نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۴، سال ۱۳۹۷، صفحات ۸۶۳ تا ۸۷۲
DOI: 10.22060/mej.2017.11736.5305

بررسی آزمایشگاهی رفع گیر اختلاف فشاری با تغییر در خواص و افزایه‌های موجود در سیال حفاری

احسان آزاد[1*]، ساسان یوسفی راد[2]، محسن ده ودار[3]، پرویز معارف وند[1]

[1] دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
[2] دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران
[3] دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده: گیر اختلاف فشاری در چاه یکی از شایع‌ترین و درعین‌حال دردسرآفرین‌ترین مشکلات حفاری چاه‌های نفت است. در این مقاله با تکیه بر مطالعات انجام‌شده در زمینه رفع گیر اختلاف فشاری به کمک افزایه‌های گل حفاری، گل‌های پایه آبی بنتونایتی و لیگنوسولفونایتی مورد مطالعه قرارگرفته است. انتخاب افزونه مناسب به کمک دستگاه خواص سنجی کیک گل با اندازه‌گیری مقاومت پیچشی کیک گل به‌عنوان متغیر اصلی در کنار اندازه‌گیری سایر متغیرهای فرعی شامل وزن گل، گرانروی گل، دمای آزمایش، میزان افت صافاب، ضخامت کیک گل و ساختار فیزیکی کیک گل انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن است که در گل‌های بنتونایتی، نمک به‌عنوان عامل مخرب و PAC به‌عنوان عامل مؤثر در رفع گیر می‌باشد. سیالات لیگنوسولفونایتی نیز با خاصیت تینری خود در رفع گیر اختلاف فشاری مفید واقع شدند. آنچه می‌توان به‌عنوان دستاورد این مقاله در نظر گرفت توجه به چرخش کم لوله حفاری در ابتدای وقوع گیر است که با توجه به اندازه‌گیری‌های مقاومت پیچشی رشته حفاری در کیک گل، روش بسیار مؤثری می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۶ دی ۱۳۹۵
بازنگری: ۶ اردیبهشت ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۷ اردیبهشت ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:
گیر اختلاف فشاری
لیگنوسولفونایت
مقاومت پیچشی
کیک گل
دستگاه خواص سنجی کیک گل

۱- مقدمه

گیر لوله‌ها برحسب نوع مکانیسم خود به سه دسته زیر طبقه‌بندی می‌شوند. دسته اول، گیرهای ناشی از ته‌نشینی و ریزش مواد جامد موجود در گل مانند: گیر رشته در اثر ته‌نشین شدن کنده‌های حفاری، ریزش شیل‌های دیواره چاه، ریزش سازندهای سست و نامستحکم[1]، ریزش سازندهای دارای شکستگی[2]، گیرهای مرتبط با سیمان‌کاری و گیرهای مرتبط با حضور وسایل فلزی[3]. دسته دوم، گیر اختلاف فشاری[4] و دسته سوم گیرهای مرتبط با هندسه چاه، شامل گیر رشته حفاری در حفره جاکلیدی[5]، سگ دست چاه[6]، لبه‌ها[7]، گیر رشته حفاری سازندهای متحرک و روان[8] و در حفره کم سایز[9] [۱].

گیر اختلاف فشاری لوله‌های حفاری یکی از مهم‌ترین مشکلات حفاری می‌باشد. این پدیده در همه جای دنیا معمول بوده و معمولاً افزایش هزینه‌ها را به دنبال دارد. این گیرکردن می‌تواند در هر زمانی اعم از حفاری، تعویض لوله‌ها، چاه پیمایی و سایر مواردی که منجر به ماندن ابزار در چاه می‌شود اتفاق بیفتد [۲].

با توجه به هزینه بالای دکل‌های حفاری در هر روز و یا هر ساعت ایجاد اخلال در عملیات حفاری به هر نحوی منجر به هدر رفت سرمایه تا حد بسته شدن و تعطیلی چاه خواهد شد لذا در زمان رخ دادن گیر اختلاف فشاری مهم‌ترین مسئله زمان است که تمامی پارامترهای دیگر به آن وابسته هستند. بدین ترتیب ارائه راهکاری در جهت رفع سریع گیرهای رخداده در چاه ازجمله مشکل رایج گیر اختلاف فشاری می‌تواند راهگشای مهندسین حفاری در جهت رفع این پدیده و جلوگیری از ضرر بیشتر گردد.

پس از گیر افتادن رشته حفاری، لازم است که به سرعت هرگونه تلاشی برای آزادسازی آن صورت گیرد، اما این تلاش‌ها ممکن است بی‌نتیجه بماند و عوارض عمده‌ای همانند از دست رفتن رشته حفاری یا از دست رفتن کامل چاه را در پی داشته باشد. درصد زیادی از گیر لوله‌ها درنهایت به حفاری کنارگذر در نزدیک لوله گیرکرده منجر می‌گردد. بنابراین کلید واقعی

1 Unconsolidated Formation
2 Fractured & Faulted Formations
3 Junk
4 Differential Pressure Sticking
5 key seat
6 Dog leg
7 Ledges
8 Mobile formation
9 Under gauge hole

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ehsazad@aut.ac.ir

موفقیت، اجتناب از عوامل منجر به وقوع گیر لوله است. اگر این عوامل به‌طور دقیق مشخص شوند، می‌توان به‌گونه‌ای عمل کرد که احتمال گیر افتادن لوله کاهش یابد [۳].

تحقیق و پژوهش در زمینه گل حفاری همواره یکی از مهم‌ترین مسائل در حفاری چاه‌های نفت است. نوع ترکیبات و خواص گل حفاری می‌تواند به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در رفع گیرهای اختلاف فشاری رخ‌داده در چاه‌های حفاری باشد. در این زمینه از سال ۱۹۵۰ تحقیقاتی در مورد گیر لوله‌ها آغاز شد. این تحقیقات به دو صورت سرچاهی و آزمایشگاهی انجام شده‌است. در ۱۹۶۲ انیس و موناگان [۴] تحقیقات آزمایشگاهی در زمینه لوله‌های جداری و کیک گل انجام دادند که با ساخت دستگاه اندازه‌گیری ضریب چسبندگی به بررسی حالت‌های مختلف ضریب چسبندگی و ضریب اصطکاک در حالت گیر اختلاف فشاری پرداختند. در سال ۱۹۸۷ همپکینز و همکاران [۵] بـه تحلیـل اسـتاتیکی گیر لوله‌ها بر مبنـای پارامترهای حفاری پرداختند. این کار با مقایسـه چاه‌هایی کـه در آن‌ها گیر لوله‌ها اتفاق افتاده بود و چاه‌های بدون گیر انجام شـد. بدین‌صورت که پارامترهای هر یک از دو چاه مورد مقایسـه قرار گرفتند سپس با توجه به چاه‌های بدون گیر، برای حفر چاه‌های دیگر برنامه‌ریزی گردیـد. این دو نفر ۲۲۱ پارامتر را در ۱۳۱ مورد گیر در چاه‌های مکزیک مورد مطالعه قراردادند و احتمال گیر لوله‌های حفـاری را در چاه‌های اطـراف پیش‌بینی نمودند. در سال ۱۹۹۴، بیگلر و کوهن [۶] با ایجاد یـک بانک اطلاعاتی بـرای ۲۲ پارامتر حفاری در ۷۳ چاه بدون گیر خلیج مکزیک و ۵۴ چاه با مشکل گیر لوله‌ها، به تحلیل این موضوع پرداختند. ایـن دو مطالعه مبنای تحلیل‌های اولیه مقایسه‌ای بودند. این تحلیل‌ها با تلفیـق متغیرهای حفاری انجام گردید. آن‌ها نه‌تنها احتمال گیر لوله‌ها را پیش‌بینی کردند، بلکه توانسـتند مکانیسـم آن را نیز شناسایی کنند. در سال ۱۹۹۴، هاوارد و گلور [۷] بـا اسـتفاده از تکنیک‌های آماری توانسـتند مدل‌های پیش‌بینی گیر لوله‌ها را ترقی بخشند. این کار را با آزمایش در ۱۰۰ چاه خلیج مکزیک انجام شد. این نمونه‌ها برای جلوگیری از گیر لوله‌ها یا انجام عملیات آزادسـازی استفاده می‌شد. در ۱۹۹۹، ایزامبورگ و مارتی [۸] به این نتیجه رسیدند که سختی کیک گل می‌تواند به‌عنوان یک عامل مهم کنترل‌کننده گیر اختلاف فشاری باشد. در سال ۲۰۰۰، امان‌الله و تان [۹] دریافتند تشکیل کیک گل نرم و ضخیم در دیواره چاه می‌تواند احتمال وقوع گیر اختلاف فشاری در چاه را افزایش دهد و در ۲۰۰۱، به این نتیجه رسیدند خرده‌های حفاری نفوذ کرده در بستر سازند شدیداً تحت تأثیر خواص فشاری کیک گل می‌باشند [۱۰]. در ۲۰۰۲، امان‌الله [۱۱] به این نتیجه رسید که سهولت بازیابی لوله گیرکرده در چاه متناسب با مقاومت فشاری کیک گل و گشتاور بیش از حد رشته حفاری در ارتباط با مقاومت پیچشی کیک گل است و در ۲۰۰۳، با سرمایه‌گذاری شرکت استرالیایی سی سایرو اقدام به ساخت دستگاه اندازه‌گیری خواص کیک گل حفاری و به دنبال آن به بیان استانداردی برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت پیچشی کیک گل حفاری با استفاده از نیروسنجی با عملکرد سه‌گانه پرداخت [۱۲]. در سال ۲۰۰۴، امان‌الله [۱۳] در ادامه فعالیت‌های قبلی خود به کمک دستگاه اندازه‌گیری خواص کیک گل حفاری، به بررسی تغییرات مقاومت پیچشی کیک گل با توجه به تنوع افزونه‌های گل حفاری پرداخت. این تحقیقات نشان داد مقاومت پیچشی کیک گل حفاری شدیداً تحت تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی افزونه‌های گل حفاری است. در ۲۰۰۶، سیروری و همکاران [۱۴] نیز توسط شـرکت هالیبرتون، کاربردی از شبکه‌های عصبی بـرای پیش‌بینی گیر لوله‌ها به‌صورت دیفرانسیلی در خلیج مکزیک، به چاپ رسانده است. علاوه بر موارد یادشده الکمیل و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از مدل‌سازی عددی به بررسی معیارهای شکست در جهت کنترل وزن گل و پیش‌بینی گیر اختلاف فشاری در سازند mishrif عراق پرداختند.

۲- روش و مراحل تحقیق

این پژوهش به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی خواص گل حفاری در ارتباط با موضوع گیر اختلاف فشاری رشته حفاری می‌پردازد. عامل اصلی گیر اختلاف فشاری گیرکردن قسمتی از رشته حفاری در کیک گل دیواره چاه در اثر اختلاف بین فشار هیدرواستاتیکی گل حفاری و فشار سازند است. در آزمایشگاه مقاومت پیچشی حداکثر کیک گل، میزان افت صافاب و ضخامت کیک گل با توجه به استانداردهای آزمایش اندازه‌گیری شده است. این پژوهش بر پایه مقالات امان‌الله سازنده دستگاه اندازه‌گیری خواص مکانیکی کیک گل[1] انجام شده‌است که در ابتدا جهت تأیید داده‌های حاصل از مقالات امان‌الله و کالیبراسیون دستگاه، به اندازه‌گیری خواص گل‌های موجود در این مقالات پرداخته شده و در ادامه با توجه به موضوع، افزونه‌های انتخابی کائوچو و خاک اره در گل پایه آبی لیگنوسولفونایتی، تغییرات مقاومت پیچشی به‌طور قیاسی بررسی شده است. این پژوهش در آزمایشگاه حفاری و آزمایشگاه ژئومکانیک دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر انجام شده است. در این پژوهش متغیرهای وزن گل، گرانروی گل، دمای آزمایش، میزان افت صافاب، ضخامت، ساختار فیزیکی کیک گل و مقاومت پیچشی کیک گل اندازه‌گیری شد که از میان آن‌ها مقاومت پیچشی حداکثر کیک گل و ضخامت کیک گل به‌عنوان متغیرهای اصلی مورد بررسی قرارگرفته‌اند. در جدول ۱ متغیرهای اندازه‌گیری شده به همراه واحد و ابزار اندازه‌گیری آن آورده شده است.

یکی از افزونه‌های به‌کار رفته در این تحقیق لیگنوسولفونایت است. این ماده ترکیب پلیمری مشتق‌شده از چوب بوده و شامل ترکیبات هیدروفیلیک و هیدوفوبیک است [۱۶] که از آن به‌عنوان تینر در گل‌های آب نمک اشباع استفاده شده و باعث کاهش ویسکوزیته گل‌هایی می‌شود که مواد جامد موجود در آن‌ها کم و YEILD و PH بالایی دارند و رنگ این ماده قهوه‌ای تیره است [۱۷]. گل‌های حاوی لیگنوسولفونایت به علت کارایی بالای رقت‌پذیری این ماده در مواجه با حجم بالای مواد سخت و نمکی در

1 MCCE (Mud Cake Characterization Equipment)

جدول ۱: اطلاعات متغیرهای به‌کاررفته در تحقیق

Table 1. Parameters measured in experiments.

نام متغیر	واحد اندازه‌گیری	ابزار اندازه‌گیری
وزن گل	lb/ft^3	ترازوی گل
گرانروی گل	Sec/946.33ml یک کوارت	قیف مارش
دما	°C	دماسنج دیجیتال
میزان افت صافاب	ml	API filter press
ضخامت	mm	کولیس دیجیتال
مقاومت پیچشی	gm.cm	MCCE

چاه‌های حفاری برای رفع بسیاری از مشکلات حین حفاری مفید می‌باشند [۱۸].

در ترکیبات گل استفاده شده ابتدا جهت تأیید و مقایسه داده‌ها، گل‌های موجود در مقاله امان الله [۱۲] که با پیشوند A نام‌گذاری شده آزمایش شده است. در ادامه گل‌های پایه آبی لیگنوسولفونایتی ساخته شده‌اند که با پیشوند Ligno نام‌گذاری شده است. در جدول ۲ و ۳ ترکیبات گل‌های مورد استفاده آورده شده است.

بعد از ساخت کیک گل آن را درون سلول مخصوص API filter press ریخته و تحت فشار ۵±۱۰۰ psi تا رسیدن به افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر آزمایش را ادامه می‌دهیم. این مدت‌زمان با توجه به نوع افزونه‌های گل در فشار ثابت می‌تواند از ۲۰ دقیقه تا ۴۸ ساعت و یا بیشتر طول بکشد. در حین این مدت می‌توان داده‌های افت صافاب در ۷/۵ دقیقه و ۳۰ دقیقه را برای بررسی افت صافاب یادداشت نمود. بعد از رسیدن به صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر و شستشو کیک گل آن را درون دستگاه MCCE می‌گذاریم.

مکانیسم گیر اختلاف فشاری مطابق شکل ۱ به‌گونه‌ای است که فشار هیدرواستاتیک گل بیشتر از فشار سازند بوده و رشته حفاری به یک سمت دیواره رانده‌شده و قسمتی از لوله با کیک گل تشکیل‌شده در جداره چاه تماس پیدا می‌کند که این ناحیه تماسی تحت تأثیر فشار سازند و قسمت آزاد

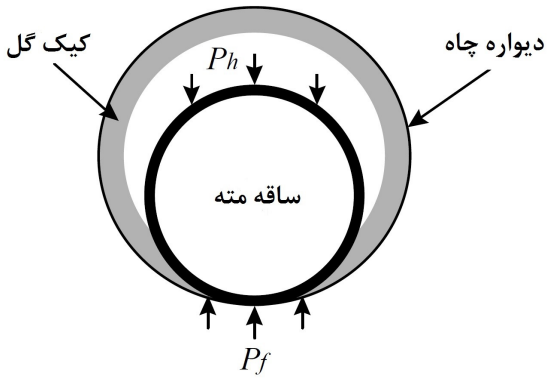


Fig. 1. Differential sticking. Ph is the hydrostatic pressure and Pf is the formation Pressure [2]

شکل ۱: مکانیسم گیر اختلاف فشاری در چاه [۲]

جدول ۲: ترکیبات گل‌های بنتونایتی [۱۲]

Table 2. Composition of Bentonite muds

نام افزایه/گل	A_1	A_2	A_3	A_4
آب مقطر (ml)	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰
بنتونایت (gr)	۳۰	۳۰	۳۰	۳۰
NaCl	–	۳۵	–	۳۵
KCl	–	–	۳۵	–
PAC	–	–	–	۲
NaOH	PH ۹/۸–۱۰	PH ۹/۸–۱۰	PH ۹/۸–۱۰	PH ۹/۸–۱۰

جدول ۳: ترکیبات گل‌های لیگنوسولفونایت [۱۹]

Table 3. Composition of Lignosulfonate muds

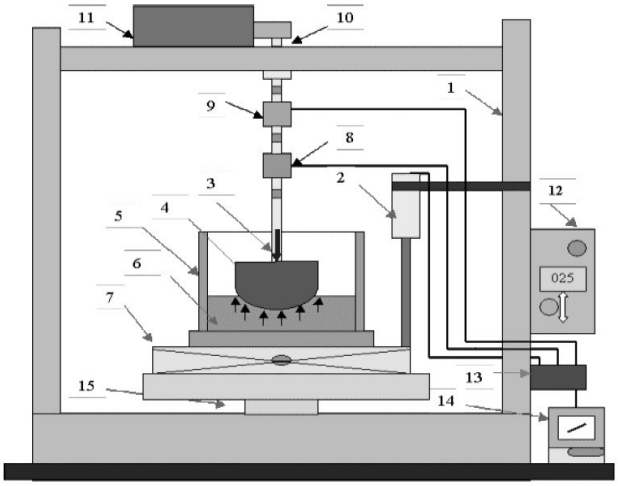
نام افزایه/گل	$Ligno_0$	$Ligno_1$	$Ligno_2$
آب مقطر (ml)	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰
بنتونایت (gr)	۱۵	۱۵	۱۵
Soda Ash	۰/۵	۰/۵	۰/۵
لیگنایت	۱	۱	۱
لیگنوسولفونایت	۲	۲	۲
باریت	۳	۳	۳
میکا	–	۳	–
خاک اره	–	–	۳
NaOH	PH ۹/۵–۱۰/۵	PH ۹/۵–۱۰/۵	PH ۹/۵–۱۰/۵

لوله تحت تأثیر فشار هیدرواستاتیک سیال است [۲].

زمانی که این مکانیسم اتفاق می‌افتد اگر لوله در معرض یک سازند نفوذپذیر باشد، فیلترات گل از درون آن خارج‌شده و به درون سازند نفوذ می‌کند و کیک گل بین فضای لوله و دیواره چاه باقی می‌ماند. با گذشت زمان از عمل فیلتراسیون، مقاومت کیک گل همین‌طور افزایش‌یافته تا این‌که به جایی می‌رسد که دیگر لوله را نمی‌توان بالا و پایین کرد.

دستگاه اندازه‌گیری خواص مکانیکی کیک گل مطابق آنچه در شکل ۲ به صورت شماتیک دیده می‌شود به کمک دو سنسور بارسنج و گشتاورسنج خود خواص مکانیکی کیک گل از جمله نرخ نفوذ، مقاومت کششی و مقاومت پیچشی را اندازه‌گیری می‌کند. در شکل ۳ نیز نمایی از خود دستگاه آورده شده است.

به‌منظور تعیین مقاومت پیچشی با استفاده از گشتاورسنج دستگاه این مقدار را تعیین می‌کنیم، روش انجام آزمایش به این نحو است که بعد از تولید کیک گل در دستگاه mud filter press، لیوان حاوی کیک را در مرکز دستگاه قرار می‌دهیم. ابتدا مقداری بار اعمال کرده تا تماس مؤثر



۱- دستگاه فشارشی بی طبقه Wykenham Farrarance ۲- پتانسیومتر ۳- پایه‌میله ۴- پایه کروی ۵- محفظه API ۶- کیک گل ۷- بالابر آزمایشگاهی ۸- گشتاورسنج ۹- نیروسنج ۱۰- جعبه دنده ۱۱- موتور DC ۱۲- صفحه کنترل ۱۳- ثبت کننده داده ۱۴- رایانه ۱۵- پایه متحرک

Fig. 2. Schematic layout of Mud Cake Characterization Equipment (MCCE) [12]

شکل ۲: طرح شماتیکی از دستگاه خواص سنجی کیک گل (MCCE) [۱۲]

با کیک گل برقرار شود، اجازه می‌دهیم تا سیستم به پایداری برسد، سپس جک را با سرعت ۰/۲۵ mm/min به سمت بالا حرکت می‌دهیم تا عمق نفوذ کیک گل به مقدار معین ۵ mm برسد. میله با سر نیم‌کره را با سرعت ۰/۵ degree/second می‌چرخانیم. چرخش میله را ادامه داده تا مقاومت پیچشی به مقدار ثابتی برسد. به کمک نمودار ترسیم شده می‌توان تخمینی از مقاومت پیچشی بیشینه کیک گل به دست آورد.

همان‌طور که از ظاهر این دستگاه آزمایشگاهی مشخص است این دستگاه نمی‌تواند فشار و دمای ته چال‌های حفاری را شبیه‌سازی کند و اندازه‌گیری در فشار یک اتمسفر و دمای اتاق انجام شده‌است و تأثیرگذاری دو متغیر اساسی دما و فشار بر رفتار سازند حین حفاری، نتایج حاصل از دقت کافی برخوردار نیستند [۲۰]. البته نمونه کامل‌تری از این دستگاه نیز تحت عنوان HPHT MCCE[1] ساخته شده‌است که توانایی اندازه‌گیری خواص مکانیکی کیک گل را در شرایط تحت‌فشار دیفرانسیلی بالای ۱۰۰۰ psi و دمای بالای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را دارد. این نمونه می‌تواند شبیه‌سازی دقیق‌تری را از شرایط درون‌چاهی نسبت به دستگاه استفاده شده در این تحقیق ارائه دهد [۲۱]. در کل باید پذیرفت که هیچ دستگاه آزمایشگاهی نمی‌تواند شرایط واقعی محیط مورد مطالعه را شبیه‌سازی کند و هدف این تحقیق و سایر مطالعات انجام شده رسیدن به معیار کیفی و تقریبی در جهت رفع گیر اختلاف فشاری است.

در دستگاه حاضر مطابق دفترچه راهنمای آن [۲۲] حداکثر نرخ اندازه‌گیری نیروسنج ۲/۵ kg.f و حداکثر نرخ حس‌گر گشتاورسنج ۷/۲ kg.cm می‌باشد. عبور از مقادیر ذکر شده موجب آسیب رسیدن به

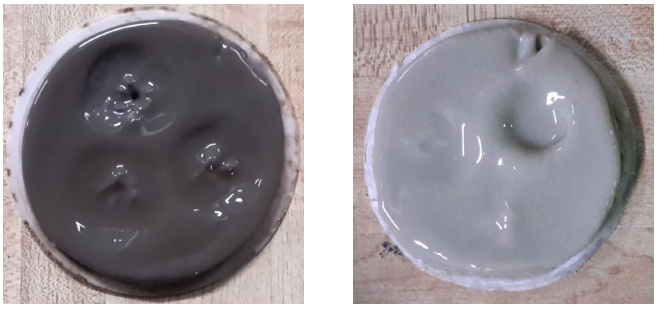
Fig. 3. Mud Cake Characterization Equipment (MCCE)

شکل ۳: نمایی از دستگاه خواص سنجی کیک گل (MCCE) [۲۰]

حس‌گرهای آن خواهد شد.

در شکل ۴ (الف) و ۴ (ب) به ترتیب نمایی از دو کیک گل ساخته شده از بنتونایت و لیگنوسولفونایت آورده شده است. همان‌طور که مشخص است بر روی هر کیک گل سه مرتبه آزمایش تکرار شده است و میانگین داده‌ها به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شده‌است [۲۰].

برای یک شیء کروی یا نیم‌کروی در یک نرخ جابه‌جایی زاویه‌ای ثابت، مقاومت پیچشی تابعی از تنش برشی پیوندها و ویژگی‌های Pro-Perm کیک گل بوده، یعنی تابعی از ترکیب شیمیایی و شرایط Physio-Chemical گل است. برای شرایط آزمایش ثابت، حداکثر مقاومت پیچشی که کیک گل در مقابل یک نیروی پیچشی از جانب پایه نیم‌کروی از خود نشان می‌دهد را MTRTED می‌نامند. نمودارهای به دست آمده با استفاده از آزمون‌های مختلف با گل‌های دارای ترکیبات شیمیایی مختلف روند تقریباً



(ب) (الف)

Fig. 4. Mud cake a) Bentonite b) Lignosulfonate

شکل ٤: نمایی از دو کیک گل ساخته‌شده الف) بنتونایتی ب) لیگنوسولفونایتی [۲۰]

1 High Pressure and High Temperature M.C.C.E.

یکسانی را نشان می‌دهند. در تحلیل داده‌ها بعد از به دست آوردن زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر و داشتن ضخامت کیک گل و درنهایت مقاومت پیچشی حداکثر می‌توان به‌طور مقایسه‌ای بیان کرد که کدام گل در برابر گیر اختلاف فشاری مقاوم‌تر و کدام افزایه سبب رفع گیر می‌شود.

۳- ارائه و تحلیل داده‌ها

در این قسمت مطابق جدول ۴ نتایج حاصل از هر یک از آزمایش‌ها آورده شده است. در هر آزمایش متغیرهای فرعی شامل دما، فشار کمپرسور، وزن گل و گرانروی گل‌ها گزارش‌شده و علاوه بر آن، نمودارهای مربوط به تغییرات روند مقاومت پیچشی و مقدار بیشینه آن، ضخامت کیک گل و مدت‌زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر گزارش می‌شود.

در ادامه سه متغیر اصلی ضخامت کیک گل، مدت‌زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر و مقاومت پیچشی بیشینه به‌طور جداگانه تحلیل می‌شوند. با کمک تحلیل این سه متغیر اصلی، تحلیل جامعی در پیشگیری و عدم رفع گیر اختلاف فشاری ارائه می‌شود.

۳- ۱- ضخامت کیک گل

همان‌طور که در نمودار شکل ۳ مشاهده می‌کنیم گل A_2 که یک گل بنتونایتی حاوی NaCl است دارای بیش‌ترین ضخامت کیک گل بوده و بعد از آن گل A_3 است که این امر نشان می‌دهد ضخامت کیک گل‌های نمکی نسبت به سایر گل‌ها بیشتر بوده که ناشی از پیوند قوی‌تر بین ذرات نمکی و بنتونایتی است. یکی دیگر از خواص نمک‌ها قابلیت لخته‌سازی ذرات بنتونایتی است که این خاصیت موجب می‌شود کیک گل ضخیم‌تر و منسجم‌تری نسبت به سایر کیک گل‌ها داشته باشند.

در گل‌های لیگنوسولفونایتی نیز همان‌طور که در نمودار شکل ۵ دیده می‌شود گل $lingo_0$ نسبت به گل‌های $lingo_1$ و $lingo_2$ که دارای افزونه‌های میکا و خاک اره می‌باشند، ضخامت کمتری دارد که این امر نشان می‌دهد افزونه‌ها به‌خصوص خاک اره می‌تواند کیک گل ضخیم‌تری را به وجود آورد. البته این کیک گل دارای تخلخل بالایی بوده که ناشی از ماهیت فوم مانند گل آن است. همین تخلخل موجب افزایش ضخامت گل و سطح تماس فعال بیشتر با لوله می‌شود که می‌تواند منجر به افزایش احتمال گیر اختلاف فشاری گردد.

۳- ۲- زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر

هرچه مدت‌زمان افت صافاب در رسیدن به ۱۰۰ cc بیشتر باشد یعنی گل دارای سرعت هرزروی کمتری بوده و می‌تواند به‌عنوان یک سیال کاهنده افت صافاب به کار رود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود نمک‌ها دارای زمان افت صافاب کمتری بوده و در مدت‌زمان کمتری به ۱۰۰ cc افت صافاب می‌رسند که در این آزمایش نمک پتاسیم کلرید[1] از همه سریع‌تر است. این سرعت افت صافاب منجر به استحکام و سختی بیشتر کیک گل شده احتمال گیرکردن لوله را افزایش می‌دهد که این پدیده می‌تواند ناشی از آلودگی گل بنتونایتی در سازندهای نمکی باشد که در این صورت به احتمال زیاد گیر اختلاف فشاری رخ خواهد داد. البته این پدیده همیشه مضر نبوده و گل بنتونایتی اشباع از نمک در سازندهای نمکی می‌تواند موجب جلوگیری از آسیب سازند یا بزرگ شدن و یا شسته شدن دیواره چاه شود.

گل A_1 نیز با توجه به طولانی شدن زمان افت صافاب آن می‌تواند گل مناسبی در برابر سازندهای متخلخل و مستعد پدیده گیر اختلاف فشاری گردد. گل A_4 دارای بیش‌ترین زمان افت صافاب بوده که ناشی از وجود PAC در آن است. این ماده به‌عنوان کاهنده افت صافاب در چاه‌های نفت به کار می‌رود.

در سیالات لیگنوسولفونایتی نیز همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌طورکلی دارای زمان افت صافاب بالایی می‌باشند که ناشی از وجود تینر

جدول ٤: نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش کیک گل‌های مختلف

Table 4. Output results of mud cake experiments

نام افزایه/گل	دمای محیط °C	فشار کمپرسور psi	گرانروی گل quart	وزن گل lb/ft^3	ضخامت کیک گل (mm)	مدت‌زمان افت صافاب 100ml (min)	MTRTED (gr.cm)
A_1	۲۱	۹۸	غیرقابل‌اندازه‌گیری	۸۶/۶	۵	۹۱۵	۷/۷۸
A_2	۲۱/۷	۱۰۳	۲۴۲	۹۵/۵	۱۶	۴۵	۱۵/۷۶
A_3	۲۳/۲	۱۰۰	۲۷۳	۹۵/۵	۱۳	۲۰	۱۱/۰۶
A_4	۲۴/۱	۱۰۰	۲۹	۹۷/۹۸	۶	۳۹۷۵	۱۰/۵۱
$ligno_0$	۲۵/۲	۱۰۳	۱۶	۷۶/۷۵	۵,۶	۱۲۶۸	۱۳/۰۳
$ligno_1$	۲۵/۳	۱۰۰	۱۶	۷۴/۸۸	۶,۱	۱۰۰۹	۱۰/۰۷
$ligno_2$	۲۴/۷	۱۰۵	۵۳	کمتر از آب	۹,۵	۶۰۳	۸/۲۰

1 KCL

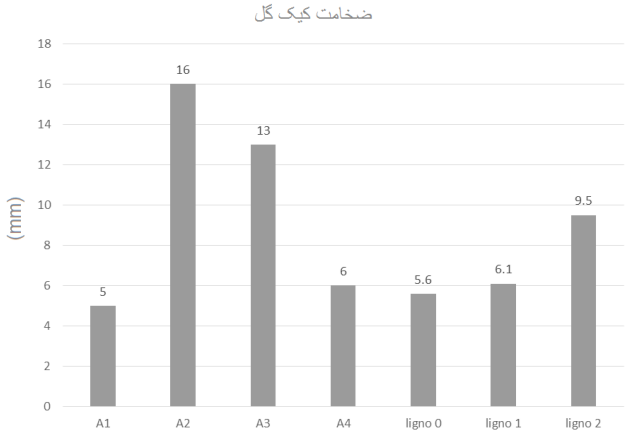


Fig. 5. Measured thickness of mud cakes

شکل ۵: نمودار ضخامت کیک گل‌های مختلف

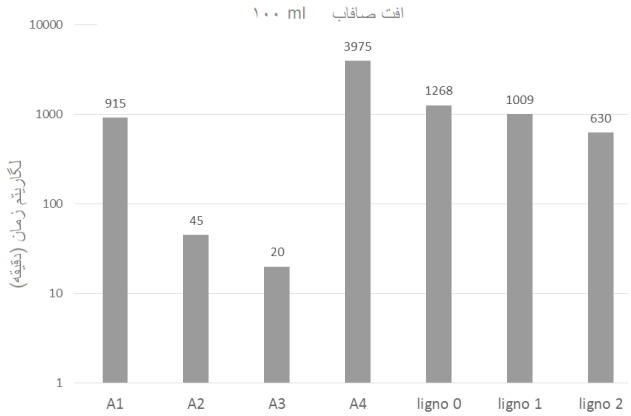


Fig. 6. Measured fluid loss of mud cakes

شکل ٦: نمودار افت صافاب گل‌های مختلف

لیگنوسولفونایت و لیگنایت در گل حفاری است که موجب می‌شود علاوه بر خاصیت روان کاری خود و کمک به رفع گیر رخ‌داده در چاه، هرزروی را نیز تا حد قابل‌توجهی کنترل کنند که از این حیث بسیار سیال مناسبی می‌باشند. البته همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود افزودن خاک اره به‌عنوان یک عامل منفی در این زمینه تلقی شده و با توجه به ضخامت کیک گل بالا و افت صافاب بالایی که به وجود می‌آورد نمی‌تواند به‌عنوان یک سیال مناسب در رفع گیر رخ‌داده به کار رود.

۳- ۳- مقاومت پیچشی بیشینه (MTRTED)

قاومت پیچشی کیک گل شدیداً تحت تأثیر خواص شیمیایی و فیزیکی افزونه‌های گل است. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود گل بنتونایتی خالص A_1 دارای کمترین مقاومت پیچشی و گل A_2 که دارای NaCl است بیش‌ترین مقاومت پیچشی را داراست. در گل A_1 به علت آب میان بافتی موجود و لخته‌سازی ذرات بنتونایتی یک خاصیت روان‌کاری در گل ایجاد شده که موجب کاهش مقاومت پیچشی می‌گردد. از طرفی وجود نمک‌ها با پیوندهای یونی و اتصال ذرات کاتیونی آن‌ها با ذرات بنتونایتی که هرچه پیوند طویل‌تر و کاتیون آن درشت‌تر باشد مقاومت پیچشی بالاتری را برای

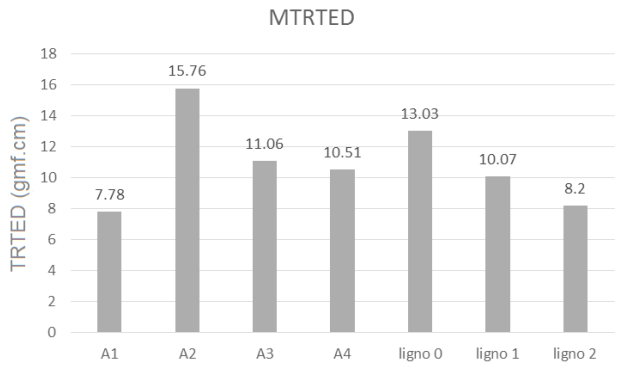


Fig. 7. Maximum Torsional Resistance at Targeted Embedment Depth (MTRTED) of mud cake in the experiments

شکل ۷: مقاومت پیچشی بیشینه گل‌های مورد آزمایش

گل‌های بنتونایتی رقم خواهد زد. این پدیده در گل‌های A_2 و A_3 مشهود است که البته گل A_3 به خاطر کوچک‌تر بودن یون پتاسیم نسبت به سدیم در گل A_2 مقاومت پیچشی کمتری را دارد.

گل A_4 نیز به علت وجود PAC در آن نسبت به گل A_2 که با ایجاد یک نیروی دافعه نسبتاً قوی موجب شکستن تعدادی از پیوندهای کاتیونی می‌شود، دارای مقاومت پیچشی کمتری است.

گل‌های بنتونایتی A_1 تا A_4 مطابق فرمول‌بندی موجود در مقاله امان الله [۱۲] ساخته شده است که نتایج حاصل از آن در نمودار شکل ۸ مطابق با نتایج مقاله مذکور در شکل ۵ است.

در گل‌های لیگنوسولفونایتی با توجه به نوع کالیبراسیون دستگاه برای این گل‌ها، اعداد متفاوت‌تری نسبت به گل‌های بنتونایتی مشاهده می‌شود اما به طورکلی به علت خاصیت روان‌کاری خود در گروه گل‌هایی با مقاومت پیچشی پایین قرار می‌گیرند که بسیار مستعد رفع گیر اختلاف فشاری می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود افزونه خاک‌اره در گل $Ligno_2$ که علی‌رغم نمره منفی در دو عامل قبل یعنی ضخامت و افت صافاب، در اینجا مقاومت کمتری را نشان می‌دهد که نسبت به دو گل دیگر مناسب‌تر است. این نتایج بیان‌گر این است که علی‌رغم تعریف متغیرهای اصلی جهت انتخاب گل مناسب عوامل تأثیرگذار دیگری نیز وجود دارند.

۳- ۴- تحلیل رفع گیر اختلاف فشاری

همان‌طور که می‌دانیم در گل‌های نرم و ضخیم احتمال گیر اختلاف فشاری بیشتر می‌شود [۱۳]. از طرفی سطح فعال یک کیک که منظور سطح تماس با لوله حفاری است به عنوان یک عامل مهم تلقی می‌شود که به نظر نگارنده هر چه کیک گل ضخیم‌تر باشد سطح فعال بیشتر خواهد شد و احتمال پدیده گیر اختلاف فشاری بالا خواهد رفت. سیالاتی با افت صافاب بیشتر نیز احتمال وقوع گیر را افزایش می‌دهند.

مهم‌ترین متغیر در این آزمایش‌ها مقاومت پیچشی کیک گل است که هر چه این عامل بیشتر شود لوله سخت‌تر در چاه می‌چرخد و رفع گیر آن مشکل‌تر خواهد شد. حال به تحلیل روند این عامل در نمودارهای

به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها در شکل ۹ خواهیم پرداخت.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در هر سه نمودار در جابه‌جایی حدود ۵ درجه بیشینه مقاومت پیچشی حادث می‌شود، این نکته بیان‌گر این است که درست در هنگام گیر اختلاف فشاری به‌جای جار زدن یا بالا کشیدن لوله با یک چرخش کوچک می‌توان شانس خارج کردن لوله از گیر را افزایش داد. رسیدن به حداکثر مقاومت پیچشی نشان‌دهنده بیش‌ترین مقاومت پیوندهای ارتباطی بین ذرات گل در پاسخ به گشتاور اعمالی می‌باشند. بعد از نقطه اوج شکست رخ می‌دهد که در ابعاد میکروسکوپی نشانگر لیز خوردن ذرات گل روی یکدیگر و یا روی صفحات شامل آن‌ها تحت نیروهای پیچشی متأثر از خواص فیزیکی و شیمیایی افزونه‌های گل است. از ۱۰ تا حدود ۳۰ درجه یک روند ثابت کاهشی همراه با نوفه‌های افزایشی و کاهشی ریز دیده می‌شود که ناشی از برهم‌کنش ذرات جداشده روی هم می‌باشد. از ۳۰ درجه تا آخر نیز مربوط به مقاومت پیچشی باقی‌مانده می‌باشد.

تنوع در میزان حداکثر مقاومت پیچشی در آزمایش‌های مختلف یک نمونه دیده می‌شد که ناشی از سطح تماس‌های مختلف نیم‌کره مخصوص دستگاه با ذرات مختلف درون کیک و جهت‌گیری‌های متفاوت این ذرات است که البته ضریب تغییرات این داده‌ها در حد قابل قبولی بود [۱۳].

نکته قابل ذکر دیگر اینکه در این آزمایش‌ها مدل‌سازی در مقیاس کوچک انجام گرفته است که اگر این مدل‌سازی در مقیاس واقعی چاه باشد با توجه به سطح فعال بیشتر، اعداد بسیار متفاوت‌تری را برای مقاومت پیچشی

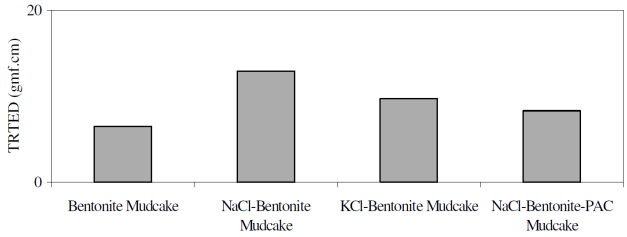


Fig. 8. Maximum Torsional Resistance at Targeted Embedment Depth (MTRTED) of mud cakes in [12]

شکل ۸: مقاومت پیچشی بیشینه گل‌های بنتونایتی مقاله [۱۲]

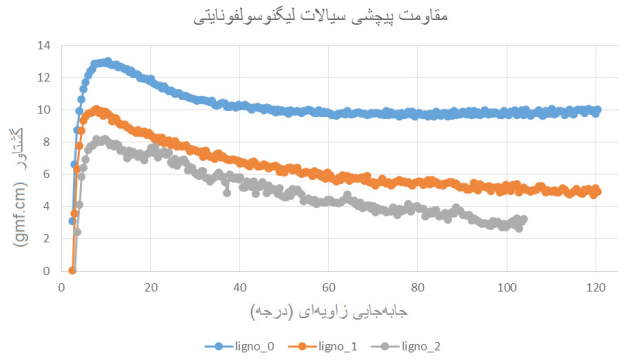


Fig. 9. Torsional Resistance at Targeted Embedment Depth of Lignosulfonate mud cakes

شکل ۹: مقاومت پیچشی بیشینه گل‌های لیگنوسولفونایتی

کیک گل شاهد خواهیم بود.

با توجه به نکات ذکرشده در این قسمت به نظر می‌رسد در میان گل‌های بنتونایتی گل A_1 به علت خاصیت روان کاری بالای خود و مقاومت پیچشی پایین خود در جهت رفع گیر بسیار مناسب باشد.

گل‌های A_2 و A_3 به علت افت صافاب بالای خود و از طرفی مقاومت پیچشی بالا و ضخامت کیک گل زیاد که به طبع آن سطح فعال بیشتری را ایجاد می‌کنند به‌عنوان بدترین گل در این میان قرار دارند. نکته حائز اهمیت در مورد گل‌های نمکی این است که شاید به طور دستی از افزودن نمک جلوگیری شود اما رسیدن چاه به سازندهای تبخیری و آلوده شدن گل‌های بنتونایتی با نمک‌ها می‌تواند موجب گیر اختلاف فشاری گردد. سازندهای متخلخل ماسه‌ای نیز از این حیث بسیار مستعد گیر اختلاف فشاری می‌باشند.

گل A_4 به علت وجود PAC که یک سلولز پلی آنیونیک است به‌عنوان کاهنده افت صافاب می‌تواند بسیار مؤثر باشد و با توجه به مقاومت پیچشی پایین آن و خاصیت روان کاری در کنار بنتونایت می‌تواند به‌عنوان یک گل مناسب به کار رود.

گل $Ligno_0$ که به علت وجود تینرهای لیگنوسولفونایت و لیگنایت دارای خاصیت روان کاری بالایی است که می‌تواند در رفع گیر چاه مفید باشد.

گل $Ligno_1$ نیز به علت وجود تینرهای لیگنوسولفونایت و لیگنایت دارای خاصیت روان کاری بالایی می‌باشد و با توجه به افت صافاب و مقاومت پیچشی بیشینه آن در مقایسه با گل $Ligno_0$ به نظر می‌رسد افزونه میکا تأثیر چندانی نداشته و درنتیجه عملکردی مشابه گل $Ligno_0$ دارد.

در گل $Ligno_2$ همان‌طور که پیش‌تر توضیح داده شد خاک اره ازیک‌طرف افت صافاب و ضخامت کیک گل را افزایش داده اما مقاومت پیچشی کمتری از خود نشان داده است و البته گل فوم مانندی را هم ایجاد کرد که این نتایج نشانگر این است که تصمیم‌گیری در مورد افزایه خاک اره در این مقیاس آزمایشگاهی نیاز به تحقیقات گسترده‌تری دارد. از طرفی دستگاه حاضر از دقت کافی برخوردار نبوده و همان‌طور که قبل‌تر توضیح داده شد جهت کاهش خطا باید از نمونه پیشرفته‌تر این دستگاه تحت عنوان HPHT استفاده کرد.

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی اثر افزایه‌های نمکی پتاسیم کلرید، سدیم کلرید و افزایه PAC روی گل بنتونایتی و همچنین اثر خاک اره و میکا روی گل‌های لیگنوسولفونایتی، در رفع گیر اختلاف فشاری مطالعه شده است. متغیرهای اصلی، ضخامت کیک گل، مدت‌زمان افت صافاب ۱۰۰ میلی‌لیتر و مقاومت پیچشی کیک گل در هر یک از گل‌ها همراه سایر متغیرهای فرعی معمول گزارش شده است. نتایج حاصل حاکی از آن است که گل‌های بنتونایتی در حضور نمک عملکرد ضعیفی را از خود نشان می‌دهند، همچنین گل لیگنوسولفونایتی بدون وجود مواد اضافی عملکرد بهتری را در جهت رفع گیر

اختلاف فشاری نشان می‌دهد.

با توجه به آزمایش‌ها و تحلیل‌های انجام‌شده، نتایج زیر به دست آمده است:

- نمک‌ها به‌عنوان یک عامل تشدیدکننده گیر اختلاف فشاری می‌باشند و مطابق شکل‌های ۷ و ۸ و با مقایسه نمک‌های سدیم و پتاسیم هر چه اندازه کاتیون موجود در آن‌ها بزرگ‌تر و پیوند بین آن‌ها قوی‌تر باشد مقاومت پیچشی کیک گل و به دنبال آن احتمال وقوع گیر اختلاف فشاری افزایش خواهد یافت.
- وجود PAC به‌عنوان کنترل‌کننده افت صافاب می‌تواند در رفع گیر اختلاف فشاری مؤثر باشد
- سیالات لیگنوسولفونایتی به علت خاصیت روان‌کاری بالا جهت گیر اختلاف فشاری بسیار مفید می‌باشند.
- افزونه میکا در تسهیل عملکرد سیال لیگنوسولفونایتی جهت رفع گیر بی‌تأثیر است.
- چرخش کم لوله حفاری در ابتدای گیر اختلاف فشاری بسیار مؤثرتر از سایر روش‌ها است.

در راستای رسیدن به راه‌حل مناسب جهت رفع گیر اختلاف فشاری پیشنهادهای زیر ارائه می‌شوند.

- بهبود روش‌های اندازه‌گیری مقاومت پیچشی در دستگاه MCCE.
- انجام تحقیقات بیشتر روی خواص فیزیکی و شیمیایی افزونه خاک اره.
- بررسی تأثیر نمک‌ها در سیالات لیگنوسولفونایتی.
- یافتن متغیرهای مؤثر بیشتر در پدیده گیر اختلاف فشاری و رفع آن.
- تحقیقات روی سایر افزونه‌ها جهت رسیدن به ترکیب مناسب گل جهت جلوگیری از گیر اختلاف فشاری.
- تطبیق روش‌های آماری و الگوریتم‌های شبکه‌های عصبی بر اساس نتایج حاصل از متغیرهای ارائه‌شده در این تحقیق.

منابع

[1] M. Adelzadeh, Various Stuck Pipe, *Journal of Oil Exploration and Production*, 160(1) (2013) 42-43 (In Persian).

[2] Schlumberger, Stuck-Pipe Prevention, self-learning course, 1997.

[3] M. Moradinezhad, Ashouri, S., Rouhi, A., Prediction of Drill string stuck in Maroon Oil Field Used Neural Networks, *Journal of Oil Exploration and Production*, 75(1) (2010) 58-62. (In Persian).

[4] M. Annis, P. Monaghan, Differential pressure sticking-laboratory studies of friction between steel and mud filter cake, *Journal of Petroleum Technology*, 14(05) (1962) 537-543.

[5] W. Hempkins, R. Kingsborough, W. Lohec, C. Nini, Multivariate statistical analysis of stuck drillpipe situations, *SPE Drilling Engineering*, 2(03) (1987) 237-244.

[6] M. Biegler, G. Kuhn, Advances in prediction of stuck pipe using multivariate statistical analysis, in: *SPE/IADC Drilling Conference*, Society of Petroleum Engineers, 1994.

[7] J. Howard, S. Glover, Tracking stuck pipe probability while drilling, in: *SPE/IADC Drilling Conference*, Society of Petroleum Engineers, 1994.

[8] S. Ottesen, S. Benaissa, J. Marti, Down-hole simulation cell for measurement of lubricity and differential pressure sticking, in: *SPE/IADC drilling conference*, Society of Petroleum Engineers, 1999.

[9] M. Amanullah, C. Tan, A non-destructive method of cake thickness measurement, in: *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, 2000.

[10] M. Amanullah, C. Tan, Embedment Modulus of Mudcakes–Its Drilling Engineering Significance, in: 2001 *AADE National Drilling technology Conference*, 2001, pp. 27-29.

[11] M. Amanullah, Experimental Determination of Adhesive-Cohesive Bond Strength (ACBS) and Adhesion-Cohesion Modulus (ACM) of Mudcakes, in: *IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology*, Society of Petroleum Engineers, 2002.

[12] M. Amanullah, Experimental Determination of Compressive, Pulling and Torsional Resistance of Mudcakes using a Triple Action Load Cell Assembly, in: 10th *ISRM Congress*, International Society for Rock Mechanics, 2003.

[13] M. Amanullah, Experimental determination of the variation of torsional resistance of mudcakes with the variation of mud and mudcake composition, in: *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers, 2004.

[14] C. Siruvuri, S. Nagarakanti, R. Samuel, Stuck pipe prediction and avoidance: A convolutional neural network approach, in: *IADC/SPE Drilling Conference*, Society of Petroleum Engineers, 2006.

[15] E.H. Alkamil, H.R. Abbood, R.E. Flori, A. Eckert, Wellbore stability evaluation for Mishrif formation, in: *SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference*, Society of Petroleum Engineers, 2017.

[16] A. Sezer, A. Mardani-Aghabaglou, A. Boz, N. Tanrınıan, An investigation into strength and permittivity of compacted sand-clay mixtures by partial replacement of water with lignosulfonate, *Acta Physica Polonica A*,

130(1) (2016) 23-27.

[17] M. Swaco, *Drilling fluids engineering manual*, Houston, Texas, Estados Unidos, (2001).

[18] J. Fink, *Petroleum engineer's guide to oil field chemicals and fluids*, Gulf Professional Publishing, 2015.

[19] R. Caenn, H.C. Darley, G.R. Gray, *Composition and properties of drilling and completion fluids*, Gulf professional publishing, 2011.

[20] E. Azad, *Analysis the Effect of Mud Drilling Additives in Pipe Sticking by Using Lignosulfonate Fluids*, Amirkabir University of Technology, 2015. (In persian)

[21] F. Lourenço, A. Marcelo, *A decision support model for differential sticking avoidance*, Curtin University, 2012.

[22] M. Amanullah, Boyle, R., Multi-Purpose Mudcake Characterisation Equipment and associated test procedures, in: *C.P. Drilling Fluid Laboratory ARRC* (Ed.), 2006.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

E. Azad, S. Yousefirad, M. Deh Vedar, P. Moarefand, Experimental Study of Freeing Stuck Pipe by Changing in Characterization and Additives of Mud Cake, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(4) (2018) 863-872.

DOI: 10.22060/mej.2017.11736.5305