌ای، ۵۸ درصد از کنده‌ها منتقل می‌شوند [۲]. هرلند و همکاران نیز در سال ۱۹۹۳ رفتار انتقال کنده‌های سنگ آهک در یک گل پایه نفتی معکوس و یک گل پایه آبی را بررسی کردند که نتایج محققان به شرح زیر است [۳]:

- ۱- به‌جز چاه‌های عمودی (و نزدیک به حالت عمودی)، افزایش نقطه واروی و گرانیروی پلاستیکی در حمل و نقل کنده‌های حفاری مؤثر است و این اثر در گل‌های امولسیون معکوس پایه روغنی، شدیدتر است.
- ۲- در حالت زوایای ۴۰ تا ۵۰ درجه، انتقال کنده‌های حفاری در گل پایه آبی بهتر از گل روغنی معکوس با رئولوژی مشابه است.

روش‌های تحقیقاتی و مطالعات گسترده آزمایشگاهی، مدل‌سازی و نظری (مدل مکانیکی) در مورد انتقال کنده‌های حفاری وجود دارد. برای حالت نزدیک به عمودی (انحراف کمتر از ۱۰ درجه از قائم)، انتقال کنده‌های حفاری و درصد کنده‌ها فقط کمی سخت‌تر از حالت عمودی است. برای حالت زاویه چاه از ۴۰ تا ۵۰ درجه، به دلیل تجمع و تمایل کنده‌های حفاری به ته‌نشینی در بستر، زاویه بحرانی است و تأثیر گرانیروی گل، بسیار قابل ملاحظه است.

علی پیروزیان و همکاران در سال ۲۰۱۲ تأثیر گرانیروی سیال حفاری، سرعت سیال حفاری و انحراف حفره در انتقال کنده‌های حفاری را بررسی و با استفاده از مقدار عملکرد انتقال کنده‌های حفاری<sup>۱</sup> مشخص کردند که [۱] برای سرعت جریان ثابت، افزایش گرانیروی سیال حفاری باعث ۸ درصد بهبود عملکرد انتقال کنده‌های حفاری شده است (در تمام زوایا، رژیم جریان آشفته است). افزایش بیشتر گرانیروی باعث تبدیل رژیم جریان (به گذرا و آرام) می‌شود. به دلیل اینکه نیروی گرانشی باعث ته‌نشینی شدن

\* نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (cheraghalizadeh@aut.ac.ir)

محققان، اثر پارامترهای مختلف بر تمیز کاری چاه همچون سرعت گل، وزن گل، رئولوژی گل، نوع گل، اندازه کنده‌های حفاری، نرخ نفوذ، سرعت چرخش رشته حفاری، خروج از مرکز رشته حفاری، قطر رشته حفاری و زاویه چاه را بررسی کردند و مشاهده شد که سرعت گل و وزن گل، بیشترین اثر را در تمیز کاری چاه دارد و تأثیر چرخش رشته حفاری در انتقال کنده‌ها، تحت شرایط خاصی (در زاویه زیاد و نزدیک به حالت افقی) قابل ملاحظه است [۴]. این مطالعه نشان داد:

۱- تحت رژیم آشفته، انتقال کنده‌های حفاری در هر سه منطقه تحت تأثیر خواص رئولوژیکی گل (گرانروی پلاستیکی و نقطه واروی) قرار نمی‌گیرد.

۲- اثر افزایش نقطه واروی بر تمیز کاری، در جریان آرام، در منطقه ۱ و نزدیک به منطقه ۳ بسیار قابل ملاحظه بوده و تأثیر آن بر تمیز کاری چاه در زاویه ۴۰ تا ۴۵ درجه بسیار ناچیز می‌شود.

۳- خروج از مرکز رشته حفاری تأثیر نسبتاً کمی در حالت انحراف کم (منطقه ۱ و ۲ و تحت هر رژیم جریان) داشته و در منطقه ۳ در جریان آشفته دارای تأثیری متوسط و در جریان آرام دارای تأثیر قابل توجه است.

سیرفرمن و همکاران در سال ۱۹۷۴ در مطالعه پارامترهای مؤثر بر انتقال کنده‌های حفاری در حالت عمودی به این نتیجه رسیدند که سرعت دوران رشته حفاری، درصد کنده‌های ورودی، اندازه فضای حلقوی و خروج از مرکز رشته حفاری، حداقل اثر را بر انتقال کنده‌های حفاری دارد. مطالعه تجربی در مقیاس بزرگ (با استفاده از چند لوله‌های حفاری با اندازه لوله جداری مختلف به طول ۲۰۰ فوت) جهت بررسی خواص رئولوژیکی سیال‌های مختلف، اندازه کنده‌ها و پارامترهای مختلف عملیات، نتایج زیر را در بر داشت [۵]:

۱- سرعت حلقوی ۵۰ فوت در دقیقه برای انتقال کافی کنده‌ها در گل معمولی بسیار مؤثر است.

۲- افزایش گرانروی سیال حفاری باعث افزایش بهره‌وری انتقال کنده‌ها می‌شود.

۳- قطر جداری و وزن سیال حفاری اثر متوسط بر انتقال

۳- در حالت انحراف بالای چاه، کاهش نقطه واروی و گرانروی پلاستیکی همراه با افزایش جریان، تمیز کاری بهتر چاه برای هر دو نوع گل را نشان می‌دهد.

اکراج و آذر به صورت تجربی اثر رئولوژی گل در تمیز کاری چاه را بررسی کردند. آنها سه منطقه برای انتقال کنده‌ها تعیین کردند که به ترتیب منطقه ۱ (۰ تا ۴۵ درجه)، منطقه ۲ (۴۵ تا ۵۵ درجه)، منطقه ۳ (۵۵ تا ۹۰ درجه) است. این

۱ | مشخصات حفره (جداری + حفره باز)

Section Type	TVD (m)	Length (m)	Shoe TVD (m)	ID (in)	Friction Factor	Item Description
Casing	3071	3071	4805	8/681	0/25	9 5/8 in, 47 ppf, L-80
Casing	3358	287	4805	8/681	0/25	9 5/8 in, 47 ppf, P-110
Casing	4511	1153	4805	6/184	0/25	7 in, 29 ppf, T-95
Casing	4550	39	4550	6/094	0/25	7 in, 32 ppf, T-95
Open Hole	4564	14		6	0/3	

۲ | مشخصات رشته حفاری

Section Type	TVD (m)	Length (m)	Shoe TVD (m)	ID (in)	Friction Factor	Item Description
Drill Pipe	2913	2913	5	4.276	22.26	Drill Pipe 5 in, 19.50 ppf, E
Drill Pipe	1394	4307	3.5	2.519	14.76	Drill Pipe, 3.500 in, 14.76 ppf, E
Drill Collar	27.2	4335	4.75	2	49.61	Drill Collar 4 3/4 in
Jar	3/048	4338	4/75	2	46/5	Mechanical Jar 4 3/4" in
Sub	3/1	4341	4/76	1.81	40/09	Cross Over, 4.760 in, 3 1/2 REG
Drill Collar	201/7	4542	4/75	2	49/61	Drill Collar 4 3/4 in, 2 in
Stabilizer	1/524	4544	3	2.04	15/87	Integral Blade Stabilizer 5 7/8"
Drill Collar	18/7	4563	4.75	2	49/61	Drill Collar 4 3/4 in, 2 in
Sub	0/7	4563	5	1.97	70/16	Bit Sub, 5.000 in, 4 1/2 REG
Bit	0/2	4564	6	35		

۳ | پارامترهای سیال

عمق (متر)	وزن گل (پوند بر فوت مکعب)	$\theta_{600}$	$\theta_{300}$	$\theta_{200}$	$\theta_{100}$	$\theta_6$	$\theta_3$
۴۵۶۴-۴۵۵۳	۷۳	۲۹	۱۹	۱۵	۱۰	۳	۲

کنده‌ها دارد. و طول حفره باز تا عمق ۴۵۶۴ متر است. مشخصات حفره در جدول-۱ و مشخصات رشته حفاری در جدول-۲ ارائه شده است و سیال حفاری پایه آبی (جدول-۳) برای ارزیابی پدیده حمل و نقل کنده‌ها استفاده شد.

### ۱-۱- اثر مدل رئولوژی

در حالت عمودی (و نزدیک به عمودی) که در چاه‌های اکتشافی مرسوم است، رفتار رئولوژی گل تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پدیده انتقال کنده‌های حفاری دارد و بنابراین تعیین رفتار رئولوژی گل، تأثیر زیادی در پیش‌بینی دقیق پدیده انتقال کنده‌های حفاری دارد. استفاده از مدل رئولوژی پاور-لا در

کلارک و بیکهام در سال ۱۹۹۴ یک مدل مکانیکی بر اساس نیروهای مومنتوم وارد بر خرده را ارائه کردند. این مدل حداقل نرخ پمپ برای انتقال یک خرده را پیش‌بینی می‌کند. آن‌ها برای انتقال کنده‌های حفاری سه حالت تعریف کرده‌اند: ته‌نشینی<sup>۱</sup>، بلند کردن<sup>۲</sup> و غلظاندن<sup>۳</sup> که هر کدام در محدوده خاصی از زاویه چاه غالب است [۶].

### ۱- شبیه‌سازی انتقال کنده‌ها با Well Plan

شبیه‌سازی انتقال کنده‌ها در یک چاه اکتشافی به طول ۴۵۶۴ متر انجام شد. حفره جداری گذاری شده در عمق ۴۵۵۰ متر

۴ | اثر مدل رئولوژی بر حداقل نرخ جریان (گالن بر دقیقه) بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت)

نرخ نفوذ (متر بر ساعت)	مدل پاور لا			بینگهام پلاستیک			هرشل-بالکی		
	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳
۹/۱۴	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶	۲۳۵/۳	۲۹۴/۹	۱۲۱/۵
۲۱/۳۴	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶/۸	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶/۸	۲۳۵/۳	۲۹۴/۹	۱۲۲/۲
۴۲/۶۷	۲۲۸/۳	۲۲۸/۳	۱۴۹/۳	۲۲۸/۳	۲۸۱/۸	۱۴۹/۳	۲۳۸/۸	۲۹۴/۹	۱۵۴/۸
۸۵/۳۴	۲۹۳/۴	۳۳۴/۸	۲۱۴/۵	۲۹۳/۴	۳۳۴/۸	۲۱۴/۵	۳۰۳/۹	۳۴۷/۹	۲۱۹/۹
۱۰۳/۶۳	۳۲۱/۳	۳۶۲/۷	۲۴۲/۴	۳۲۱/۳	۳۶۲/۷	۲۴۲/۴	۳۳۱/۸	۳۷۵/۸	۲۴۷/۸

حالت-۱: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۱۲۷ میلی‌متر  
حالت-۲: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر  
حالت-۳: فضای بین لوله آستر ۱۵۷/۰۷ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر

۵ | اثر وزن سیال حفاری (پوند بر فوت مکعب) بر حداقل نرخ جریان (گالن بر دقیقه) بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت)

نرخ نفوذ (متر بر ساعت)	۳۶ پوند بر فوت مکعب			۳۷ پوند بر فوت مکعب			۳۸ پوند بر فوت مکعب		
	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳
۹/۱۴	۲۵۰/۲	۳۱۳/۵	۱۲۹/۱	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶	۲۰۱/۹	۲۵۳/۰	۱۰۴/۲
۲۱/۳۴	۲۵۰/۲	۳۱۳/۵	۱۲۹/۹	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶/۸	۲۰۱/۹	۲۵۳/۰	۱۰۴/۹
۴۲/۶۷	۲۵۳/۷	۳۱۳/۵	۱۶۲/۴	۲۲۸/۳	۲۸۱/۸	۱۴۹/۳	۲۰۵/۳	۲۵۳	۱۳۷/۵
۸۵/۳۴	۳۱۸/۸	۳۶۶/۵	۲۲۷/۵	۲۹۳/۴	۳۳۴/۸	۲۱۴/۵	۲۷۰/۴	۳۰۵/۹	۲۰۲/۶
۱۰۳/۶۳	۳۴۶/۷	۳۹۴/۴	۲۵۵/۴	۳۲۱/۳	۳۶۲/۷	۲۴۲/۴	۲۹۸/۳	۳۳۳/۸	۲۳۰/۵

حالت-۱: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۱۲۷ میلی‌متر  
حالت-۲: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر  
حالت-۳: فضای بین لوله آستر ۱۵۷/۰۷ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر

شبهه‌سازی انتقال کنده‌های حفاری دارای بیشترین خطا ۲۸/۷ درصد در پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری در سطح است و مدل پلاستیک بینگهام دارای خطای ۱۱/۲- درصد در پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری در سطح می‌باشد. مدل هرشل-بالکلی دارای دقیق‌ترین پیش‌بینی و خطای آن ۶/۸- درصد است. با توجه به اینکه مدل هرشل-بالکلی خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌های رئولوژی دارد، در این مطالعه برای آنالیز حساسیت و پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری از مدل هرشل-بالکلی استفاده شد. در جدول ۴- اثر مدل رئولوژی بر حداقل نرخ جریان بر نرخ نفوذ نشان داده شده است.

### ۱-۳- اثر گرانروی پلاستیکی و تنش واروی

در این بخش برای بررسی تأثیر گرانروی پلاستیکی<sup>۵</sup> و تنش واروی<sup>۶</sup>، سه نمونه گل (I, II و III) در نظر گرفته شد. پارامترهای رئولوژیکی این سه نمونه گل در چاه SX-01 در جدول ۶- آمده است.

بر اساس این مطالعه، استفاده از گل با پارامترهای رئولوژیکی بالاتر، باعث بهبود تمیز سازی چاه می‌شود، به‌طوریکه استفاده از گل نوع باعث کاهش ۱۱ درصدی و استفاده از گل نوع باعث کاهش ۸۸ درصد کنده‌های حفاری در سطح می‌شود. در جدول ۷- تأثیر پارامترهای رئولوژیکی بر حداقل نرخ جریان بر نرخ نفوذ را می‌توان دید.

### ۱-۴- خواص کنده‌ها

#### ۱-۴-۱- اثر چگالی کنده‌ها

چگالی سنگ‌های معمول در زمین‌شناسی ایران در جدول ۸- آمده است. در این مطالعه برای شبهه‌سازی تأثیر چگالی

شبهه‌سازی انتقال کنده‌های حفاری دارای بیشترین خطا ۲۸/۷ درصد در پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری در سطح است و مدل پلاستیک بینگهام دارای خطای ۱۱/۲- درصد در پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری در سطح می‌باشد. مدل هرشل-بالکلی دارای دقیق‌ترین پیش‌بینی و خطای آن ۶/۸- درصد است. با توجه به اینکه مدل هرشل-بالکلی خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌های رئولوژی دارد، در این مطالعه برای آنالیز حساسیت و پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری از مدل هرشل-بالکلی استفاده شد. در جدول ۴- اثر مدل رئولوژی بر حداقل نرخ جریان بر نرخ نفوذ نشان داده شده است.

### ۱-۲- اثر وزن سیال حفاری

برای بررسی اثر وزن سیال حفاری در انتقال کنده‌ها، سه سیال حفاری به ترتیب با وزن ۶۳، ۷۳ و ۸۳ پوند بر فوت مکعب در نظر گرفته شد و با توجه به نتایج بخش قبلی، رئولوژی گل بر اساس مدل هرشل-بالکلی لحاظ شد. در گل‌های سبک‌تر

جدول ۶ | پارامترهای رئولوژیکی سه نمونه از سیالات مورد استفاده در چاه SX-01

عمق (متر)	وزن گل (پوند بر فوت مکعب)	$\theta_{600}$	$\theta_{300}$	$\theta_{200}$	$\theta_{100}$	$\theta_6$	$\theta_3$
I	۷۳	۲۹	۱۹	۱۵	۱۰	۳	۲
II	۷۳	۳۷	۲۶	۲۱	۱۵	۳	۲
III	۷۳	۴۶	۳۳	۲۷	۱۹	۵	۴

جدول ۷ | اثر گرانروی پلاستیکی و تنش واروی بر حداقل نرخ جریان (گالن بر دقیقه) بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت)

نرخ نفوذ (متر بر ساعت)	گل نوع I			گل نوع II			گل نوع III		
	حالت ۱-	حالت ۲-	حالت ۳-	حالت ۱-	حالت ۲-	حالت ۳-	حالت ۱-	حالت ۲-	حالت ۳-
۹/۱۴	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶	۱۸۵/۳	۲۳۲/۲	۱۰۴/۶	۱۸۵/۳	۲۳۲/۲	۱۰۴/۶
۲۱/۳۴	۲۲۴/۸	۲۸۱/۸	۱۱۶/۸	۱۸۵/۳	۲۳۲/۲	۱۰۴/۶	۱۸۵/۳	۲۳۲/۲	۱۰۴/۶
۴۲/۶۷	۲۲۸/۳	۲۸۱/۸	۱۴۹/۳	۱۸۵/۳	۲۳۲/۲	۱۱۶/۶	۱۸۵/۳	۲۳۲/۲	۱۰۴/۶
۸۵/۳۴	۲۹۴/۴	۳۳۴/۸	۲۱۴/۵	۲۳۰	۲۵۵/۲	۱۸۱/۷	۲۰۴/۳	۲۳۲/۲	۱۶۸/۵
۱۰۳/۶۳	۳۲۱/۳	۳۶۲/۷	۲۴۲/۴	۲۵۷/۹	۲۸۳/۱	۲۰۹/۶	۲۳۲/۲	۲۵۱	۱۹۶/۴

حالت-۱: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۱۲۷ میلی‌متر  
حالت-۲: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر  
حالت-۳: فضای بین لوله آستری ۱۵۷/۰۷ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر

افزایش ۶۹ درصدی غلظت کنده‌های حفاری می‌شود. بنابراین کنده‌های حفاری با چگالی کمتر بسیار سریعتر جابجا می‌شوند. در جدول ۹- اثر چگالی (ویژه) کنده‌های حفاری بر حداقل نرخ جریان (گالن بر دقیقه) بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت) را می‌توان دید.

کنده‌ها، علاوه بر سنگ کربناته از شیل‌های معمولی و سنگ‌های آذرین نیز استفاده شد.

بر اساس بررسی اثر چگالی، ۱۵ درصد کاهش در چگالی کنده‌های حفاری باعث کاهش ۹۷ درصدی غلظت کنده‌های حفاری و ۷ درصد افزایش در چگالی کنده‌های حفاری باعث

#### ۱-۴-۲- اثر اندازه کنده‌ها

اندازه کنده‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترهای است که در پدیده تمیزکاری چاه تأثیرگذار است. بنابراین کنده‌های حفاری کوچک (۱ میلی‌متر)، متوسط (۳ میلی‌متر) و بزرگ (۵ میلی‌متر) برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شد. ۶۷ درصد کاهش در اندازه کنده‌های

۸ | چگالی سنگ‌های مرسوم در زمین‌شناسی ایران

نوع سنگ	زغال سنگ	شیل بست	شیل معمولی	ماسه سنگ	کربنات	آذرین
چگالی (گرم اسی سی)	۱/۵	۲/۰	۲/۳	۲/۶۵	۲/۷۱	۲/۹

۹ | اثر چگالی (ویژه) کنده‌های حفاری بر حداقل نرخ جریان (گالن بر دقیقه) بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت)

نرخ نفوذ (متر بر ساعت)	۲/۳			۲/۷			۲/۹۱		
	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳
۹/۱۴	۱۷۶/۱	۲۲۰/۷	۹۹/۴	۲۸۱/۸	۲۲۴/۸	۱۱۶	۲۴۴/۰	۳۰۵/۸	۱۲۵/۹
۲۱/۳۴	۱۷۶/۱	۲۲۰/۷	۹۹/۴	۲۸۱/۸	۲۲۴/۸	۱۱۶/۸	۲۴۴/۰	۳۰۵/۸	۱۲۶/۷
۴۲/۶۷	۱۷۶/۱	۲۲۰/۷	۱۲۲/۴	۲۸۱/۸	۲۲۸/۳	۱۴۹/۳	۲۴۷/۵	۳۰۵/۸	۱۵۹/۲
۸۵/۳۴	۲۴۱/۲	۲۶۹/۳	۱۸۷/۵	۳۳۴/۸	۲۹۳/۴	۲۱۴/۵	۳۱۲/۶	۳۵۸/۸	۲۲۴/۳
۱۰۳/۶۳	۲۶۹/۱	۲۹۷/۲	۲۱۵/۴	۳۶۲/۷	۳۲۱/۳	۲۴۲/۴	۳۴۰/۵	۳۸۶/۷	۲۵۲/۳

حالت-۱: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۱۲۷ میلی‌متر  
حالت-۲: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر  
حالت-۳: فضای بین لوله آستری ۱۵۷/۰۷ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر

۱۰ | اثر اندازه کنده‌های حفاری بر حداقل نرخ جریان (گالن بر دقیقه) بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت)

نرخ نفوذ (متر بر ساعت)	۱ میلی‌متر			۳ میلی‌متر			۵ میلی‌متر		
	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳	حالت-۱	حالت-۲	حالت-۳
۹/۱۴	۲۰۳/۱	۲۵۴/۵	۱۰۴/۸	۲۸۱/۸	۲۲۴/۸	۱۱۶	۲۹۷/۶	۳۷۳/۰	۱۵۳/۶
۲۱/۳۴	۲۰۳/۱	۲۵۴/۵	۱۰۵/۶	۲۸۱/۸	۲۲۴/۸	۱۱۶/۸	۲۹۷/۶	۳۷۳/۰	۱۵۴/۳
۴۲/۶۷	۲۰۶/۶	۲۵۴/۵	۱۳۸/۱	۲۸۱/۸	۲۲۸/۳	۱۴۹/۳	۳۰۱/۱	۳۷۳/۰	۱۸۶/۹
۸۵/۳۴	۲۷۱/۷	۳۰۷/۵	۲۰۳/۲	۳۳۴/۸	۲۹۳/۴	۲۱۴/۵	۳۶۶/۲	۴۲۵/۹	۲۵۲/۰
۱۰۳/۶۳	۲۹۹/۶	۳۵۵/۴	۲۳۱/۱	۳۶۲/۷	۳۲۱/۳	۲۴۲/۴	۳۹۴/۱	۴۵۳/۸	۲۷۹/۹

حالت-۱: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۱۲۷ میلی‌متر  
حالت-۲: فضای بین لوله جداری ۲۲۰/۵ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر  
حالت-۳: فضای بین لوله آستری ۱۵۷/۰۷ میلی‌متر و رشته حفاری ۸۸/۹ میلی‌متر

حفاری باعث کاهش ۸۲ درصدی کنده‌های حفاری در سطح می‌شود و ۶۷ درصد افزایش در اندازه کنده‌های حفاری باعث افزایش ۲۱۷ درصدی کنده‌های حفاری در سطح می‌شود. در جدول-۱۰ اثر اندازه کنده‌های حفاری بر حداقل نرخ جریان (گالن بر دقیقه) بر نرخ نفوذ (متر بر ساعت) نشان داده شده است.

### نتیجه‌گیری

براساس این مطالعه، پیش‌بینی حداکثر نرخ نفوذ بر مبنای محدودیت‌های حفاری در تهیه برنامه هیدرولیک چاه بسیار حیاتی است. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش بدین شرح است:

۱- در چاه‌های عمودی (و نزدیک به حالت عمودی) که در چاه‌های اکتشافی مرسوم است، رفتار رئولوژی گل تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پدیده انتقال کنده‌های حفاری و تعیین حداکثر نرخ نفوذ دارد. مدل رئولوژی پاورلا دارای خطای ۲۸/۷٪، مدل بینگهام پلاستیک دارای خطای ۱۱/۲٪ و مدل هرشل-بالکلی دارای خطای ۶/۸٪ در پیش‌بینی درصد کنده‌های حفاری در سطح است.

۲- در گل‌های سبک‌تر، کنده‌های حفاری به‌کندی حرکت می‌کنند و درصد آن‌ها در سطح چاه بیشتر است. وزن گل بالاتر باعث بهبود عملکرد انتقال کنده‌ها می‌شود و در نتیجه می‌توان با نرخ نفوذ بیشتر حفاری کرد.

۳- کنده‌هایی با وزن کمتر و کوچکتر بسیار سریع‌تر جابجا می‌شوند و نرخ نفوذ ایمن را به شدت افزایش می‌دهد.



شکل ۲ | ۴



شکل ۱ | ۴

### پانویس‌ها

- |                                  |            |                      |
|----------------------------------|------------|----------------------|
| 1. Cutting Transport Performance | 3. Lifting | 5. Plastic Viscosity |
| 2. Settling                      | 4. Rolling | 6. Yield Point       |

### منابع

- [1] Li Piroo ian • Issham Ismail • Zulkefli Yaacob, Parham Babakhani • hmad Shamsul Izwan Ismail "Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells" J Petrol Explor Prod Technol (2012) 2:149-156 Cutting transport parametric sensitivity simulation studies in vertical and deviated wells.
- [2] J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyeneyin, Erhu Gao, and R. Zarrough, 1990 "Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Boreholes" SPE 20421, SPE annual technical conference and exhibition, 23-26 September 1990.
- [3] Hareland, Geir, NM Inst. of Mining and Technology; Azar, J.J., U. of Tulsa; Rampersad, P.R., NM Inst. of Mining and Technology" Comparison of Cuttings Transport in Directional Drilling Using Low-Toxicity Invert Emulsion Mineral-Oil-Based and Water-Based Muds" SPE 25871-MS SPE Low Permeability Reservoirs Symposium, 26-28 April 1993, Denver, Colorado.
- [4] T.R. SIHerman, SPE, and T.E. Becker, SPE, Mobil R&D Corp. "Hole Cleaning in Full-Scale Inclined Wellbores" SPE Drilling Engineering, June 1992
- [5] Sifferman, T.R. Myers, G.M. Haden, E.L. and Wahl, H.A., "Drill cutting transport in Full-scale vertical annuli" J. Pet. Tech. Nov. 1974.
- [6] Clark, R.K. and Bickham, K.L. 1994. "A Mechanistic Model for Cuttings Transport" Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, 25-28 September. SPE-28306-MS.